



Métodos y análisis con Tecnologías de la Información Geográfica

Análise de tendência sazonal de série temporal de EVI (Índice de Vegetação Realçado) na bacia do Rio Pardo – SP – Brasil por meio da ferramenta Earth Trends Modeler

Demarchi, Julio Cesar¹, Fuzzo, Daniela Fernanda da Silva², Piroli, Edson Luís³

1 Programa de Pós-Graduação em Geografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista - UNESP
Rua Roberto Simonsen, 305 - Presidente Prudente/São Paulo/Brasil
julio.demarchi@gmail.com

2 Curso de Geografia/Câmpus de Ourinhos/Universidade Estadual Paulista - UNESP
Avenida Renato da Costa Lima, 451 - Ourinhos/São Paulo/Brasil
silva.danielaf@gmail.com

3 Curso de Geografia/Câmpus de Ourinhos/Universidade Estadual Paulista - UNESP
Avenida Renato da Costa Lima, 451 - Ourinhos/São Paulo/Brasil
piroli@ourinhos.unesp.br

RESUMO

Os fenômenos ambientais apresentam variabilidades e tendências sazonais e interanuais decorrentes de processos e causas naturais e das alterações produzidas pelo homem na superfície terrestre. O objetivo deste trabalho foi realizar a análise de tendência sazonal e interanual da série temporal de imagens do Índice de Vegetação Realçado (EVI) do satélite MODIS na bacia do Rio Pardo, São Paulo, Brasil, no período de 2001 a 2016, por meio da técnica Seasonal Trends Analysis, disponível na ferramenta Earth Trends Modeler do SIG Idrisi Taiga, para detectar tendências sazonais e interanuais no ciclo das culturas agrícolas e dos demais usos da terra. Foi realizada a análise de regressão harmônica em cada pixel das imagens da série temporal para extrair imagens dos parâmetros de forma Amplitude 0 (índice médio anual), Amplitude 1 e Fase 1 (ciclo anual), Amplitude 2 e Fase 2 (ciclo semianual). Em seguida, a tendência da série temporal foi analisada pelo operador de declividade mediana Theil-Sen e calcularam-se os parâmetros de significância Mann-Kendall p e Z. Os parâmetros de forma, as curvas sazonais ajustadas e observadas, os períodos 40 % green-up e 40 % green-down de cada classe de uso da terra e os parâmetros de significância evidenciaram a tendência de aumento de EVI ao longo do ano no final da série temporal em todas as classes de uso da terra, com exceção das culturas anuais e zonas urbanas, o aumento da duração do período verde e a existência de tendência em 28,8 % da área de estudo a $p < 0,001$.

Palabras clave: **tendência sazonal, tendência interanual, regressão harmônica, parâmetros de forma, uso da terra.**

ABSTRACT

The environmental phenomena present seasonal and inter-annual variability and trends resulting from natural processes and causes and the man-induced changes over the Earth surface. This paper aims to perform the seasonal and inter-annual trend analysis of the time series of MODIS Enhanced Vegetation Index (EVI) images in Pardo river basin, located in São Paulo State, Brazil, from 2001 to 2016, by means of the "Seasonal Trends Analysis" technique, available in the Earth Trends Modeler tool of the GIS Idrisi Taiga, in order to detect seasonal and inter-annual trends in the cycle of agricultural crops and the other land uses. A harmonic regression analysis was performed in each cell of the time series to extract shape parameters images, such as Amplitude 0 (mean annual index), Amplitude 1 and Phase 1 (annual cycle), Amplitude 2 and Phase 2 (semi-annual cycle). Subsequently, the trend of the time series was analyzed by the median slope operator Theil-Sen and the Mann-Kendall p and Z significance parameters were calculated. The shape parameters, the adjusted and observed seasonal curves, the 40% green-up and 40% green-down periods of each land use class and the significance parameters evidenced an increase in EVI over the year at the end of the time series in all land use classes, with the exception of annual crops and urban areas, the increase in the duration of the green period and the existence of a trend in 28.8% of the study area at $p < 0.001$.

tude 1 and Phase 1 (annual cycle), Amplitude 2 and Phase 2 (semiannual cycle). Then, the time series trend was analyzed by the Theil-Sen median slope operator and both *p* and *Z* Mann-Kendall significance parameters were calculated. The shape parameters, the adjusted and observed seasonal curves, the 40% green-up and 40% green-down periods of each land use class and the significance parameters demonstrated the increasing trend of EVI during the whole year by the end of the time series in all land use classes, except for annual crops and urban areas, besides the increasing length of the green period and the existence of trend in 28.8% of the study site at *p*<0.001 significance.

Keywords: seasonal trend, inter-annual trend, harmonic regression, shape parameters, land use.

I. INTRODUÇÃO

Os fenômenos ambientais apresentam variabilidades e tendências sazonais e interanuais, decorrentes de variações no ciclo de radiação solar global e das alterações produzidas pelo homem na superfície da Terra. As ditas mudanças climáticas globais têm efeitos diretos sobre a agricultura, os recursos hídricos, as florestas, os ecossistemas e, conseqüentemente, sobre a economia, a política e a qualidade de vida da população.

O estudo da fenologia da vegetação tem despertado interesse da comunidade científica nos últimos anos como indicador das mudanças climáticas, dada a sensibilidade da dinâmica da vegetação às variáveis climáticas. Como a detecção de dados fenológicos em campo demanda muito trabalho, tem sido frequente o uso de produtos de sensoriamento remoto orbital para o seu estudo em diversas escalas, como os índices de vegetação (Eastman, Sangermano, Machado, Rogan, & Anyamba, 2013).

Embora o índice de vegetação mais conhecido e utilizado seja o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), ele apresenta algumas desvantagens, como a não linearidade e problemas de escala, a saturação em condições de alta biomassa das folhas da vegetação e sensibilidade à reflectância do solo em condições de vegetação esparsa. Nesse sentido, o satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) disponibilizou o Índice de Vegetação Realçado (Enhanced Vegetation Index, EVI), concebido para ampliar a sensibilidade das medidas em biomas densamente florestados e áreas agrícolas, reduzindo o efeito do substrato abaixo do dossel e as fontes de ruídos de aerossóis. Este índice é mais sensível ao aumento da densidade da cobertura vegetal e aos parâmetros estruturais do dossel, como o Índice de Área Foliar (Justice et al., 1998). O índice EVI é dado pela equação [1].

$$EVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (L + \rho_{nir} + C_1\rho_{red} - C_2\rho_{blue}) \quad (1)$$

Onde: ρ_{nir} é a reflectância no canal infravermelho próximo; ρ_{red} a reflectância no comprimento de onda do vermelho; ρ_{blue} a reflectância no comprimento de onda do azul; *L* é o fator de correção para o substrato do dossel que modela a transmitância da radiação no comprimento de onda vermelho e infravermelho próximo através do dossel; C_1 e C_2 são os coeficientes que usam a banda do azul para corrigir os efeitos dos aerossóis na banda do vermelho (Justice et al., 1998).

Como os índices de vegetação são sensíveis a seus parâmetros biofísicos, eles constituem indicadores efetivos das mudanças ambientais globais, como as mudanças climáticas. Na região Sudeste do Brasil, onde se localiza o estado de São Paulo, há a tendência de aumento das chuvas intensas em até 120 mm por década, mas as chuvas se tornarão irregulares devido à diminuição da umidade proveniente da Amazônia, principalmente no período seco. Estudos publicados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (IPCC/ONU) apontam quedas de 30 % na

produtividade agrícola da América Latina até 2080 devido às mudanças climáticas, afetando aproximadamente 50 % das terras aráveis até 2050 em razão da desertificação e da salinização. Pesquisas simulando aumentos de temperatura de 1 a 5,8°C no Brasil identificaram riscos agroclimáticos em culturas como feijão, arroz, soja, algodão, milho e cana-de-açúcar, com reduções consideráveis na produtividade e na área apta ao cultivo em todas as culturas. As florestas, por sua vez, poderão ser afetadas por alterações nas taxas de crescimento, de regeneração (devido ao aumento da temperatura, redução da umidade e aumento dos incêndios) e pelas alterações fisiológicas nos insetos polinizadores e surgimento de novas pragas (Oliveira & Alves, 2011).

De acordo com Teferi, Uhlenbrook, & Belket (2015), as mudanças na vegetação ocorrem de três formas: mudança sazonal ou cíclica, direcionada pelo clima (temperatura e chuva) impactando a fenologia da planta; mudança gradual ao longo do tempo (monotônica), como alterações no manejo do solo ou a sua degradação; e mudanças abruptas a partir de um determinado ponto no tempo, que podem ser causadas por distúrbios tais como transformações repentinas em políticas de uso da terra, desmatamento, inundações, secas e incêndios.

A análise de séries temporais de índices de vegetação pode relevar tendências de alterações sazonais e interanuais relacionadas às mudanças ambientais em diferentes escalas. Nesse sentido, o SIG Idrisi (Eastman, 2009b) desenvolveu a técnica chamada Análise de Tendência Sazonal (Seasonal Trends Analysis, STA), disponível na ferramenta Earth Trends Modeler (ETM), para analisar e modelar essas tendências. A técnica compreende duas etapas de análise de séries temporais e uma etapa final de processamento para visualização e análise dos resultados. Em todas elas, a análise é realizada pixel a pixel ao longo do tempo (Eastman et al., 2009).

Na primeira etapa, as imagens de cada ano da série temporal de interesse são submetidas à análise de regressão harmônica [2], a saber:

$$y = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{n=2} \left\{ a_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right\} + e \quad (2)$$

Em que: α_0 é a média da série; *n* é a harmônica (um número inteiro multiplicador); *t* é o tempo; *T* é a extensão temporal da série; e *e* é o termo relativo ao erro. O número de harmônicas pode variar de 1 a *T*/2 (metade da série temporal), mas Eastman (2009a) recomenda o uso de não mais que duas harmônicas, pois ela fornece uma generalização importante da curva sazonal e quanto maior sua frequência, mais ela será afetada por ruídos sub-anuais.

Rearranjando os termos da equação após resolução e ignorando o fator de erro, a curva sazonal generalizada pode ser expressa como [3]:

$$y = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{n=2} \alpha_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T} + \varphi_n\right) \quad (3)$$

Onde: α_n são amplitudes e φ_n são ângulos de fase variando de 0° a 360°. A sazonalidade de todos os pixels é expressa na forma de cinco imagens de parâmetros de forma harmônica para cada ano: a imagem média anual (Amplitude 0), as imagens amplitude e fase para o ciclo anual (Amplitude 1 e Fase 1) e as imagens amplitude e fase para o ciclo semi-anual da série temporal (Amplitude 2 e Fase 2).

Tendo calculado os cinco parâmetros de forma supracitados, a segunda etapa da análise de tendência sazonal consiste na verificação da existência de tendência nestes parâmetros usando o operador de declividade mediana Theil-Sen, que calcula a declividade (inclinação ou slope) de cada combinação pareada de amostras ao longo da extensão temporal da série para cada pixel individualmente [4]. A mediana dessas inclinações é utilizada para caracterizar a tendência, resultando em um mapa de tendência para cada parâmetro de forma (Eastman et al., 2009).

$$TS \text{ slope} = \text{mediana} \left(\frac{X_j - X_i}{t_j - t_i} \right) \quad (4)$$

Onde: X representa o valor das amostras e t é a posição no tempo de cada amostra, em que $1 \leq j \leq n$, sendo n o tamanho da amostra (Eastman, 2009a).

A declividade mediana é um parâmetro estatístico robusto resistente ao impacto de dados discrepantes. É, portanto, muito efetiva na caracterização de tendências de pequenas séries temporais, por adotar um limiar de 29 % do tamanho da série temporal, ou seja, para que um valor discrepante (outlier) possa ser incluído no cálculo da tendência, ele deve ocorrer em pelo menos 29 % da extensão da série temporal (Teferi, Uhlenbrook, & Belket, 2015). No presente trabalho, a série temporal contém 368 imagens EVI (23 imagens por ano e 16 anos), o que significa que um valor deve estar presente em pelo menos 107 imagens ou 4,64 anos, excluindo, portanto, os efeitos dos fenômenos ENOS (El Niño - Oscilação Sul) e La Niña, cuja duração é de 12 meses e de 12 a 24 meses, respectivamente.

A ferramenta STA também calcula o parâmetro interceptação mediana [5] de cada parâmetro de forma para poder gerar representações das curvas sazonais. Isto é feito projetando a inclinação mediana através dos valores dos dados de um pixel em cada intervalo de tempo e calculando a mediana dos interceptos assim determinados (Eastman et al., 2009).

$$\text{Intercepto} = X_i - \text{Inclinação mediana} * t_i \quad (5)$$

É impossível resumir os cinco parâmetros de forma de curvas sazonais em apenas uma imagem, mas eles podem ser reunidos em composições coloridas RGB. A ferramenta STA produz a composição colorida Amplitude, associando a imagem Amplitude 0 ao canal vermelho, a Amplitude 1 ao canal verde e a Amplitude 2 ao canal azul. O mesmo ocorre com a imagem Fase, que aloca a imagem Amplitude 0 no canal vermelho, a Fase 1 no canal verde e a Fase 2 no canal azul (Eastman et al., 2009).

Tais composições coloridas possuem número muito elevado de classes temáticas, o que torna difícil, ou quase impossível, sua interpretação. Para facilitá-la, foi desenvolvida uma ferramenta interativa de auxílio à interpretação, na qual uma área de interesse pode ser delineada por meio de um arquivo

vetorial ou por uma amostra circular. A declividade mediana e os valores de intercepto são calculados sobre todos os pixels da amostra e curvas ajustadas de cada parâmetro de forma são criadas para o início e o final da série temporal, conforme preferência do usuário. Tais curvas são idealizadas com base nas tendências determinadas para a série inteira e, sendo plotadas no mesmo gráfico, permitem a comparação e a análise da sazonalidade. Também, é possível plotar curvas sazonais da mediana observada de um número de anos do início e do final da série temporal. Este intervalo é definido pelo usuário, descreve um período de tempo menor e apresenta mais ruídos que as curvas ajustadas (Eastman et al., 2009).

A significância dos parâmetros Theil-Sen slope e intercept pode ser analisada por meio do teste de significância Mann-Kendall, um teste não-paramétrico por meio do qual se obtém imagens dos parâmetros Z e p. A estatística Z segue a distribuição normal padrão com média zero e variância unitária sob a hipótese nula de ausência de tendência. Um valor positivo de Z indica tendência ascendente, ao passo que valores negativos de Z indicam tendência descendente. O parâmetro probabilidade (p) representa as medidas de evidência para rejeitar a hipótese nula (distribuição normal). Valores p inferiores ao intervalo de confiança são aceitos como tendência significativa, e valores superiores a este intervalo são rejeitados. Tais parâmetros são determinados pelas equações [6], [7] e [8].

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{para } S > 0 \\ 0 & \text{para } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{para } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Em que: S é o coeficiente de correlação Mann-Kendall e Var(S) é a variância de S.

$$p = 2[1 - \phi(|Z|)] \quad (7)$$

Onde:

$$\phi(|Z|) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{|Z|} e^{-t^2} dt \quad (8)$$

Vários pesquisadores utilizaram a Análise de Tendência Sazonal em diversos estudos de tendências sazonais e interanuais. Eastman et al. (2013) analisaram as tendências sazonais globais do índice NDVI no período de 1982-2011 e verificaram tendências de aumento dos valores médios anuais, da amplitude anual do índice de vegetação e do pico de verde no verão em diferentes áreas, prováveis reflexos das mudanças climáticas globais. Teferi, Uhlenbrook, & Belket (2015) estudaram as tendências interanuais e sazonais de NDVI na bacia do Alto Nilo Azul (bacia Abay), localizada na Etiópia, por meio das séries temporais de 1981-2006 (dados do Global Inventory Modeling and Mapping Studies - GIMMS) e 2001-2011 (MODIS) e verificaram aumento na tendência positiva de NDVI no primeiro período, mas tendência de redução do índice em parte dela a partir de meados da década de 2000. Os autores também identificaram cinco classes de tendências nos parâmetros combinados de NDVI médio anual, amplitude anual do NDVI e ângulo de fase (posição temporal do pico de verde da vegetação). Mishra & Chaudhuri (2015) avaliaram as ten-

dências sazonais e interanuais de imagens NDVI (MODIS) na região de Uttarakhand, nos Himalaias indianos, entre os anos 2000 e 2014, e verificaram tendências negativas nas altitudes inferiores a 800 metros e superiores a 1.600 metros, mas tendências positivas nas altitudes entre 800 e 1.600 metros. Culturas irrigadas e áreas de expansão urbana nos contrafortes dos Himalaias apresentaram tendência à redução do índice de verde, enquanto culturas de sequeiro apresentaram tendência ao aumento do verde. A maioria da região apresentou também tendência à antecipação do início da estação verde.

No Brasil, no entanto, há poucos estudos de tendências sazonais e interanuais utilizando a técnica Seasonal Trends Analysis. A área de estudo deste trabalho abrange parcialmente vinte municípios do estado de São Paulo e sua principal atividade econômica é a agricultura, responsável por constantes mudanças no uso da terra e substituição da cobertura vegetal original. Ademais, apresenta diferentes tipos de solos e climáticos, o que torna sua vegetação propícia a diferentes comportamentos sazonais e interanuais. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar a análise de tendência sazonal da série temporal de imagens EVI (Índice de Vegetação Realçado) do satélite MODIS na bacia do Rio Pardo, estado de São Paulo, Brasil, no período de 2001 a 2016, por meio da ferramenta Seasonal Trends Analysis (STA), com a finalidade de detectar tendências sazonais e interanuais no ciclo das culturas agrícolas e dos demais usos da terra ao longo do período analisado.

II. MÉTODO

A. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Pardo está localizada na região Centro-Sudoeste do Estado de São Paulo, Brasil, sendo parte da Região Hidrográfica do Paraná e componente da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema. No sistema paulista de gerenciamento de recursos hídricos, faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 17 (UGRHI-17), que contém os tributários do médio curso do Rio Paranapanema. Os principais afluentes do Rio Pardo são o Rio Claro, em sua margem direita, e o Rio Novo, na margem esquerda (Piroli, 2013).

Sua área é de 4.801,47 km² e envolve parte ou a totalidade de vinte municípios, sendo os de maior área na bacia do Rio Pardo os municípios de Avaré, Botucatu, Santa Cruz do Rio Pardo, Águas de Santa Bárbara, Iaras e Itatinga (Figura 1). Os municípios mais populosos são: Botucatu (127.370 habitantes), Ourinhos (103.026 habitantes), Avaré (82.935 habitantes), Lençóis Paulista (61.454 habitantes) e Santa Cruz do Rio Pardo (43.929 habitantes), de acordo com o Censo Demográfico 2010 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2010). Dos vinte municípios integrantes, dezesseis possuem zona urbana total ou parcial dentro da área de estudo.

Geologicamente, a bacia do Rio Pardo é constituída por formações litoestratigráficas caracterizadas por rochas sedimentares e ígneas da Bacia do Paraná e por depósitos sedimentares recentes, de idade Cenozóica. Os arenitos do Grupo Bauru (Formações Adamantina e Marília) predominam nos interflúvios, e as rochas ígneas basálticas da Formação Serra Geral acompanham os leitos e várzeas dos rios principais, além de escarpas e cornijas na região das cuestas (Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema [CBH-MP], 2007).

Estando localizada na Bacia Sedimentar do Paraná, a bacia do Rio Pardo tem suas principais nascentes no Planalto Residual de Botucatu, no reverso da cuesta, onde predominam as coli-

nas com topos amplos, cujas altitudes variam entre 600 e 900 metros, com declividade média de 10 a 20 %. A região central e a foz do Rio Pardo estão localizadas no Planalto Centro-Ocidental, cujos relevos dominantes são as colinas amplas e baixas com altitude entre 300 e 600 metros e declividade entre 10 e 20 % (Ross & Moroz, 1997). As altitudes máxima e mínima são 1.003 metros e 376 metros, perfazendo a amplitude altimétrica de 627 metros. Aproximadamente 89 % da área da bacia possui declividade inferior a 12 %, o que caracteriza seu relevo plano, tendo favorecido a ocupação agrícola, a mecanização e o desmatamento de grande parte da vegetação original (Piroli, 2013).



Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Pardo, Estado de São Paulo.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a maioria dos municípios localizados no centro, sul e leste da bacia do Rio Pardo é caracterizada pelo tipo climático Cwa, clima temperado úmido com inverno seco e verão quente. Os municípios de Salto Grande e Lençóis Paulista, a exemplo de grande parte dos municípios do noroeste paulista, apresentam clima do tipo Aw, tropical (megatérmico) com estação seca no inverno, e os municípios de Ourinhos e Canitar possuem clima Am, tropical monçônico com inverno seco e chuvas excessivas no verão (Miranda et al., 2005).

Nos municípios situados na porção oeste da área de estudo, o tipo de vegetação original predominante é a Floresta Estacional Semidecidual, subtipo Antrópica (Vegetação secundária e atividades agrárias). Já na porção leste destaca-se a vegetação de Cerrado, também antropizada (subtipo Atividades agrárias) (IBGE, 2004). O Inventário Florestal da Vegetação Nativa do Estado de São Paulo (São Paulo, 2009) evidencia a conservação de fragmentos florestais de cerrado na porção central da área de estudo e de fragmentos de menor tamanho de floresta estacional semidecidual nas porções oeste e leste. A maior parte da vegetação natural, no entanto, foi substituída pelas atividades agrícolas.

De acordo com Oliveira, Camargo, Rossi & Calderado Filho (1999), os principais tipos de solo da bacia hidrográfica do Rio Pardo são os Latossolos Vermelhos, que ocupam a maior área na bacia, os Latossolos Vermelho-Amarelos, os Nitossolos

Vermelhos e os Argissolos Vermelho-Amarelos. Dentre eles, os mais suscetíveis à erosão são os Latossolos Vermelho-Amarelos e os Argissolos Vermelho-Amarelos, sobretudo os localizados nas áreas de declividade mais elevada.

B. MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho, utilizaram-se os seguintes materiais:

- Cartas topográficas do IBGE correspondentes à área de estudo, na escala 1:50.000 e equidistância entre as curvas de nível de 20 metros;
- Imagens do satélite Landsat-8, sensor Operational Land Imager (OLI), órbitas/pontos 220/76 (data de passagem: 30/07/2016) e 221/76 (data de passagem: 06/08/2016), bandas 3 (0,53 – 0,59 μm), 4 (0,64 – 0,67 μm), 5 (0,85 – 0,88 μm) e 6 (1,57 – 1,65 μm), de resolução espacial 30 metros e resolução radiométrica 16 bits, obtidas do Catálogo de Imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) - <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>;
- Imagens EVI (Índice de Vegetação Realçado) do satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), sensor Terra, produto MOD13Q1, do período de 01/01/2001 a 31/12/2016, com resolução espacial de 250 metros e resolução temporal de 16 dias, obtidas da ferramenta MODIS Reprojection Tool Web Interface (MRTWeb) - <https://mrtweb.cr.usgs.gov/>;
- Sistema de Informação Geográfica Idrisi Taiga (Eastman, 2009b), com destaque para a ferramenta Earth Trends Modeler (ETM);
- Sistema de Informação Geográfica ArcMap versão 10 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2010).

C. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A base de dados da bacia hidrográfica do Rio Pardo foi elaborada no SIG ArcMap versão 10, a partir do mosaico das cartas topográficas do IBGE que a compõem. A bacia hidrográfica foi delimitada considerando os pontos cotados que representam os divisores de águas e as curvas de nível.

As imagens EVI do satélite MODIS foram reprojetaadas da projeção sinusoidal para a projeção UTM e obtidas por meio da ferramenta MRTWeb. Como elas são fornecidas em resolução radiométrica de 16 bits, no intervalo de -2.000 a 10.000, realizou-se o reescalonamento para o intervalo -0,2 a 1,0 no SIG Idrisi Taiga utilizando o fator de escala 0,0001.

Em seguida, criou-se o projeto “rio_pardo” e a série temporal de EVI no módulo “Explore” da ferramenta “Earth Trends Modeler”, definindo-se o intervalo de 16 dias, os dias Julianos correspondentes às imagens e as datas e horários de início (01/01/2001, à zero hora) e término (31/12/2016, às 23:59 horas) da série de dados.

Na sequência, gerou-se a visualização da série temporal na aba “Explore Space / Time Dynamics”, na qual se verificaram as mudanças temporais do índice EVI a partir do cubo de visualização dinâmica.

Na aba “Explore Temporal Profiles”, selecionou-se como amostra vetorial o limite da bacia do Rio Pardo para obter o gráfico de valores médios de EVI ao longo da série temporal de dezesseis anos e analisar, desta forma, as flutuações médias interanuais do índice de vegetação em cada ano da série, assim como a linha de tendência Theil-Sen.

A Análise de Tendência Sazonal foi realizada no módulo “Analysis”, aba “STA (Seasonal Trend Analysis)”. O limite da bacia hidrográfica do Rio Pardo foi utilizado como máscara para a análise. Definiu-se o período de cinco anos como intervalo de tempo para a análise das curvas sazonais observadas do início e do fim da série temporal, ou seja, 2001 a 2005 e 2012 a 2016. O número de harmônicas utilizado foi 2, conforme recomendado por Eastman et al. (2009), e optou-se por calcular a significância Mann-Kendall do parâmetro Theil-Sen. As etapas da Análise de Tendência Sazonal estão descritas na introdução deste artigo.

Para interpretar os resultados da Análise de Tendência Sazonal, utilizou-se o painel “Explore Trends” da aba “Explore”. Como as composições coloridas dos parâmetros de forma Amplitudes e Fases são difíceis de interpretar por análise visual e levando em consideração o objetivo da análise, de compreender as tendências sazonais e interanuais dos diferentes tipos de uso da terra, elaborou-se o mapa de uso da terra da bacia do Rio Pardo do período de julho/agosto de 2016. As classes de uso da terra foram individualizadas e convertidas ao formato vetorial para uso como amostra vetorial na análise dos parâmetros de forma.

Para a elaboração do mapa de uso da terra da bacia do Rio Pardo, foram utilizadas as bandas 3, 4, 5 e 6 do satélite Landsat, correspondentes às faixas do verde, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. Inicialmente, elaborou-se o mosaico entre as imagens correspondentes às órbitas/pontos 220/76 e 221/76 que compõem a área de estudo. Em seguida, foi elaborada a composição colorida falsa-cor RGB 654, na qual as bandas utilizadas e sua combinação possibilitam a adequada identificação dos alvos por análise visual. No SIG Idrisi Taiga, a classificação de imagens por segmentação é realizada em três etapas: segmentação, geração das assinaturas espectrais dos segmentos e classificação da imagem. A primeira etapa (módulo “Segmentation”) agrupa pixels adjacentes em segmentos de imagem de acordo com a similaridade espectral entre eles, empregando a abordagem de delineamento de bacias hidrográficas para criar os segmentos segundo sua variância. Uma imagem variância derivada é tratada como imagem superfície alocando pixels a segmentos específicos baseado na similaridade de variância. Todas as bandas foram utilizadas no cálculo da segmentação, com pesos iguais. Os demais parâmetros foram: largura da janela móvel 3 x 3, tolerância de similaridade 5 (quanto maior for este índice, maiores serão o tamanho dos segmentos gerados e o grau de generalização da classificação), e pesos iguais para os fatores média e variância.

Na segunda etapa (módulo “Segtrain”), o arquivo vetorial de segmentos é sobreposto à imagem de satélite por meio da qual é possível identificar as classes de uso da terra, e o usuário define as amostras de treinamento para cada classe, criando assim suas assinaturas espectrais. Cada classe amostrada deve ter no mínimo 40 pixels de treinamento. Neste trabalho, algumas classes de uso da terra que possuem variações espectrais foram separadas em classes diferentes conforme a assinatura espectral e reclassificadas para agrupamento após o término da classificação. A classe culturas anuais, por exemplo, foi separada em seis classes de comportamentos espectrais distintos, incluindo as diferentes culturas agrícolas, diferentes densidades de cobertura vegetal e as áreas de solo exposto, uma vez que as imagens de satélite utilizadas são do período de inverno, quando o solo agrícola está em repouso ou após a colheita dos cultivos de inverno, ou ainda após a colheita da cana-de-açúcar, realizado ao longo do ano.

A etapa final da segmentação de imagens consiste na classificação por segmentação (módulo “Segclass”). O “Segclass” é um classificador de regra majoritária que utiliza uma imagem classificada do tipo pixel a pixel e um arquivo vetorial de segmentos, atribuindo a cada segmento a classe majoritária presente na classificação pixel a pixel, melhorando sua acurácia, produzindo uma classificação mais suave e preservando os limites entre os segmentos (Eastman, 2009a). Nesse sentido, foi realizada uma classificação supervisionada por máxima verossimilhança (módulo “Maxlike”) a partir das assinaturas espectrais geradas na etapa de treinamento da segmentação, e a imagem resultante foi utilizada na etapa final para produzir a classificação por segmentação. Como as áreas urbanas possuem resposta espectral heterogênea, próxima à de um solo exposto, realizou-se sua vetorização manual em tela e a rasterização sobre o mapa de uso da terra resultante da segmentação de imagem.

Para que o comportamento sazonal dos diferentes usos da terra pudesse ser analisado, as classes do mapa foram convertidas ao formato vetorial para entrada no painel de análise como amostra vetorial. A união de todos os polígonos de uma mesma classe em um mesmo indicador foi realizada no SIG ArcMap 10, de modo a se considerar toda a área ocupada por ela nos parâmetros de forma.

O painel “Explore trends” é uma ferramenta de auxílio à visualização e interpretação dos resultados da Análise de Tendência Sazonal, possuindo ferramentas para análise das tendências sazonais e das tendências interanuais. O módulo de tendências sazonais produz gráficos e informações sobre os parâmetros de forma das áreas selecionadas sobre as composições coloridas de Amplitude e Fase a partir de amostras circulares ou amostras vetoriais. Os parâmetros analisados neste trabalho, para cada classe de uso da terra, foram:

- Amplitude 0: média anual e linha de tendência Theil-Sen do índice de vegetação EVI ao longo da série temporal;
- Amplitude 1: diferença entre os valores máximo e mínimo de EVI ao longo do ano e linha de tendência Theil-Sen ao longo da série temporal;
- Fase 1: denota a temporização do pico de verdor anual expresso pelos valores EVI, representado pela posição do ponto de início da onda senoidal do verdor anual. Os valores da imagem Fase 1 variam entre 0 e 359°. Um aumento ou redução no ângulo de fase significa uma mudança no tempo de pico de verde para um período anterior ou posterior do ano, respectivamente. Cada 30° de fase indica a antecipação ou atraso de um mês no calendário anual. A redução no valor da Fase 1 representa um atraso no pico de verde ou no período de aumento de verde ao longo do ano, e o aumento deste valor significa a antecipação deste pico (Eastman et al., 2009; Teferi, Uhlenbrook, & Belket, 2015);
- Curvas sazonais ajustadas: linhas ajustadas baseadas na tendência de valores EVI nos meses do ano no primeiro ano da série temporal (linha verde) e no último ano da série (linha vermelha), determinadas ao longo de toda a série temporal. A análise das duas curvas possibilita a fácil interpretação das tendências de mudança sazonal da amostra analisada (Eastman et al., 2009a);
- Curvas sazonais observadas: representam os valores medianos observados da curva sazonal de um número determinado de anos do início e do final da série temporal (neste trabalho, cinco anos). Tais curvas apresentam mais ruídos que as curvas sazonais ajustadas, mas são utilizadas como auxílio na interpretação das variações sazonais;

- Green up/down: permite analisar as tendências na fenologia da vegetação. O parâmetro green up representa o período de maior verdor da vegetação e o parâmetro green down, o tempo de máxima perda de verde (clorofila) das plantas ao longo do ciclo anual. A ferramenta STA determina a data e horário de uma porcentagem dos intervalos de aumento e de redução do conteúdo verde. O valor padrão, utilizado neste trabalho, é de 40 % de cada período, ou seja, a data no ciclo anual em que o aumento do verde excede 40 % da trajetória completa de mínimo para máximo verde, e o momento em que excede 40 % da trajetória de máximo para mínimo teor de verde. Tal parâmetro possibilita analisar e comparar a duração do “período verde” no início e no final da série temporal. Neste trabalho, analisou-se a duração do período verde de todas as classes de uso da terra.

Os parâmetros de forma Amplitude 2 e Fase 2, que representam a amplitude do ciclo semianual e o tempo de início da curva senoidal do ciclo semianual, respectivamente, não foram analisados neste trabalho pois são de difícil interpretação (Eastman et al., 2009).

A análise de tendência interanual do painel “Explore trends” exhibe os mapas de inclinação mediana Theil-Sen (TS Slope) e os mapas dos parâmetros de significância p e Z, resultantes do teste não-paramétrico de significância Mann-Kendall.

O mapa do parâmetro de significância p apresenta escala de valores entre 0 e 1. Testaram-se neste mapa os níveis de significância de 99,9 %, 99 % e 95 %, ou seja, reclassificou-se o mapa de p em mapas booleanos, nos quais os valores $p < 0,001$, $p < 0,01$ e $p < 0,05$, considerados de tendência significativa (positiva ou negativa), tiveram valor 1 atribuído, e os valores p superiores a estes limites foram reclassificados em valor 0. Como a área com tendência significativa a 99,9 % de significância foi de 1.382,12 km², representando 28,8 % da área total da bacia do Rio Pardo, e os níveis 99 % e 95 % adicionaram 415,04 e 914,07 km² às áreas de tendência significativa, respectivamente, optou-se por adotar a significância de 99,9 % neste trabalho para as análises posteriores, considerado nível elevado de significância e cuja área representativa pode ser considerada prioritária para estudo e intervenção.

Em seguida, as áreas de significância positiva e negativa a $p < 0,001$ foram sobrepostas ao mapa do parâmetro Z de significância Mann-Kendall para verificar a força da significância e a sua distribuição espacial, assim como ao mapa TS Slope da Fase 1, de forma a avaliar as áreas de antecipação ou retardamento temporal do pico de verde anual e sua distribuição espacial. Também, foram comparadas as curvas sazonais observadas de EVI de dois municípios da bacia do Rio Pardo que apresentaram diferentes usos da terra predominantes, para verificar seu comportamento e evidenciar a importância da ferramenta STA como subsídio à gestão agrícola e ambiental municipal.

III. RESULTADOS

A variabilidade do índice de vegetação EVI na bacia hidrográfica do Rio Pardo ao longo da série temporal 2001-2016 decorre de inúmeros fatores, tais como o uso da terra e suas alterações sazonais e interanuais, o regime pluviométrico, a ocorrência de secas e geadas, os fenômenos El Niño - Oscilação Sul e La Niña, o balanço hídrico do solo, a temperatura do ar, entre outros.

A Figura 2 apresenta os valores médios mensais de EVI na bacia do Rio Pardo no período 2001-2016 e a linha de tendência obtida pelo operador Theil-Sen.

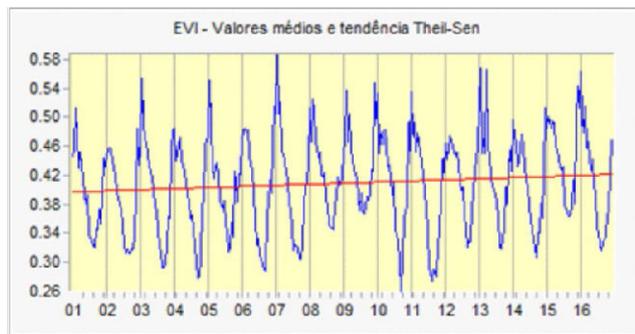


Figura 2. Valores médios mensais de EVI na bacia do Rio Pardo, SP, Brasil, no período 2001-2016 e linha de tendência Theil-Sen.

Os maiores valores máximos de EVI ocorreram no verão 2007-2008, seguido dos verões 2012-2013 e 2015-2016, correspondentes ao período chuvoso na região Sudeste do Brasil. Neste mesmo período (dezembro a fevereiro, aproximadamente), os menores valores de EVI ocorreram nos períodos 2001-2002 e 2012-2013. O período 2015-2016 foi caracterizado pela atuação do fenômeno ENOS de intensidade muito forte, e o período 2006-2007, pela ocorrência do mesmo fenômeno, mas com intensidade fraca. Embora não haja alteração comprovada no regime de chuvas na região Sudeste provocada pelo El Niño, a exemplo do que ocorre na região Sul (aumento do regime de chuvas, principalmente na primavera), pode ocorrer aumento nas temperaturas médias (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos [CPTEC], 2016), o que favorece a evapotranspiração e a ocorrência de chuvas convectivas no período, aumentando a disponibilidade hídrica para as plantas.

No período seco, os menores valores médios de EVI foram observados no inverno/primavera de 2011, seguido do ano 2012 e do ano 2004. No ano 2011 ocorreram duas geadas no centro-oeste do estado de São Paulo nos meses de junho e julho (Demarchi & Piroli, 2015), que provocaram perdas de safras ou redução do rendimento agrícola e, principalmente, a redução da atividade fotossintética das plantas. Já os maiores valores médios de EVI no período seco ocorreram nos anos 2009, 2015 e 2008, respectivamente, os quais foram influenciados pelos índices pluviométricos e, possivelmente, pela produtividade agrícola das culturas de inverno, que elevaram os valores de EVI. Em dois anos (2009 e 2015), houve atuação do fenômeno El Niño, sobretudo a partir do período chuvoso, e em 2008, atuação do fenômeno La Niña de intensidade forte, o que implica a necessidade de estudos aprofundados sobre a influência destes fenômenos climáticos de macroescala no regime pluviométrico e na vegetação da área de estudo. Os meses de menores valores médios de EVI na série temporal ocorreram entre agosto e outubro, com predomínio do mês de setembro.

A linha de tendência Theil-Sen evidencia uma tendência de aumento nos valores EVI durante a série temporal em aproximadamente 0,01. Como a Análise de Tendência Sazonal empregada neste estudo desconsidera as pequenas oscilações e ruídos até que estejam presentes em pelo menos 29 % da extensão da série temporal, os eventos climáticos destacados anteriormente têm influência reduzida ou nula na caracterização das tendências e os valores médios de EVI podem esconder variações espaciais, pois enquanto algumas áreas podem ter tendência de aumento da cobertura e atividade vegetal, outras podem ter tendência de redução das mesmas, até mesmo como consequência das mudanças no uso da terra.

A Figura 3 apresenta o mapa de uso da terra da bacia hidrográfica do Rio Pardo de julho/agosto de 2016.

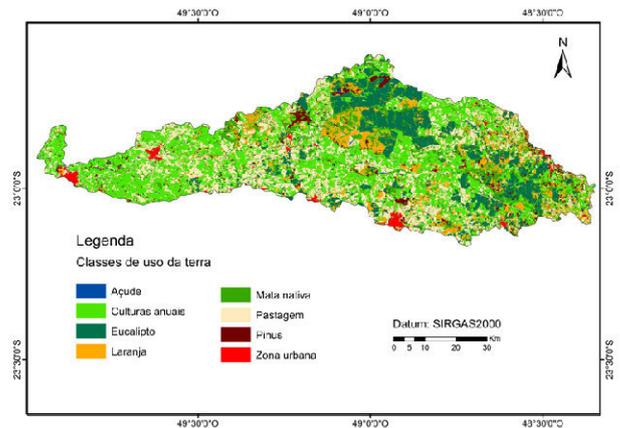


Figura 3. Mapa de uso da terra da bacia hidrográfica do Rio Pardo, de julho/agosto de 2016.

As áreas ocupadas pelas classes de uso da terra, em km² e porcentagem da área total, são apresentadas na Tabela 1.

TABELA I
ÁREA DAS CLASSES DE USO DA TERRA DA BACIA DO RIO PARDO (JULHO/AGOSTO DE 2016)

USO DA TERRA	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
Mata nativa	633,41	13,19
Laranja	501,93	10,45
Açude	22,34	0,47
Eucalipto	673,31	14,02
Pinus	176,95	3,69
Culturas anuais	1.600,77	33,34
Pastagem	1.124,11	23,41
Zona urbana	68,66	1,43
Total	4.801,47	100

As culturas anuais, que representam mais de 33 % da área de estudo, compreendem os cultivos de milho, soja, cultivos de inverno (plantas de cobertura, por exemplo), cana-de-açúcar (apesar do ciclo do cultivo ser de cinco anos, o solo fica descoberto durante o período do ano compreendido entre o corte e o desenvolvimento vegetativo após a rebrota, ou coberto pela palhada do período anterior) e solo exposto, os quais estão cobertos por algum cultivo em parte do ano, sobretudo no verão. Elas se distribuem por todos os municípios da bacia, mas apresentam maior concentração nos municípios de Santa Cruz do Rio Pardo, Ourinhos, Canitar, Chavantes e Ipaçu, Cerqueira César, Avaré e Iaras, com destaque para a cana-de-açúcar, que abastece algumas usinas de açúcar e álcool situadas nestes municípios.

As pastagens também se distribuem por toda a bacia hidrográfica ocupando aproximadamente 23 % de sua área. Destacam-se as pastagens extensivas, com nível médio de manejo e adoção de práticas de conservação do solo (terraços) em grande parte das áreas cuja declividade do terreno exige tal prática.

A citricultura representa mais de 10 % da área da bacia do Rio Pardo, mas está concentrada em alguns municípios nas proximidades de algumas indústrias de suco, como Santa Cruz do Rio Pardo, Águas de Santa Bárbara, Iaras, Avaré e Botucatu. O cultivo de laranja proporciona alta densidade de cobertura vegetal ao solo, pois as entrelinhas são em geral vegetadas.

O cultivo de eucalipto se concentra nos municípios de Iaras, Borebi, Lençóis Paulista, Botucatu, Itatinga e Avaré, nas porções norte e leste da bacia do Rio Pardo. Tais lavouras abastecem as indústrias de papel, celulose, madeira, de geração de energia, entre outras localizadas nos respectivos municípios. Há também, no município de Itatinga, a Fazenda

Experimental pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), que também desenvolve pesquisas na área de produção florestal e conservação do solo e da água. De acordo com Araújo Jr., Campos, Barros & Cardoso (2002), o cultivo de eucalipto substituiu áreas de cerrado, campos sujo e limpo no município de Botucatu devido aos incentivos fiscais, à instalação de companhias reflorestadoras na região, ao baixo valor das terras e à baixa fertilidade do solo, adequada para tal cultura. O cultivo de pinus ocupa área menor, mas segue os princípios da produção de eucalipto, estando localizado em áreas próximas a elas, além de ocupar também área significativa no município de Águas de Santa Bárbara.

As áreas de mata nativa estão esparsamente distribuídas sobre a bacia do Rio Pardo, nas proximidades dos cursos d'água (mata ciliar) e em fragmentos preservados. Sua área total (13,19 % da superfície da bacia), no entanto, está em desacordo com a legislação florestal brasileira (Brasil, 2012), que define em 20 % a área mínima de cada imóvel rural a ser preservada com vegetação nativa a título de Reserva Legal, além das Áreas de Preservação Permanente ao redor dos cursos d'água, nascentes, áreas de declividade superior a 45° e topos de morros com altura superior a 100 metros e declive superior a 25°. Dos 20 municípios que integram a bacia do Rio Pardo, 16 possuem toda a área urbana ou parte dela dentro da bacia, à exceção de Borebi, Lençóis Paulista, Salto Grande e São Manuel. Algumas delas, sobretudo as da porção sul, estão situadas nos divisores de água da bacia, ou seja, nos topos das colinas que caracterizam o Planalto Ocidental Paulista, pois surgiram ao redor da Estrada de Ferro Sorocabana.

As curvas de tendência sazonal ajustadas e observadas das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo resultantes da Análise de Tendência Sazonal são apresentadas na Figura 4 a seguir. Os gráficos de curvas ajustadas plotam as curvas sazonais de índice de vegetação EVI no primeiro e no último ano da série temporal (2001 e 2016), levando em consideração na análise sazonal toda a série temporal. O gráfico das curvas sazonais observadas, por sua vez, considera apenas os cinco primeiros e os cinco últimos anos da série e apresenta mais ruídos.

Os gráficos da Figura 4 evidenciam o aumento dos valores médios de EVI durante todo o ciclo anual nas classes de mata nativa, laranja, açude, eucalipto, pinus e pastagem. As diferenças entre os índices EVI no início e no final da série temporal são menores nas classes de mata nativa, açudes e pastagens, e maiores nas áreas cultivadas com eucalipto, sendo o aumento de aproximadamente 0,05. Este aumento pronunciado do vigor vegetativo das lavouras de eucalipto pode ter ocorrido em razão do plantio após o início da série temporal, em substituição a culturas anuais ou pastagens, por exemplo, do calendário de corte e desbaste, ou por alterações favoráveis nas características climáticas, que propiciaram maior desenvolvimento vegetativo e densidade de cobertura vegetal do solo. Os cultivos de laranja também apresentaram aumento significativo nos valores EVI, de aproximadamente 0,05 - 0,06, os quais também podem ser explicados pela expansão da área cultivada, pelo aumento do nível de manejo, pela vegetação das entrelinhas do cultivo, pelo crescimento das árvores, entre outros fatores. Enquanto os cultivos de laranja, os açudes, cultivos de pinus, culturas anuais, pastagens e zonas urbanas apresentam os menores índices EVI em setembro, as lavouras de eucalipto têm seus menores valores em outubro, e as matas nativas entre agosto e setembro. Tal comportamento, avaliado pelo parâmetro de forma “fase”, não apresenta variações visualmente significativas no decorrer da série temporal.

Curvas sazonais ajustadas Curvas sazonais observadas

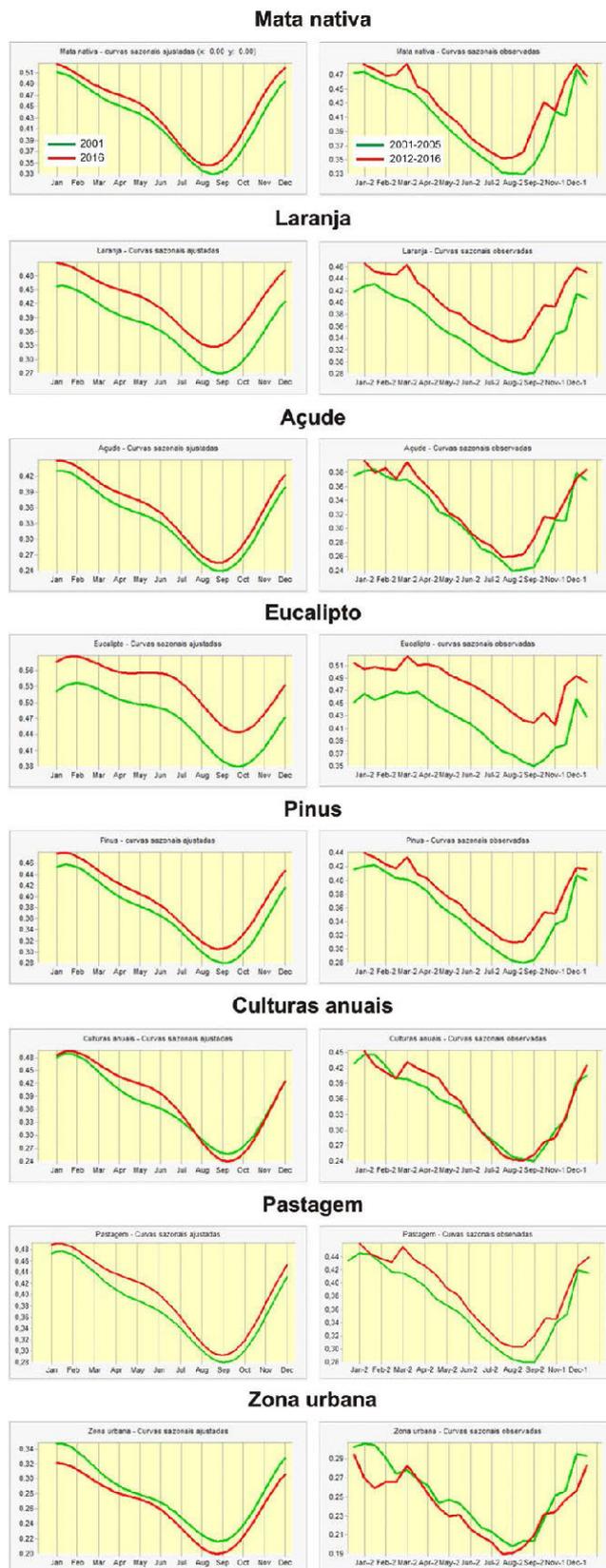


Figura 4. Curvas sazonais ajustadas (esquerda) e observadas (direita) das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

Em oposição à maioria das culturas agrícolas ou florestas nativas, as culturas anuais apresentaram nos últimos anos aumento dos valores EVI de janeiro a julho, mais pronunciado de abril a junho, mas redução em relação aos primeiros anos nos meses de setembro e outubro, além de tendência semelhante de novembro a janeiro, meses de desenvolvimento das culturas de verão. Esta característica necessita ser mais bem avaliada e interpretada, pois o tipo de cultura anual cultivado a cada ano e o seu rendimento variam em razão do seu preço de mercado, dos índices pluviométricos e temperaturas, do plantio ou não de culturas de inverno para produção e/ou cobertura e fertilização do solo, da implantação de culturas anuais durante a série temporal em substituição a áreas de pastagem ou silvcolas, e no caso da cana-de-açúcar, do calendário anual de corte estabelecido pelas usinas de açúcar e álcool. De qualquer maneira, nos meses de setembro e outubro ocorrem o preparo do solo e o plantio das culturas de verão, sendo a densidade de cobertura vegetal verde reduzida em relação aos meses anteriores mesmo em caso de manutenção dos restos culturais em sistema de plantio direto, o que pode explicar a redução nos valores de EVI. Já nos meses de março a maio, o aumento dos valores EVI pode estar associado à ampliação da área cultivada pelo milho safrinha, usualmente plantado após a colheita da soja ou milho em sistema de plantio direto, o que aumenta a densidade de cobertura vegetal e a disponibilidade de água no solo para o desenvolvimento da planta.

Em relação às zonas urbanas, a redução dos índices EVI ao longo de todo o ano de 2001 a 2016 está relacionada ao crescimento urbano, que ocupou áreas antes utilizadas para fins agrícolas.

As curvas sazonais observadas mostram que em todas as culturas houve aumento nos valores EVI no mês de março em relação ao mês de fevereiro, possivelmente em consequência dos elevados índices pluviométricos característicos dos meses anteriores. Observou-se, também, em todas as classes de uso da terra, exceto nas culturas anuais e zona urbana, uma pequena redução no índice no início do mês de novembro, em comparação com outubro, e elevação pronunciada no mês de dezembro. As curvas sazonais observadas se apresentaram, em geral, condizentes com as curvas sazonais ajustadas.

A Figura 5 apresenta os gráficos do parâmetro de forma Amplitude 0 em função do tempo (16 anos) de dados EVI da série temporal, assim como as linhas de tendência mediana Theil-Sen para cada classe de uso da terra da bacia do Rio Pardo.

O parâmetro Amplitude 0 representa valores médios anuais de EVI das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo. Com exceção da zona urbana, todos os demais usos da terra apresentaram tendência de aumento dos valores médios anuais de EVI no decorrer da série temporal. As tendências de aumento mais significativas ocorreram nas culturas de eucalipto e laranja, da ordem de 0,05. A linha de valores anuais de EVI aponta para um possível aumento da área cultivada com ambas as culturas a partir do ano 2005. A mesma tendência ocorre para as culturas de pinus e as áreas de pastagem. Observam-se também, em todos os usos da terra, dois picos de índice EVI, nos anos 2009 e 2015, anos de atuação moderada e forte do fenômeno El Niño, respectivamente, e provável aumento dos índices pluviométricos, assim como anos de baixo EVI, a exemplo dos anos 2002, 2004, 2011 e 2014, nos quais pode ter havido estresse hídrico em razão de índices pluviométricos menores e ocorrência de geadas, como no ano 2011.

A tendência de aumento global do índice EVI na bacia hidrográfica estudada pode estar relacionada a mudanças climáticas e ambientais, com reflexo positivo (aumento) nas temperaturas, regime de chuvas e umidade do solo.

Os gráficos dos parâmetros Amplitude 1 (amplitude do ciclo anual) da bacia do Rio Pardo são apresentados na Figura 6 a seguir.

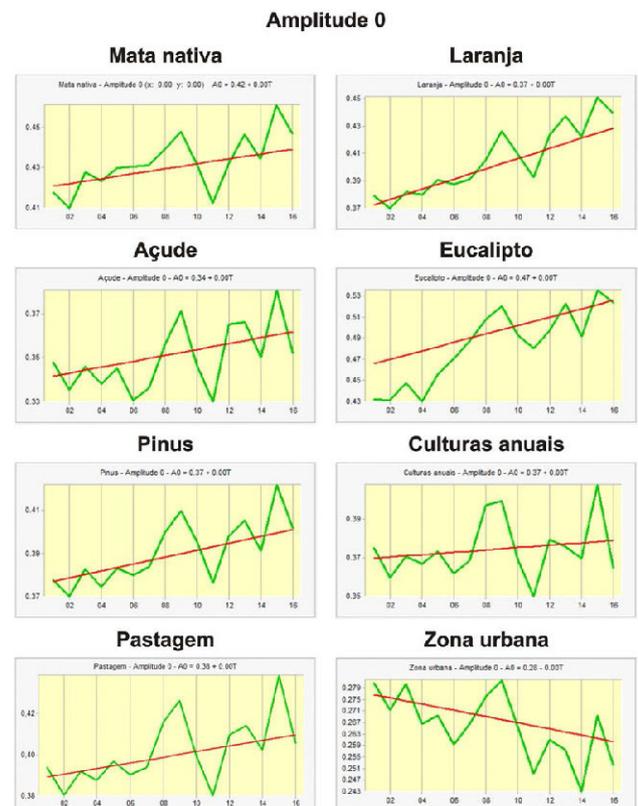


Figura 5. Amplitude 0 e linha de tendência mediana das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

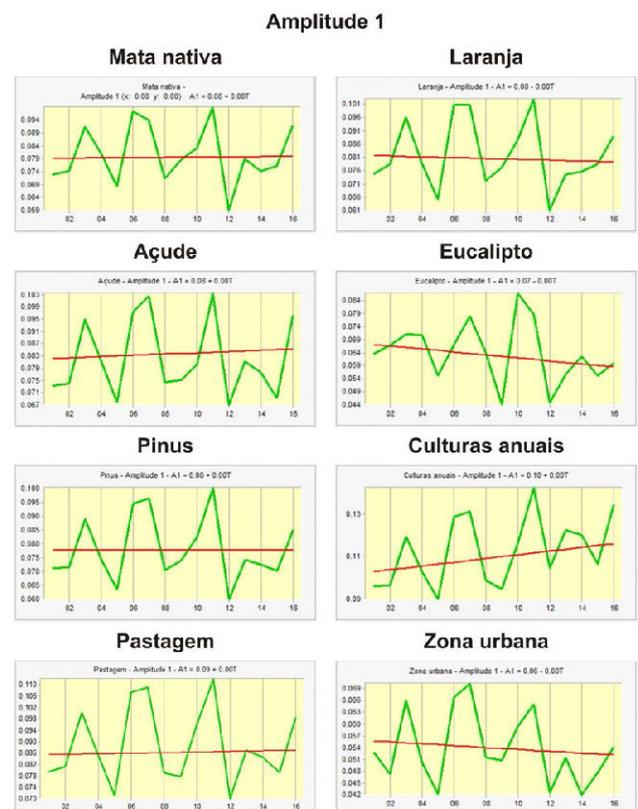


Figura 6. Amplitude 1 e linha de tendência mediana das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

As linhas de tendência mediana indicam tendência nula de EVI no ciclo anual do cultivo de pinus; tendência positiva, porém próxima a zero, para a amplitude de valores EVI de mata nativa, açude e pastagem; tendência negativa, mas com valores próximos à nulidade, para os cultivos de laranja e eucalipto; e tendência positiva para as culturas anuais, com aumento de aproximadamente 0,01 na amplitude anual de EVI. Esta característica era esperada para as culturas anuais, uma vez que a atividade fotossintética reduz e/ou deixa de existir em determinados períodos do ano em datas variáveis a cada ano. Ademais, os cultivos de verão (milho e soja, principalmente), mas também a cana-de-açúcar, são vulneráveis a extremos climáticos tais como geadas, escassez ou excesso de chuvas e umidade do solo. No caso das zonas urbanas, que apresentaram tendência negativa de aproximadamente 0,02 na amplitude anual de EVI, o comportamento se deve à substituição de cultivos agrícolas por áreas urbanas e à consolidação destas, apresentando áreas verdes de tamanho reduzido.

Analisando individualmente os anos da série temporal, os períodos de maior amplitude de valores EVI foram 2011, 2007 e 2006, nos quais houve redução significativa do índice em função de limitações hídricas e climáticas. Nos anos 2005 e 2012, principalmente, houve variações menores de EVI, consequência provável de maior regularidade climática. Todos os usos da terra apresentaram quatro ciclos bem definidos de aumento e redução da amplitude do índice de verde no decorrer da série temporal, e um quinto ciclo que se iniciou no ano 2016.

Os gráficos do parâmetro de forma Fase 1, que indica a posição temporal do pico anual de verde da vegetação, e as linhas de tendência mediana Theil-Sen, são apresentados na Figura 7.

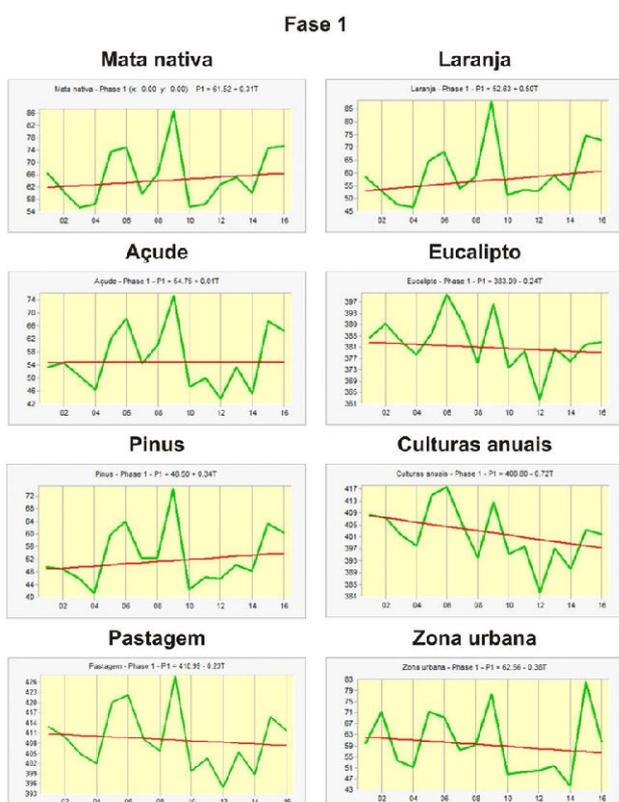


Figura 7. Fase 1 e linha de tendência mediana das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

Os gráficos mostram a tendência de aumento no ângulo de fase durante a série temporal nas classes mata nativa, laranja

e pinus, evidenciando que o pico da onda senoidal de vigor vegetativo está iniciando antes no decorrer do ano. Porém, tal tendência é pequena, variando de 3 a 5 graus, aproximadamente, o que representa 3 a 5 dias de antecipação. As culturas agrícolas eucalipto, culturas anuais, pastagem e as zonas urbanas tiveram tendência de redução do ângulo de fase, o que significa atraso no pico de vigor vegetativo. A diferença mais pronunciada foi detectada nas culturas anuais, de aproximadamente 9°, ou 9 dias, o que pode ter tido influência de inúmeros fatores, como o atraso no plantio devido a condições climáticas adversas, a variedade de culturas plantadas ao longo dos dezesseis anos que possuem diferentes datas de plantio, o número de cultivos por ano, o uso da terra ao longo da série temporal, (pode ter havido substituição das culturas anuais por pastagem ou outro cultivo), o calendário de corte da cana-de-açúcar, entre outros. Os anos 2006, 2009 e 2015 apresentaram valores medianos elevados de Fase 1, com variações entre os diferentes usos da terra, indicando a antecipação do plantio ou de máximo desenvolvimento vegetativo das plantas em decorrência da disponibilidade hídrica.

A Tabela II apresenta as datas e horários estimados de início e término dos períodos “40 % Green-up” e “40 % Green-down” das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo, assim como as diferenças de duração do chamado “período verde” entre os anos 2001 e 2016.

TABELA II
DATAS E HORÁRIOS DE INÍCIO E TÉRMINO DOS PERÍODOS “GREEN-UP” E “GREEN-DOWN” E DURAÇÃO DO “PERÍODO VERDE” (2001-2016)

USO DA TERRA	ESTÁGIO FENOLÓGICO (40 % GREEN-UP/DOWN)	2001	2016	DIF*	DIF PV**
Mata nativa	Green-up	14/Out - 8:00	29/Set - 9:00	-14 dias	+21.98 dias
	Green-down	09/Jun - 1:00	16/Jun - 0:00	+7.98 dias	
Laranja	Green-up	25/Out - 3:00	14/Set - 15:00	-39.5 dias	+73.2 dias
	Green-down	17/Jun - 24:00	20/Jul - 16:00	+33.7 dias	
Açude	Green-up	24/Out - 11:00	13/Out - 21:00	-9.59 dias	+22.39 dias
	Green-down	16/Jun - 14:00	28/Jun - 9:00	+12.8 dias	
Eucalipto	Green-up	09/Dez - 9:00	12/Nov - 23:00	-27.4 dias	+33.6 dias
	Green-down	10/Ago - 19:00	15/Ago - 24:00	+6.2 dias	
Pinus	Green-up	31/Out - 10:00	12/Out - 20:00	-17.6 dias	+32.1 dias
	Green-down	19/Jun - 5:00	02/Jul - 17:00	+14.5 dias	
Culturas anuais	Green-up	05/Nov - 11:00	06/Nov - 18:00	+2.29 dias	+13.71 dias
	Green-down	16/Jun - 9:00	01/Jul - 7:00	+16 dias	
Pastagem	Green-up	30/Out - 19:00	20/Out - 23:00	-8.86 dias	+26.46 dias
	Green-down	16/Jun - 16:00	03/Jul - 6:00	+17.6 dias	
Zona urbana	Green-up	23/Out - 0:00	02/Nov - 17:00	+11.7 dias	-29.8 dias
	Green-down	01/Jun - 9:00	13/Mai - 7:00	-18.1 dias	

*Dif: Diferença de início do período 40 % Green-up e 40 % Green-down entre o ano final (2016) e o ano inicial (2001) da série temporal.

**Dif PV: Diferença de duração do período verde entre o ano final (2016) e o ano inicial (2001) da série temporal.

A comparação entre as datas de 40 % do período de verdejamento e de 40 % do período de redução do teor de clorofila e do vigor vegetativo da cobertura vegetal da bacia do Rio Pardo no início e no final da série temporal evidenciou que todas as culturas e florestas, com exceção das culturas anuais e da zona urbana, tiveram a data de 40 % de green-up antecipado e a data de 40 % de green-down atrasado. Destaca-se, entre os usos da terra, o cultivo de laranja, que teve aumento superior a 73 dias no período verde, possivelmente em decorrência do estabelecimento de parte das áreas cultivadas e/ou crescimento das árvores plantadas durante a série temporal. Também merecem destaque os cultivos de eucalipto e pinus, que tiveram aumento superior a um mês no período verde, devendo ser levado em

consideração seus calendários de plantio e exploração, bem como seu crescimento e aumento da cobertura do solo e fechamento do dossel no período analisado. Entre ambos os cultivos, há diferença de aproximadamente um mês entre o início do período green-up e green-down, sendo que o pinus ganha e perde biomassa verde antes do eucalipto. No caso da mata nativa, a tendência é de redução do período de perda de parte das folhas, que caracteriza a Floresta Estacional Semidecidual presente em parte da bacia do Rio Pardo. As pastagens também tiveram aumento no período verde em função da melhoria do manejo e das práticas de conservação do solo.

O período verde das culturas anuais tem a tendência de iniciar com atraso de dois dias (considerando que 2016 foi ano bissexto), no início de novembro, quando a parte vegetativa das culturas de verão começa a se desenvolver, mas o período da perda de clorofila tende a atrasar de junho ao início de julho. Para o estudo da tendência sazonal das culturas anuais, recomenda-se utilizar quatro harmônicas na análise de regressão, pois tais culturas apresentam dois períodos anuais de máxima e mínima produção de biomassa (duas safras anuais), sendo que no intervalo entre a colheita dos cultivos de verão e o estabelecimento das safras de inverno a redução da cobertura do solo e a perda de clorofila das plantas são menores.

Os parâmetros de forma e os períodos green-up/down analisados neste trabalho em função do uso da terra de julho/agosto de 2016 levaram em consideração, em sua determinação, valores medianos de EVI de toda área ocupada por cada classe de uso, que em alguns casos é superior a mil quilômetros quadrados, distribuindo-se sobre a bacia hidrográfica em diferentes tipos de solo, tipos climáticos e formas de manejo. Tais parâmetros podem variar para a mesma cultura agrícola, a exemplo do eucalipto (Figura 8), no qual as curvas sazonais ajustadas de uma área de plantio situada na porção leste da bacia são similares às apresentadas pela cultura na Figura 4, enquanto outra área de cultivo de eucalipto situada em sua porção norte apresenta curvas sazonais ajustadas em 2001 e 2016 bastante diferentes dos valores medianos da classe de uso da terra eucalipto, inclusive com tendência de redução dos valores EVI no período de fevereiro a novembro.

A significância dos parâmetros de forma mediana da análise de tendência sazonal e operador Theil-Sen slope foi avaliada pelos parâmetros de significância p e Z.

A Figura 9 apresenta as áreas de tendência significativa positiva e negativa nos níveis de significância de 95 %, 99 % e 99,9 %. O nível de significância de 95 % também inclui as áreas com tendência a 99 % e 99,9 % de significância, e o nível de significância de 99 % inclui as áreas com tendência a 99,9 % de significância.

A Tabela III apresenta as áreas com tendência significativa positiva e negativa para cada nível de significância na bacia do Rio Pardo.

A Figura 9 e a Tabela III evidenciam que quanto menor o nível de significância e, conseqüentemente, a confiabilidade dos dados, maior será a área com tendência significativa de aumento ou redução no índice de verde da vegetação. Como a área com tendência significativa a 99,9 % de significância é de 1.383,12 km², correspondente a 28,8 % da área total, considerou-se que este nível de significância garante mais confiabilidade à tendência, devendo a área representada por tal probabilidade ser tomada como prioritária para estudos posteriores, sobretudo quanto aos impactos das mudanças climáticas na atividade fotossintética e fenologia da vegetação.

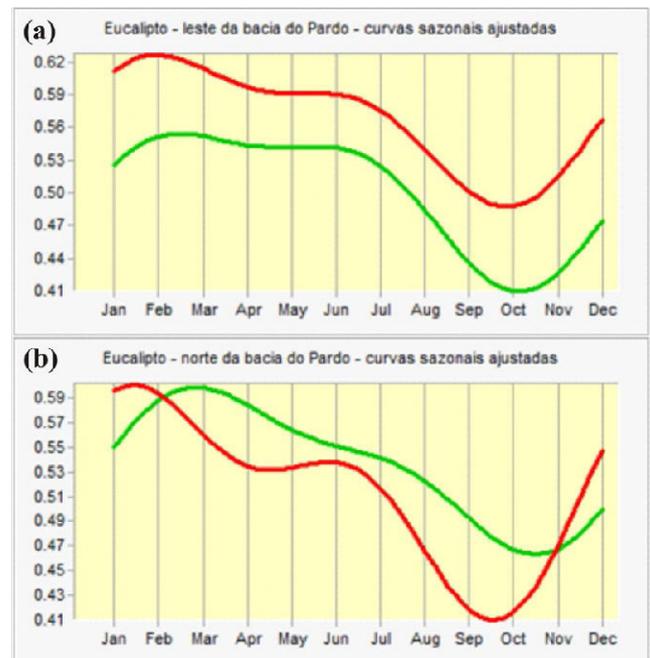


Figura 8. Curvas sazonais ajustadas de áreas de plantio de eucalipto (série temporal: 2001-2016): a) leste; b) norte da bacia do Rio Pardo (curva verde: 2001; curva vermelha: 2016).

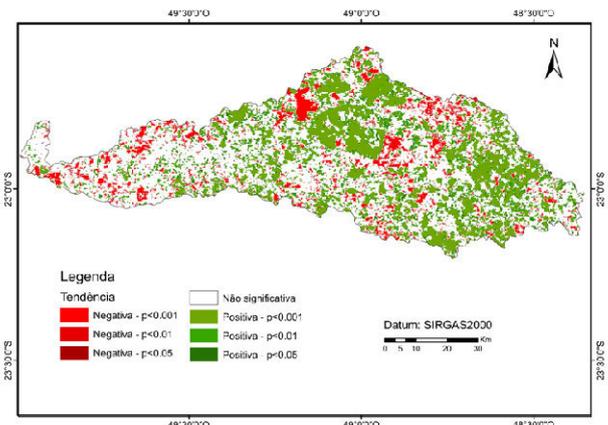


Figura 9. Bacia do Rio Pardo: áreas de tendência significativa (positiva e negativa) a 95 % (p<0,05), 99 % (p<0,01) e 99,9 % (p<0,001) de significância.

TABELA III
TENDÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA E NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA: ÁREA EM KM² E PORCENTAGEM DA ÁREA TOTAL

TENDÊNCIA E SIGNIFICÂNCIA	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
Tendência negativa - p<0,001	286,06	5,96
Tendência negativa - p<0,01	441,63	9,2
Tendência negativa - p<0,05	652,16	13,58
Tendência positiva - p<0,05	1.645,03	34,26
Tendência positiva - p<0,01	1.356,53	28,25
Tendência positiva - p<0,001	1.097,06	22,85
Tendência não significativa em nenhum nível de significância	2.504,28	52,16
TOTAL	4.801,47	100

A Tabela IV apresenta a área ocupada pelas classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo com significância positiva, negativa e com tendência não significativa (p<0,001).

TABELA IV

ÁREA DAS CLASSES DE USO DA TERRA COM SIGNIFICÂNCIA POSITIVA, NEGATIVA E SEM SIGNIFICÂNCIA (P<0,001)

USO DA TERRA	TENDÊNCIA (P<0,001)	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
Mata nativa	não significativa	449,64	9,37
	negativa	24,60	0,51
	positiva	159,17	3,32
Laranja	não significativa	239,34	4,99
	negativa	13,75	0,29
	positiva	248,83	5,18
Açude	não significativa	15,23	0,32
	negativa	2,24	0,05
	positiva	4,88	0,10
Eucalipto	não significativa	311,60	6,49
	negativa	14,26	0,30
	positiva	347,45	7,24
Pinus	não significativa	106,25	2,21
	negativa	17,29	0,36
	positiva	53,41	1,11
Culturas anuais	não significativa	1.334,68	27,80
	negativa	132,80	2,77
	positiva	133,29	2,78
Pastagem	não significativa	921,17	19,19
	negativa	56,08	1,17
	positiva	146,86	3,06
Zona urbana	não significativa	40,45	0,84
	negativa	25,03	0,52
	positiva	3,18	0,07
TOTAL		4.801,47	100

Os dados da Tabela IV mostram que, no total, 3.418,35 km², ou mais de 71 % da superfície da bacia do Rio Pardo não apresentam tendência significativa de EVI, com destaque para as culturas anuais e para as pastagens, cuja área total sem tendência perfaz 47,7 % da área total da bacia. Para compreender melhor a tendência sazonal e interanual das culturas anuais, no entanto, é necessário fazer um levantamento histórico dos cultivos implantados em cada área agrícola ao longo da série temporal, assim como suas datas de plantio. Merecem também destaque as florestas (mata nativa, eucalipto e pinus) e as lavouras de laranja, que por apresentarem elevada densidade de cobertura do solo e fechamento do dossel em relação aos outros usos da terra e serem culturas perenes ou naturais (mata nativa), apresentam menor suscetibilidade às flutuações climáticas.

As culturas agrícolas que apresentaram maior área com tendência significativa positiva, porém, foram eucalipto, laranja, mata nativa e pastagem, na ordem decrescente, seguidas das culturas anuais. No entanto, apenas as culturas de eucalipto e laranja apresentaram área com tendência positiva superior às áreas com tendência não significativa. Nas culturas anuais, por exemplo, a área com tendência positiva equivale a 10 % da área sem tendência. As razões para a tendência a aumento do teor de verde da vegetação já foram aqui discutidas, e podem estar relacionadas às mudanças climáticas globais.

Em relação às tendências significativas negativas, apenas as culturas anuais e as pastagens apresentam áreas superiores a 2 % e 1 %, respectivamente, da bacia do Rio Pardo. Para a compreensão deste comportamento, faz-se necessário analisar o uso da terra em todos os anos da série temporal e, no caso das culturas anuais, os dois ciclos anuais.

A Figura 10 apresenta o mapa do coeficiente Z de significância Mann-Kendall do operador de tendência interanual TS Slope da série temporal de EVI da bacia do Rio Pardo.

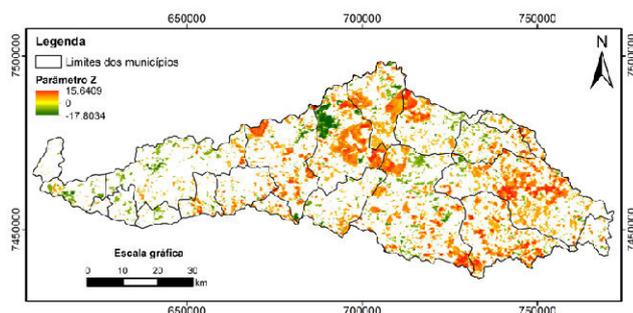


Figura 10. Coeficiente Z de significância Mann-Kendall do operador TS Slope da série temporal de EVI (2001-2016) da bacia do Rio Pardo.

Como o coeficiente Z é calculado com média padronizada de 0 e desvio padrão 1, admite-se que os valores Z situados entre -3 e +3 desvios padrões integram a distribuição normal dos dados. Neste mapa, foram excluídos os pixels de tendência não significativa a 99,9 % de significância e, como resultado, todos os pixels que apresentaram desvio padrão no intervalo da distribuição normal foram excluídos do mapa. Assim, quanto mais distantes de -3 (valores menores) e de +3 (valores maiores), maior é a probabilidade de o dado constituir um outlier, ou seja, um dado discrepante, apresentando tendência. Na bacia do Rio Pardo, em linhas gerais, apresentaram coeficiente Z positivo com tendência significativa os cultivos de laranja, eucalipto e pinus, além dos açudes e das matas nativas, e coeficiente Z negativo com tendência significativa as culturas anuais e zonas urbanas.

A Figura 11 apresenta os valores medianos do operador TS Slope da imagem do ângulo de Fase 1, que indica a posição temporal do pico de verdor anual, ou seja, o ponto de início da onda senoidal, de áreas com tendência significativa a 99,9 % de significância.

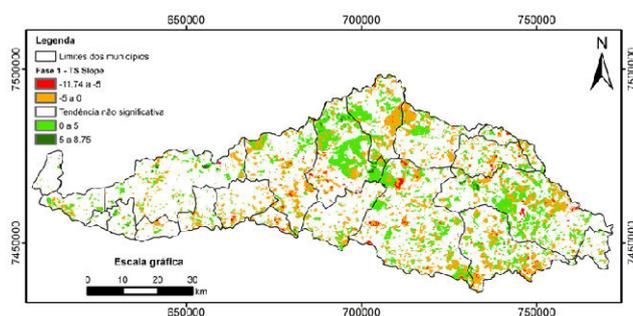


Figura 11. Tendência Theil-Sen de posição temporal do pico anual de verde (fase 1) da série temporal de EVI (2001-2016) da bacia do Rio Pardo.

O mapa indica a tendência de início do pico de verdor da vegetação. Valores positivos evidenciam tendência de antecipação do pico de atividade fotossintética da vegetação, e valores negativos, tendência de retardamento desse período fenológico. Cada ângulo corresponde a, aproximadamente, um dia. Embora todas as classes de uso da terra tenham apresentado tendência de alteração positiva e negativa no ângulo de fase, as culturas anuais apresentam tendência negativa, e culturas como eucalipto, laranja e pinus, tendência positiva. Estes dados podem subsidiar os produtores rurais e órgãos de extensão rural no planejamento agrícola das propriedades.

A Análise de Tendência Sazonal pode ser aplicada também na escala municipal para subsidiar o poder público com informações para a gestão rural e ambiental. Os gráficos da Figura 12 a seguir comparam as curvas sazonais observadas nos cin-

co primeiros anos (2001-2005) e nos últimos cinco anos (2012-2016) da série temporal em dois municípios da bacia do Rio Pardo dominados por diferentes usos da terra.



Figura 12. Curvas sazonais observadas (série temporal: 2001-2016): a) município de Salto Grande - SP; b) município de Borebi - SP (curva verde: 2001-2005; curva vermelha: 2012-2016).

Embora nenhum dos municípios tenha sido analisado na totalidade de sua área, já que partes deles não integram a bacia do Rio Pardo, ambos apresentaram comportamentos distintos de tendência do índice de vegetação EVI nos anos iniciais e finais da série temporal. O município de Salto Grande, no qual predominam as culturas anuais, com destaque para a soja (verão), o milho (verão e inverno), o trigo (inverno) e a cana-de-açúcar (todo o ano), além de mata nativa e pastagem, apresentou curvas sazonais equivalentes a dois ciclos anuais de cultivo, um deles iniciando-se em março no período 2001-2005 e em fevereiro no período 2011-2016, com término em agosto (culturas de inverno), e o outro iniciando em novembro e terminando em março (período 2001-2005) ou fevereiro (período 2012-2016). Observam-se também o aumento nos valores de EVI nos anos finais da série temporal no período de março a junho e em dezembro, períodos de máxima atividade fotossintética da vegetação nos cultivos de inverno e verão, respectivamente. Já o município de Borebi, amplamente dominado pelo cultivo de eucalipto e, secundariamente, de pinus, apresenta curvas sazonais observadas típicas dos respectivos cultivos, com aumento do índice EVI no período chuvoso (outubro a março) e redução no período seco (abril a setembro). Comparado aos anos iniciais da série, os anos finais apresentam apenas aumento nos valores medianos de EVI nos meses de outubro, fevereiro e março, e pequena redução no mês de janeiro.

IV. CONCLUSÕES

A análise de tendência sazonal e interanual do índice de verde da vegetação da bacia hidrográfica do Rio Pardo por meio do índice de vegetação EVI pela técnica STA possibilitou uma primeira aproximação da compreensão da fenologia vegetal das principais culturas agrícolas e florestas naturais e cultivadas,

com destaque para as estações verdes e marrons (browning season, estação de perda da clorofila das plantas) e as suas tendências nos primeiros e últimos anos da série temporal, evidenciadas pelos parâmetros de forma mediana.

Em geral, os usos da terra agrícolas e naturais apresentaram tendência de aumento dos valores EVI ao longo de todos os meses, estações e durante a série temporal. Tal comportamento pode estar relacionado às mudanças climáticas, que propiciaram o aumento da precipitação, das temperaturas e a melhoria da disponibilidade hídrica no solo, e a fatores como manejo do solo e das pragas, época de plantio e colheita, evolução dos sistemas de cultivo, entre outros. Em relação às mudanças climáticas, os aumentos de temperatura já registrados no estado de São Paulo nas últimas décadas propiciaram o aumento do desenvolvimento vegetal, mas os cenários de maior aumento da temperatura média poderão levar a área de estudo à redução da produtividade agrícola e a restrições ao cultivo de vários produtos, conforme destacado por Oliveira & Alves (2011). Eastman et al. (2013) constataram aumento nos valores médios anuais de NDVI e da produtividade vegetal nas florestas de folhas largas e em coníferas, o aumento da amplitude anual de NDVI nas pastagens e florestas semidecíduais tropicais e temperadas, sendo o fator restritivo no período seco a umidade do solo, e o aumento do NDVI no período úmido nos biomas frios da tundra e da taiga. Os autores sugeriram que tais alterações são consequências das mudanças climáticas globais (aumento das temperaturas médias, principalmente).

No entanto, para compreender melhor as mudanças climáticas e seus impactos na agricultura e no uso da terra, recomenda-se realizar a análise de tendência sazonal e interanual dos elementos climáticos, como temperatura, precipitação e umidade do solo e do ar, pelo período mínimo de trinta anos. Destaca-se ainda a necessidade de ampliar a série temporal de imagens EVI, para possibilitar a compreensão de seu comportamento em períodos anteriores a 2001.

Com relação às culturas anuais, a variedade de culturas agrupadas em uma única classe, seus calendários de cultivo e colheita, a variedade de culturas plantadas em uma mesma área ao longo da série temporal, o manejo adotado, entre outros fatores, prejudicaram a qualidade dos resultados da análise de tendência sazonal, sendo o comportamento das curvas observadas no município de Salto Grande, tal como indicado na Figura 12.a, a característica mais provável das culturas anuais em geral no período analisado. Nesse sentido, recomenda-se a análise do uso da terra nos campos de culturas anuais ao longo de toda a série temporal e a separação das mesmas em diferentes classes conforme os tipos e combinações de culturas existentes, assim como a separação das lavouras de cana-de-açúcar para a análise de tendência sazonal, pois seu calendário de cultivo e colheita difere do das demais culturas anuais. Sugere-se ainda a adoção de quatro harmônicas para o cálculo da regressão harmônica das culturas anuais, pois apesar de constituir um modelo mais complexo, pode modelar de forma mais eficaz os dois ciclos anuais apresentados pelas referidas culturas.

A análise de significância Mann-Kendall da série temporal permitiu diferenciar as áreas de tendência significativa das áreas sem tendência de mudanças no índice EVI de acordo com diferentes níveis de confiança, assim como avaliar o grau de significância da tendência por meio do coeficiente Z. No entanto, recomenda-se nos próximos trabalhos a análise de significância pela abordagem Mann-Kendall Contextual (CMK), apresentada por Neeti & Eastman (2011) e disponível a

partir da versão Selva do SIG Idrisi, que leva em consideração a autocorrelação espacial entre pixels vizinhos e permite a redução na detecção de tendências espúrias e a ampliação da confiabilidade da tendência quando esta estiver presente.

No presente trabalho, foi dado enfoque à análise das tendências sazonais e interanuais das classes identificadas no mapa de uso da terra de julho/agosto de 2016. Recomenda-se, portanto, em trabalhos futuros, a separação e análise das classes de tendência sazonal de acordo com as combinações de va-

lores das Amplitudes e Fases sobre as composições coloridas análogas geradas pela ferramenta STA para auxílio à interpretação dos resultados, tal como realizado por Eastman et al. (2013) e Teferi, Uhlenbrook, & Belket (2015). Tal análise permitirá a identificação das áreas com aumento ou redução dos valores médios anuais de EVI, da amplitude do ciclo anual, do ângulo de fase, e das combinações entre esses parâmetros.

REFERÊNCIAS

- Araújo Jr., A. A., Campos, S., Barros, Z. X., & Cardoso, L. G. (2002). Diagnóstico físico conservacionista de 10 microbacias do Rio Capivara - Botucatu (SP), visando o uso racional do solo. *Irriga*, 7(2), 107-121. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2002v7n2>
- Brasil. Lei n. 12.727, de 17 de outubro de 2012. (2012). Brasília, DF: Diário Oficial da União, ano CXLIX, n. 202, p. 1-3, 18 out. 2012. Seção 1. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12727.htm
- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. (2016). El Niño. São José dos Campos: CPTEC/INPE. <http://enos.cptec.inpe.br/elnino/pt>
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema. (2007). Plano de bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI-17). São Paulo: CBH-MP. www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7037/planobacia-mp-caderno.pdf
- Demarchi, J. C. & Piroli, E. L. Análise dos efeitos de geadas na cobertura vegetal do município de Cândido Mota - SP, Brasil, por meio de índices de vegetação. (2015). *Boletim Goiano de Geografia*, 35(3), 554-573. <https://doi.org/10.5216/bgg.v35i3.38843>
- Eastman, J. R. (2009a). Idrisi Taiga Manual - version 16. Worcester: Clark Labs.
- Eastman, J. R. (2009b). Idrisi Taiga - GIS and Image Processing Software - version 16. Worcester: Clark Labs (software).
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Ghimire, B., Zhu, H., Chen, H., Neeti, N., Cai, Y., ..., Crema, S. (2009). Seasonal trend analysis of image time series. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2721-2726. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160902755338>
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Machado, E. A., Rogan, J. & Anyamba, A. (2013). Global Trends in Seasonality of Normal Difference Vegetation Index (NDVI), 1982-2011. *Remote Sensing*, 5(10), 4799-4818. <http://doi.org/10.3390/rs5104799>
- Environmental Systems Research Institute. (2010). ArcGIS / ArcMap. Professional GIS for the desktop, release 10. Redlands: ESRI (software).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). Cidades@: dados do Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2004). Mapa de vegetação do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE. (escala: 1:500.000).
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., ..., Barnsley, M. J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. (1998). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228-1249. <http://doi.org/10.1109/36.701075>
- Miranda, M. J., Pinto, H. S., Zullo Jr., J., Fagundes, R. M., Fonseca, D. B., Calve, L., & Pellegrino, G. Q. (2005). Clima dos municípios paulistas. Campinas: CEPAGRI/UNICAMP. <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>
- Mishra, N. B. & Chaudhuri, G. (2015). Spatio-temporal analysis of trends in seasonal vegetation productivity across Uttarakhnad, Indian Himalayas, 2000-2014. *Applied Geography*, 56, 29-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.10.007>
- Neeti, N. & Eastman, J. R. (2011). A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS*, 15(5), 599-611.
- Oliveira, J. B., Camargo, M. N., Rossi, M., & Calderado Filho, B. (1999). Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Campinas: IAC (escala: 1:500.000).
- Oliveira, R. D. F. & Alves, J. W. S. (2011). Mudanças climáticas globais no Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente.
- Piroli, E. L. (2013). Geoprocessamento aplicado ao estudo do uso da terra das áreas de preservação permanente dos corpos d'água da bacia hidrográfica do Rio Pardo (Tese de livre-docência, Universidade Estadual Paulista). <http://www.ourinhos.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo/cediaggeo/materiais/geoprocessamento/dissertacoes-e-teses/>
- Ross, J. L. S. & Moroz, I. C. (1997). Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: FFLCH-USP. (escala: 1:500.000).
- São Paulo. (2009). Inventário florestal da vegetação nativa do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente; Instituto Florestal; Biota/Fapesp; FundAg. <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/sifesp/2013/12/mapainventario.pdf>
- Teferi, E., Uhlenbrook, S., & Bewket, W. (2015). Inter-annual and seasonal trends of vegetation condition in the Upper Blue Nile (Abay) Basin: dual-scale time series analysis. *Earth System Dynamics*, 6, 617-636. <http://doi.org/10.5194/esd-6-617-2015>.

Uso de SIG para análises de impactos da expansão urbana sobre morfologias do relevo nas zonas leste e sul do município de Marília (São Paulo, Brasil)

Santos, Vanessa Ramos dos¹, Tommaselli, José Tadeu Garcia², Piroli, Edson Luís³.

1 Programa de Pós-Graduação em Geografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)/Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Câmpus de Presidente Prudente
Presidente Prudente/São Paulo/Brasil
vanessa@ourinhos.unesp.br

2 Programa de Pós-Graduação em Geografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)/Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Câmpus de Presidente Prudente
Presidente Prudente/São Paulo/Brasil
tadeutommaselli@gmail.com

3 Docente do curso de Geografia/Câmpus Experimental de Ourinhos/Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Câmpus Experimental de Ourinhos
Ourinhos/São Paulo/Brasil
piroli@ourinhos.unesp.br

RESUMO

A necessidade tida pela sociedade em planejar e organizar o espaço em que está contida e se relaciona, busca apoio em diferentes técnicas e áreas do conhecimento. O uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), tornou-se importante aliado no mapeamento e espacialização das informações, e um mecanismo viável para as análises sobre espaço e base para tomadas de decisões. O uso dos SIG para análises de impactos da expansão urbana sobre morfologias do relevo pode facilitar a vida dos planejadores pois estes permitem a manipulação e realização de análises complexas ao integrar grandes volumes de dados. O objetivo desse trabalho foi analisar informações sobre o meio físico e sobre a expansão urbana nas zonas leste e sul do município de Marília (São Paulo, Brasil). As informações consideradas foram sobre as características do contexto geológico, dos solos, da geomorfologia, da suscetibilidade a erosão, do zoneamento urbano e das informações sobre inclusão e exclusão social nas zonas estudadas. Essas informações foram trabalhadas em ambiente SIG, no qual foram realizados cruzamentos entre os mapas. O produto desses cruzamentos refere-se aos mapas de inclusão/exclusão social em classes de declives nas zonas analisadas. Os mapas e dados obtidos mostram que, embora num mesmo contexto de fragilidade ambiental, a expansão urbana na zona leste apresenta baixa vulnerabilidade social, enquanto que é alta na zona sul. Conclui-se, portanto, que para as análises dos impactos da expansão urbana sobre morfologias do relevo, o uso de SIG permitiu análises e a interpretações dos resultados com precisão e segurança.

Palavras chave: **Impactos, expansão urbana, morfologias do relevo, geoprocessamento, município de Marília (São Paulo, Brasil).**

ABSTRACT

The society necessity to plan and organize the space in which it is contained and related, is supported in different techniques and knowledge areas. The use of Geographic Information Systems (GIS) has become an important allied in the mapping and information spatialization, and a viable mechanism for space and base analysis for making decision. The GIS are used to analyze the impacts of urban expansion on terrain relief morphologies, it can be able to be easier for planners because they allow the manipulation and accomplishment of complex analyzes by integrating large data volumes. The objective of this

work was analyzed informations about the physical environment and urban expansion in the eastern and southern zones of the Marília municipality (São Paulo, Brazil). The informations considered were the characteristics of geological context, soils, geomorphology, susceptibility to erosion, urban zoning and information on social inclusion and exclusion in the studied areas. These informations were worked in a GIS, in which crossings between the maps were accomplished. The product of these crossings refers to social inclusion/exclusion maps in slope classes in the analyzed areas. The maps and data obtained show that, although in the same context of environmental fragility, urban expansion in the eastern zone presents low social vulnerability, while it is high in the south. It was concluded, therefore, that for the analysis of the impacts of urban expansion on relief morphologies, the use of GIS allowed for analysis and interpretation of the results with precision and security.

Keywords: *Impacts, urban expansion, relief morphologies, geoprocessing, Marília municipality (São Paulo, Brazil).*

I. INTRODUÇÃO

O presente estudo é fundamentado na relação entre a expansão urbana e o meio físico. Tal relação, muitas vezes desconexa e conflitante, tende a gerar a degradação do ambiente urbano, (re)configurando esse espaço às múltiplas relações entre a população e o quadro natural, ao longo do tempo (Geológico e cronológico).

Essas múltiplas relações evidenciam, na maioria dos casos, degradações ao meio físico no espaço urbano. Entre as degradações ambientais urbanas mais evidentes tem-se a retirada de matas, a ocupação das áreas de preservação permanente, a poluição e erosão do solo, contaminação dos aquíferos e assoreamento dos rios e córregos.

Essas situações têm como suporte as morfologias do relevo para se desenvolverem, sendo este componente do meio físico a base para as diversas alterações.

No que tange ao entendimento do relevo como suporte para o espaço urbano, sabe-se que as alterações sobre as morfologias do relevo promovem o surgimento de 'novos' cenários enormemente diversificados de ambientes. Essas alterações modificam o dinamismo harmonioso, até então presente nos ambientes naturais.

Nesse contexto, nos ambientes urbanos

(...) os solos naturalmente já existentes encontram-se revolvidos, danificados e impermeabilizados pela pavimentação das ruas e pelas edificações de casas, indústrias e por toda gama de equipamentos e serviços urbanos dos quais a população necessita (BRANCO; CAVINATTO, 1999 apud SANTOS, 2017).

Entretanto, essas mudanças não atingem igualmente todo espaço urbano, e sim atingem muito mais áreas ocupadas por populações de baixa renda, que carecem da infraestrutura sólida e básica necessária para as habitações. Por outro lado, as populações com alto poder aquisitivo se apropriam dos espaços, implantando a infraestrutura necessária para seu desenvolvimento.

Tem-se, portanto, diferentes formas de ocupação e apropriação do meio físico urbano desencadeando em variados impactos ao espaço e ao homem.

Nesse contexto, o uso de SIG, atrelado às demais geotecnologias, torna-se suporte para implementação das análises sobre os impactos nos ambientes urbanos.

Essas ferramentas dinamizam a produção de informações espaciais, já que possibilitam a manipulação e cruzamento de

grandes volumes de dados, o que melhora o manejo e a interpretação das informações trabalhadas.

Com base nessa temática, o objetivo do presente estudo foi analisar informações sobre o meio físico e sobre a expansão urbana nas zonas leste e sul do município de Marília (São Paulo, Brasil). O trabalho consistiu na fundamentação teórico-metodológica sobre relevo em áreas urbanas e sobre uso de SIG em análises das informações e planejamento de áreas urbanas.

As informações consideradas foram relativas às características do contexto geológico, dos solos, da geomorfologia, da suscetibilidade à erosão, do zoneamento urbano e das informações sobre inclusão e exclusão social nas zonas estudadas. Essas informações foram trabalhadas em ambiente SIG, no qual foram aplicadas técnicas de álgebra entre os mapas.

Esse trabalho se originou de pesquisa de mestrado desenvolvida junto a Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus de Presidente Prudente, intitulada "Análise temporal de impactos sobre morfologias do relevo nas zonas leste e sul da área urbana de Marília, São Paulo, Brasil".

II. MÉTODO

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

O presente estudo se propõe a abordar o uso de SIG para análises de impactos da expansão urbana sobre morfologias do relevo.

De acordo com Ross (2012), toda ação humana sobre o ambiente natural gera impactos em diferentes graus de agressão, provocando, muitas vezes, processos irreversíveis. No caso da expansão urbana sobre as morfologias do relevo, os impactos causados estão associados a:

(...) expansão descontrolada, traçado inadequado do sistema viário (sentido preferencial da água), precariedade do sistema de captação e drenagem de águas pluviais, assoreamento de corpos d'água, destruição de loteamentos, residências e de equipamentos e obras urbanas de um modo geral (SALOMÃO; IWASA, 1995, apud SANTOS, 2017).

Entretanto tais impactos não atingem igualmente todo espaço urbano, atingem muito mais os ambientes ocupados pelas classes sociais menos favorecidas do que pelas classes mais abastadas.

Tal situação decorre das formas de produção do espaço urbano, associadas à dinâmicas e estruturação relacionadas à apropriação e ocupação das morfologias do relevo.

Os processos relacionados à apropriação das morfologias do relevo estão associados às populações de alta renda. Já os

processos tidos como ocupação de ambientes urbanos estão relacionados às populações de menor poder aquisitivo.

Ross (1994), retrata que os impactos causados pelas diferentes formas de produção do espaço urbano são considerados como fragilidade ambiental e vulnerabilidade social. O autor destaca que a fragilidade ambiental é determinada pela estrutura física dos ambientes naturais antropizados e a vulnerabilidade está relacionada com o grupo social ocupante em determinada área (SANTOS, 2017).

Nesse cenário emerge a necessidade de planejamento e, com ele, do uso de ferramentas que auxiliem na minimização dos impactos negativos à população, à gestão pública e ao meio natural.

O uso das geotecnologias “tornou-se importante aliado no mapeamento e espacialização das informações, tornando-se um mecanismo viável para as análises sobre espaço e base para tomadas de decisões” (SANTOS, 2017).

Neste contexto, o uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permite aos planejadores e gestores a integração de vários atributos, a manipulação de grandes volumes de dados e a realização de análises complexas sobre os ambientes urbanos.

ÁREA DE ESTUDO

A área estudada compreendeu as zonas sul e leste do sítio urbano do município de Marília, localizado na região centro-oeste do estado de São Paulo.

A área urbana da cidade localiza-se sobre o Planalto Residual de Marília, num contexto de relevo tabuliforme, parte ocidental da serra de Agudos, no divisor de águas das bacias hidrográficas dos rios Aguapeí e Peixe. Essa área está situada a uma altitude média de 650 metros, sendo recortada por escarpas de declive acentuado, que atingem mais de 100 metros de desnível (SANTOS, 2017). A Figura 1 mostra a localização do município de Marília (São Paulo, Brasil).

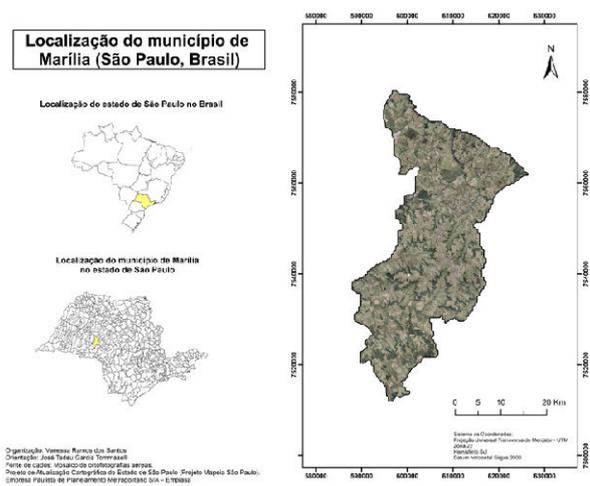


Figura 1. Localização do município de Marília (São Paulo, Brasil).

Como exemplo e área de estudo, em Marília, áreas de apropriação das características naturais, são percebidas na zona leste urbana do município representadas por loteamentos fechados e de alto poder aquisitivo; enquanto que na zona sul, verificam-se áreas de ocupação até o limite das escarpas, com graves problemas de degradação natural e social do espaço, caracterizadas por habitações em situação precária e, em alguns casos, em condição de risco de desabamento. As Figuras 2 e 3 mostram as zonas leste e sul, respectivamente, áreas pesquisadas apresentadas nesse estudo.

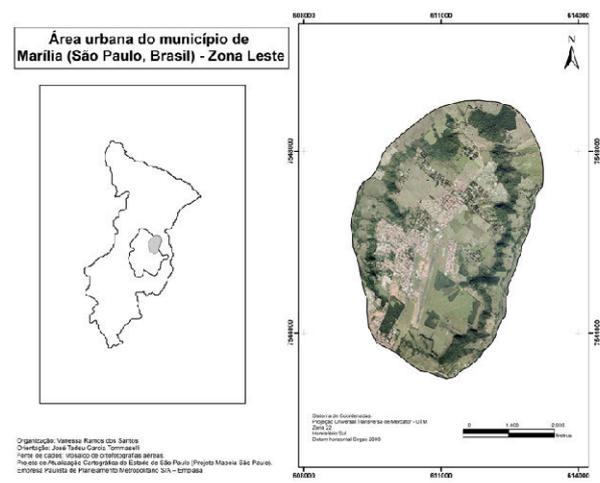


Figura 2. Localização da zona leste da área urbana de Marília (São Paulo, Brasil).

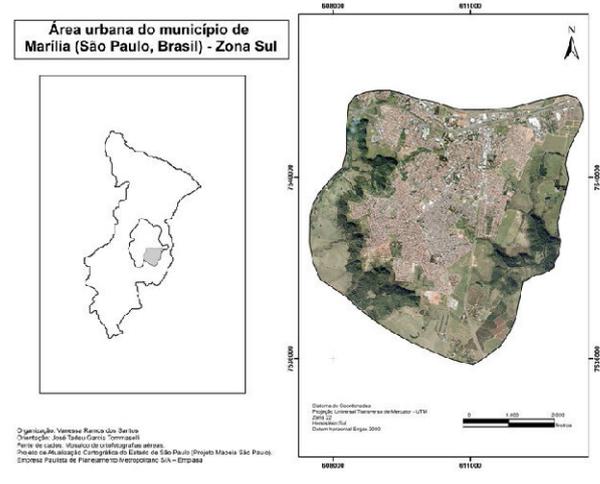


Figura 3. Localização da zona leste da área urbana de Marília (São Paulo, Brasil).

MATERIAIS

A base de dados compreendeu:

- Mapa Geológico do estado de São Paulo (1:500.000) (IPT, 1981).
- Mapa Pedológico do estado de São Paulo (1:500.000) (EMBRAPA, 1999).
- Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo (1:500.000) (ROSS; MOROZ, 1997) e Mapa Geomorfológico do perímetro urbano de Marília - SP (1:8.000) (SANTOS, 2009).
- Mapa de Suscetibilidade à erosão do estado de São Paulo (1:250.000) (KERTZMAN et al., 1995).
- Mapa de Inclusão/Exclusão social Marília (MELAZZO, 2012).
- Fotografias aéreas ortorretificadas, do ano de 2010.
- Imagens do satélite Land Remote Sensing Satellite (Landsat) 8, sensor Operational Land Imager (OLI) bandas 4, 5, 6 e 8, do ano de 2015.
- Dados de altitude extraídos da missão de mapeamento topográfico da Terra, denominada Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).
- Base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1973).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos consistiram no uso do SIG ArcGIS, versão 10.3 para elaboração do mosaico de imagens,

composição das bandas, extração dos dados de declividade e cruzamento das informações.

- Mosaico de imagens: esta etapa foi realizada no SIG ArcGIS, aplicando-se o módulo Composite Bands (etapas: Data Management Tools-Raster-Raster Processing). Em seguida, foi feito o georreferenciamento das imagens do satélite Landsat 8 e SRTM, utilizando o módulo Georeferencing do ArcGIS. As fotografias aéreas foram obtidas georreferenciadas e na sequência foram mosaicadas no SIG ArcGIS. Posteriormente, todos os dados foram reamostrados, georreferenciando-se novamente a partir de uma base comum para que as localizações de todo conjunto da base cartográfica tivessem as mesmas coordenadas.
- Para a elaboração da carta clinográfica da área urbana de Marília, a imagem SRTM com informações de altitude foi inserida no SIG ArcGIS para extração dos dados de declividade. Essa etapa consistiu na aplicação do módulo Slope, da ferramenta 3D Analyst Tools - Raster Surface.

A classificação das informações sobre declividade foi baseada em De Biasi (1992 apud SANTOS, 2017), cuja definição da chave de classes se apoiou em regulamentações estabelecidas por lei para os diferentes usos e ocupação territorial e, também, em usos consagrados de certo limites de classes definidos através de trabalhos acadêmicos. A definição das classes de declividades para serem utilizadas na elaboração da carta clinográfica, atende a um espectro bem amplo no que diz respeito à sua utilização na representação cartográfica, para os mais variados usos e ocupação do espaço, seja ele urbano ou agrícola (DE BIASI, 1992, p. 47).

O autor (De Biasi, 1992, apud SANTOS, 2017), define os seguintes limites, em porcentagem, para a chave de classes adotadas:

- <5% - Limite urbano-industrial, utilizados internacionalmente, bem como em trabalhos de planejamento urbano efetuados pelo IPT e pela EMPLASA.
- 5-12% - Limite máximo para o emprego de mecanização agrícola.
- 12-30% - Limite máximo para urbanização sem restrições (Lei federal nº 6766/79), a partir do qual toda e qualquer forma de parcelamento far-se-á através de exigências específicas.
- 30-47% - Limite máximo de corte raso, a partir do qual a exploração só será permitida se sustentada por cobertura de florestas (Lei federal nº 4771/65).
- >47% - Classe adotada pelo autor com base no Artigo 10º do Código Florestal (Lei federal nº 4771) de 1965, o qual previa que na faixa situada entre 25° (47%) a 45° (100%), “não é permitida a derrubada de florestas, só sendo tolerada a extração de toros, quando em regime de utilização racional, que vise a rendimentos permanentes”. No atual Código Florestal brasileiro, o Artigo 11º da Lei 12.651/2012 regulamentada que em áreas de inclinação entre 25° e 45°, serão permitidos o manejo florestal sustentável e o exercício de atividades agrossilvipastoris, bem como a manutenção da infraestrutura física associada ao desenvolvimento das atividades, observadas boas práticas agrônomicas, sendo vedada a conversão de novas áreas, excetuadas as hipóteses de utilidade pública e interesse social.

- Cruzamento das informações: as informações da carta clinográfica foram cruzadas com os dados de inclusão e exclusão, pelo modo Raster Calculator (em Spatial Analyst Tools - Map Algebra). O produto resultante desse cruzamento também foi comparado com as informações obtidas nos demais materiais cartográficos. Após a organização da

base cartográfica da área de estudo, foram realizadas as análises sobre o avanço dos bairros nas áreas estudadas (SANTOS, 2017).

III. RESULTADOS

Na relação entre o quadro natural e as formas de ocupação e apropriação em Marília, as diferenças entre as formas de produção do espaço urbano e a relação com as dinâmicas naturais são evidentes. Nas áreas cujas formas de produção ocorrem por apropriação do espaço, verifica-se que há também a incorporação das características naturais na valorização financeira dessas áreas.

Já nos espaços tidos por ocupação pode-se notar que há graves problemas de degradação do quadro natural e ao homem. Esses locais estão ocupados até o limite da linha de ruptura do relevo e apresentam falta de cobertura vegetal, impermeabilização das cabeceiras, arruamentos no sentido da vertente, assoreamento dos córregos e lançamento de esgoto in natura sobre o solo e sobre as águas.

Após os cruzamentos das informações realizados no ArcGIS, foi gerado o mapa de inclusão/exclusão social por classes de declives ocorrentes nas leste e sul da área urbana de Marília.

A Figura 4 refere-se ao mapa de inclusão/exclusão social em classes de declives na zona leste.

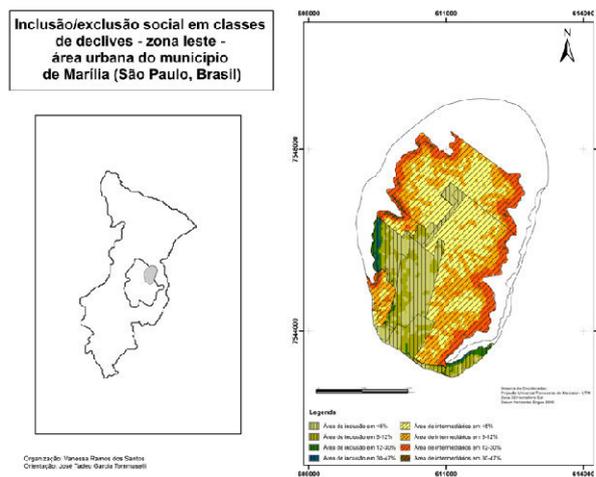


Figura. 4. Mapa de inclusão/exclusão social em classes de declives na zona leste da área urbana de Marília (São Paulo, Brasil).

A análise do mapa destaca que a zona leste de Marília possui áreas de inclusão social e de intermediários nas classes <5%, entre 5-12%, entre 12-30% e entre 30-47%. As áreas de inclusão e intermediários em classes referentes a média e alta declividade (classes 12-30% e 30-47%) localizam-se, principalmente, na faixa próxima da escarpa do planalto.

A observação do mapa também permite verificar que na zona leste não há áreas de exclusão social.

Considerando o que foi definido por De Biasi (1992), para o limite máximo da urbanização sem restrições (classe 12-30%), observa-se no mapa que na zona leste há o avanço da expansão urbana sobre a classe entre 30-47% de declividade. Entretanto, tal avanço refere-se a áreas de inclusão social e intermediários.

Os dados obtidos pelo mapa de inclusão/exclusão social, quando comparados com as características da fragilidade ambiental (características geológicas, dos solos, do relevo e de suscetibilidade à erosão), mostram que a expansão urbana na zona leste

apresenta baixa vulnerabilidade social. Nessas áreas, a baixa vulnerabilidade social é devida às formas de apropriação do espaço, que apresenta planejamento e infraestrutura prévia para a implantação dos loteamentos, como ruas paralelas ao sentido da escarpa, manutenção de vegetação e isolamento da linha de ruptura do planalto, áreas verdes e calçamento de modo a permitir a infiltração e diminuir o escoamento superficial e a condição alto e médio padrão das habitações. A faixa próxima a escarpa, quando analisada no Mapa da Lei do Zoneamento e Uso do solo, evidencia que essas áreas são caracterizadas como zonas residenciais com baixa e média densidade. Esse fator reforça a baixa vulnerabilidade social da zona leste, pois a taxa de ocupação do solo é menor.

Constata-se, portanto, que mesmo a expansão urbana ultrapassando restrições em função da classe de declive (além de 30%), as características de implantação das estruturas, o padrão das habitações e baixa densidade permitem o baixo risco à população assentada na zona leste. Verifica-se que há, inclusive, a incorporação das características do meio físico na valorização dos loteamentos.

Após elaboração do mapa de inclusão e exclusão social em classes de declives, foram realizados trabalhos de campo nas áreas próximas à escarpa do planalto. Esses pontos, representativos das condições da área estudada, foram identificados no mapa de inclusão e exclusão social em classes de declive e previamente nas imagens de satélites e fotografias aéreas.

As Figuras 5 e 6 mostram as características do espaço urbano na zona leste de Marília, destacando a implantação da infraestrutura urbana, previamente à chegada dos habitantes e a estrutura de condomínio fechado, que incorpora aspectos do meio físico na valorização do espaço urbano na zona leste.

A Figura 7 destaca o mapa de inclusão/exclusão social em classes de declives na zona sul, da área urbana de Marília.

O mapa destaca que a zona sul de Marília possui áreas de exclusão social nas classes de declividade <5%, entre 5-12%, entre 12-30% e entre 30-47%, sobretudo, nas proximidades da escarpa do planalto.

Conforme De Biasi (1992) a classe de declividade 12-30%, é o limite máximo para a urbanização sem restrições. No entanto, a análise do mapa mostra que a expansão urbana tem ultrapassado esse limite, chegando até na classe entre 30-47%, considerada de risco para os moradores em função de sua baixa estabilidade.

Essa característica, quando confrontada com a fragilidade ambiental da área, gerada a partir das características geológicas, dos solos, do relevo e de suscetibilidade à erosão, indicam que a expansão urbana apresenta alta vulnerabilidade social nessas áreas, e que a população assentada encontra-se sob risco.

A vulnerabilidade social aumenta conforme as formas de expansão e ocupação urbanas são desenvolvidas, com ruas no sentido do declive, retirada da cobertura vegetal, impermeabilização do solo, concentração do escoamento superficial, movimentação das morfologias do relevo (corte/aterro) e às más condições das residências.

O cruzamento das características obtidas pelo mapa com o Mapa da Lei do Zoneamento e Uso do solo, de 2015, mostra também que a faixa próxima à escarpa do planalto é zona residencial de interesse social. No entanto, considera-se que o interesse social deve ser organizado, de modo a não apresentar risco a deslizamentos e desmoronamentos e, principalmente, risco à vida da população.



Figura 5. Aspectos do condomínio fechado, onde destacam-se arruamentos perpendiculares ao sentido da vertente, área de recomposição de espécies arbóreas e muro de separação da alta e média vertente, separando da escarpa do planalto.



Figura 6. Aspectos da estrutura de condomínio residencial fechado.

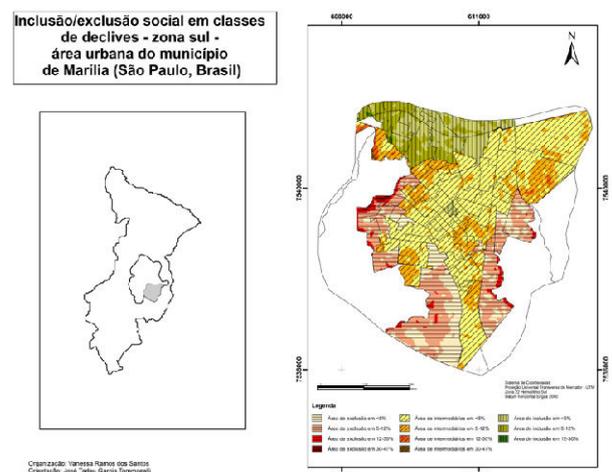


Figura 7. Mapa de inclusão/exclusão social em classes de declives na zona sul da área urbana de Marília (São Paulo, Brasil).

Os trabalhos de campo na zona sul foram realizados em áreas próximas à escarpa do planalto, após serem identificados no mapa de inclusão e exclusão social em classes de declive e previamente nas imagens de satélites e fotografias aéreas.

As Figuras 8 e 9 destacam as características da zona sul da área urbana do município de Marília, em que é possível observar características das moradias, os arruamentos com solo exposto, favorecendo a concentração e escoamento superficial de água e esgoto. Também é possível verificar a presença de detritos nas ruas.



Figura 8. Aspectos das moradias e da declividade (linha vermelha), com destaque para exposição do solo.



Figura 9. Aspectos da zona sul, com destaque para arruamento no sentido do declive (linha vermelha); destaque também para as características do solo (aspecto arenoso), ausência de cobertura vegetal (gramíneas esparsas) e escoamento superficial do esgoto.

IV. CONCLUSÕES

Com base no objetivo de verificar o uso de SIG para análises de impactos sobre morfologias do relevo, o presente estudo retratou que:

Nas zonas leste e sul de Marília - SP, a interação entre as formas de produção e ocupação do espaço urbano, por ocupação e por apropriação, e os processos erosivos em áreas naturalmente sensíveis, gera impactos diferenciados sobre as dinâmicas sociais dessas áreas. Esses impactos são negativos quando a população residente possui baixo poder aquisitivo (zona sul); e podem ser considerados positivos, quando busca-se perpetuar dinâmicas naturais, capitalizando-as e incorporando-as ao espaço urbano como 'recurso' à qualidade de vida urbana.

O uso de SIG foi essencial para manipulação de dados e geração das informações acerca dos impactos sobre as morfologias do relevo na área estudada uma vez que permitiu a extração dos dados de altitude, elaboração dos mapas de declividade e de

inclusão e exclusão social em classes de declive.

Os dados oriundos do sensor OLI do satélite Landsat 8 juntamente com as ortofotografias aéreas possibilitaram a identificação, a verificação e a obtenção de dados qualitativos e quantitativos do uso e da cobertura da terra na área estudada bem como da densidade e da característica das formas de produção do espaço urbano na zona sul e na zona leste do município de Marília.

Constata-se, portanto, que, em Marília, a relação entre a produção do espaço urbano das zonas leste e sul e as morfologias do relevo são caracterizadas pela mesma fragilidade ambiental, em função do mesmo contexto físico (características do solo e do relevo); porém, apresenta vulnerabilidade e riscos diferenciados de acordo com a população assentada, sendo a população da zona sul mais vulnerável aos impactos sobre as morfologias do relevo do que a residente na zona leste.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES ao CNPq pela concessão das bolsas de pesquisa de mestrado. Os autores agradecem também à EMLASA pela concessão de 15 ortofotografias da área de estudo.

REFERÊNCIAS

- DE BIASI, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. Revista do Departamento de Geografia (FFLCH - USP), São Paulo, v. 6, 45-60, 1992.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Brasília, DF: Embrapa/Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1999. 1 mapa, color. Escala 1:500.000.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC (ESRI). ArcGIS / ArcMap. Professional GIS for the desktop, release 10.3 Redlands, 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Carta topográfica: folhas Alvinlândia (SF22-Z-A-III-3) e Marília (SF22-Z-A-III-1). Serviço Gráfico do IBGE, 1973. Escala 1:50.000.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT (São Paulo). Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1981. Escala: 1:500.000.
- KERTZMAN, F. F. et al. Mapa de erosão do estado de São Paulo. Revista do Instituto Geológico, Vol. especial. São Paulo, 1995, p. 31-36.
- MELAZZO, E. S. Marília: especialização industrial e diversificação do consumo. Trajetórias de uma cidade média. In: SPOSITO, M. E. B.; ELIAS, D.; SOARES, B. R. (Orgs.). Agentes econômicos e reestruturação urbana e regional: Chillán e Marília. 1 ed. São Paulo: Outras Expressões, 2012, p. 161-279.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes antropizados. Revista do Departamento de Geografia. São Paulo: FFLCH/USP, n. 8, 1994.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo. São Paulo: FFLCH-USP, 1997. Escala: 1:500.000.
- ROSS, J.L.S. Geomorfologia: ambiente e planejamento. 9 ed. São Paulo: Contexto, 2012.
- SANTOS, Vanessa Ramos dos. Análise temporal de impactos sobre morfologias do relevo nas zonas leste e sul da área urbana de Marília, São Paulo, Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil, 2017.

Análisis de métodos para la cartografía de incendios forestales en el cantón Cuenca a partir de imágenes TERRA/AQUA MODIS

Cure López Lisseth¹

¹ Departamento de Posgrados/
Universidad del Azuay
Cuenca/Azuay/Ecuador
lichicl@hotmail.com

RESUMEN

La presente investigación explora el potencial de la información satelital para completar y complementar la información disponible en las bases de datos oficiales sobre ocurrencia y localización de incendios forestales en Ecuador. Para ello se aborda un análisis del comportamiento espectral de las zonas quemadas en la región del Azuay y zonas aledañas, a partir de la información contenida en imágenes de resolución espacial baja y temporal alta adquiridas por el sensor MODIS TERRA y AQUA. Los resultados muestran que los productos MOD09A1 (es un compuesto de 16 días que combina información procedente de las plataformas TERRA y AQUA, cuenta con una corrección de la reflectividad en función de las condiciones de observación e iluminación teniendo en cuenta el factor de reflectancia bidireccional que considera la anisotropía (la energía reflejada no es la misma en todas las direcciones, dependiendo del ángulo de observación y de iluminación solar) de las diferentes coberturas del suelo y aplica una corrección para atenuar este efecto), presentan un mejor desempeño al momento de cartografiar áreas quemadas en imágenes recientes post-incendio al ofrecer una mayor separabilidad espectral con otras cubiertas de la imagen. Sin embargo, el producto MCD43A4 (es un compuesto de 16 días que combina información procedente de las plataformas TERRA y AQUA) parece funcionar mejor cuando las imágenes no son recientes. El periodo de estudio fue en el año 2012, año en el cual se presentaron incendios de gran extensión.

Palabras clave: **Área quemada, índices espectrales, incendios forestales, MODIS, teledetección.**

ABSTRACT

The present research explores the potential of satellite information to complete and complement the information available in the official databases on occurrence and location of forest fires in Ecuador. For this, an analysis of the spectral behavior of the burned areas in the Azuay region and surrounding areas is carried out, based on the information contained in low and high temporal spatial resolution images acquired by the MODIS TERRA and AQUA sensor. The results show that the products MOD09A1 (a compound of 16 days that combines information from the platforms TERRA and AQUA, has a correction of the reflectivity depending on the conditions of observation and lighting taking into account the factor of bi-directional reflectance that considers the anisotropy (the reflected energy

is not the same in all directions, depending on the angle of observation and solar illumination) of the different soil coverages and applies a correction to attenuate this effect), present a better performance at the time of mapping Areas burned in recent post-fire images by offering greater spectral separability with other picture decks. However, the product MCD43A4 (is a compound of 16 days that combines information from the platforms TERRA and AQUA). Seems to work best when images are not recent. The study period was in 2012, the year in which fires of great extent occurred.

Keywords: *Burnt area, spectral indexes, forest fires, MODIS, Remote sensing.*

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los incendios forestales constituyen una catástrofe natural de primera magnitud. Se trata de un fenómeno global que afecta a una gran variedad de ecosistemas en todo el planeta llegando a devastar cerca de 350 millones de hectáreas por año (FAO, 2009). En las últimas décadas, diversos estudios han evidenciado un aumento en la severidad de los incendios forestales y en la superficie afectada en muchas regiones del mundo como América del Norte, Siberia y en el norte de Asia, (Groot et al. 2012).

Entre los efectos adversos de los incendios forestales se encuentra su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero, generando de esta forma una relación estrecha entre el cambio climático y la incidencia de incendios. Se trata de una relación cíclica pues algunos estudios demuestran que el cambio climático provoca, a su vez, una prolongación de las temporadas de incendios forestales a nivel global (Groot et al. 2012). Todo ello evidencia la importancia de contar con información precisa, continua y consistente sobre la ocurrencia de este fenómeno a nivel global pero también, de forma más específica, a escala continental- regional.

Uno de los aspectos más importantes en la gestión de los incendios forestales es la cuantificación de la superficie afectada cada año. En las últimas décadas se han utilizado diferentes técnicas de percepción remota mediante imágenes satelitales con la finalidad de poder identificar, cuantificar y cartografiar las zonas afectadas por incendios forestales (Verdú & Salas 2010). Los cambios que generan los incendios en las cubiertas vegetales: reducción de clorofila y contenido de humedad, incremento de zonas de suelo descubierto, alteraciones del color, deposición de cenizas y carbón, etc.; afectan a su comportamiento espectral, lo que permite diferenciar las áreas quemadas de otros tipos de coberturas existentes en el territorio a partir de imágenes de satélite (Santis & Vaughan 2009).

Imágenes adquiridas desde diversas plataformas y sensores han sido utilizadas para cartografiar áreas quemadas de una forma más económica, accesible y con alta fiabilidad. Además, en el ámbito de los incendios, la información proporcionada por la teledetección ha sido utilizada para la detección temprana de focos activos (Vélez, 2012 en González et al., 2009)

La gran variedad de satélites existentes en el mercado han permitido abordar un buen número de proyectos para cartografiar áreas quemadas a diferentes resoluciones espaciales y temporales, mediante imágenes de resolución espacial baja y alta frecuencia temporal como NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation y TERRA-MODIS, habitualmente utilizados para la detección y cartografía de incendios a escalas continentales (Chuvieco et al., 2006). Otras imágenes, como las adquiridas por la familia de satélites Landsat, que tienen una resolución espacial media-alta, se han utilizado para cartografiar incendios a escalas regionales o locales (Verdú & Salas, 2010)

En el Ecuador no existe un levantamiento sistemático de información in-situ de las áreas afectadas por los incendios

forestales. La información generada es en base a un análisis visual llevado a cabo por las entidades de respuesta y que incluye la localización de un punto de referencia tomado con un GPS, así como la estimación del área y vegetación afectadas. No se han aplicado en Ecuador hasta el momento, técnicas de teledetección para cuantificar, cartografiar y realizar un seguimiento sistemático de la recurrencia de incendios forestales.

En el año 2008 el gobierno ecuatoriano mediante Decreto Ejecutivo 1046-A crea la Secretaría Técnica de Gestión de Riesgos, la misma que toma el nombre de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos el 18 de septiembre del 2009. Desde esta fecha hasta la actualidad es ésta la entidad encargada de coordinar acciones en respuesta a los diferentes riesgos naturales y a situaciones de emergencia en el país. A nivel de la provincia del Azuay la misma comienza a funcionar a partir del año 2011.

Precisamente en el año 2012, el Ecuador entró en estado de emergencia como consecuencia de la oleada de incendios forestales que afectaron al país. El 14 de septiembre de ese año, 8 de las 24 provincias del país se declararon en alerta naranja. Cerca de 28.000 ha. de bosque y pajonales fueron consumidos por el fuego, de las cuales 2.500 ha fueron perdidas en la provincia del Azuay. La magnitud de los siniestros fue tal que se recibió ayuda de países como Brasil, Colombia y Venezuela que aportaron recursos en las labores de extinción. Éste sin duda ha sido uno de los años con mayor registro de incendios de las últimas décadas del Ecuador (SNR, 2013).

La Secretaría Nacional de Riesgos (SNR) dirección del Azuay, comenzó en el año 2012 a realizar un monitoreo de los de incendios forestales ocurridos en la provincia, generando una base de datos de siniestros que incluye un punto de ubicación georreferenciado, la fecha del siniestro, las hectáreas afectadas y el uso de suelo afectado. La georreferenciación de los incendios es de carácter aproximado ya que no se realiza un levantamiento in situ del polígono del área afectada, debido a la topografía donde generalmente suceden los mismos, ya que en su mayoría se dan en lugares de muy poca accesibilidad. Por la misma razón tampoco se ha logrado determinar con exactitud el tipo de vegetación afectada en cada siniestro (Base de Datos SNR, 2013.). En la Tabla I se relacionan los incendios forestales mayores a 10 ha que han sido registrados por la Secretaría Nacional de Riesgos para el año 2012.

TABLA I.
INCENDIOS FORESTALES REGISTRADOS POR LA SECRETARÍA NACIONAL DE RIESGOS AÑO 2012

COORDENADAS		PARROQUIA	SECTOR	FECHA	HA. APROX.
X	Y				
722211	9689086	Chiquintad	Tixán	09/08	16
728853	9681614	Chaullabamba	Camino a Nulti	11/08	10
721520	9658396	Cumbe	Américas	22/08	32
673148	9674498	Chaucha	Pichilcay	03/09	1250
722428	9668438	Tarqui	El Calvario	05/09	20
677765	9695405	Molleturo	San Pedro de Yumate	14/09	250
712877	9683412	Sayausí	San Miguel de Putushi - Cruz Quilloloma	16/09	15
725583	9676038	El Valle	Vía a Santa Ana	17/09	10

713247	9662543	Nulti	Ucubamba	21/09	10
719937	9665925	Tarqui	Chilcachaparra	04/10	16

El objetivo de este estudio fue explorar el uso de información satelital para completar y complementar la información disponible en la base de datos de incendios de la SNR mediante la obtención de datos espaciales georreferenciados de las áreas quemadas y cubiertas vegetales afectadas. El propósito del trabajo era determinar la metodología que mejor se ajusta a las características del territorio ecuatoriano.

Para realizar la investigación se debe considerar que las imágenes a ser utilizadas van a definir el alcance de los resultados, debido a que algunas técnicas presentan restricciones derivadas de:

1. La resolución temporal de las imágenes. Resoluciones temporales medias o bajas pueden dificultar la discriminación espectral de las áreas quemadas debido a procesos de recuperación post-incendio que atenúan la señal o incluso impidan la observación del incendio como consecuencias de la cobertura de nubes.
2. La resolución espacial que definirá el tamaño mínimo de los incendios a ser identificados. Imágenes de resolución espacial media-alta permitirán identificar con mayor precisión incendios de menor tamaño. Sin embargo, este tipo de imágenes suelen presentar frecuencia temporal baja.
3. La resolución espectral, que aportará información más o menos relevante de cara a realizar una correcta caracterización e identificación del área quemadas respecto de otro tipo de cubiertas presente en el territorio afectado (García & Chuvieco, 2004 en Valenzuela et al., 2008)

En función de la información obtenida por las diferentes entidades en cuanto a incendios forestales, y el análisis de las imágenes satelitales existentes para la zona de estudio, se pudo constatar la necesidad de contar con imágenes de alta resolución temporal, debido a la frecuente cobertura de nubes existentes en la región que impedía el uso de imágenes de alta resolución espacial como LANDSAT 8. Por este motivo se optó por utilizar imágenes de menor resolución espacial pero mayor frecuencia temporal como las obtenidas por el sensor MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) a bordo de las plataformas TERRA y AQUA. La resolución espacial máxima de este tipo de imágenes es de 250 m, siendo la más frecuente de 500 m lo que impide discriminar incendios de pequeño tamaño, por este motivo la investigación se centró en analizar incendios mayores a 100 ha. Aunque el número de incendios mayores de 100 ha. ocurridos en el cantón Cuenca en 2012 según las estadísticas oficiales es pequeño (Tabla I), consideramos que es suficiente para abordar el estudio metodológico que se propone en este trabajo.

Existe una gran variedad de técnicas que permiten cartografiar áreas quemadas a partir de teledetección. La selección de la técnica más apropiada, dependerá de la información disponible y de las características de la zona de estudio (tipos de cubiertas vegetales, tamaño y severidad de los incendios, etc.). Algunos trabajos han demostrado la eficacia del análisis visual para la identificación de áreas quemadas utilizando para ello diversas composiciones en color. Esta técnica se utiliza fundamentalmente sobre imágenes de resolución espacial media alta, tipo Landsat. En este caso, como ya hemos explicado, la ubicación geográfica del área de estudio determina una alta frecuencia de cobertura nubosa por lo que no fue posible utilizar este tipo de imágenes y, por tanto, se descartó el uso de análisis visual.

Entre las técnicas de análisis digital, los índices espectrales son los que más comúnmente se han utilizado para identificar o cartografiar incendios forestales, basándose en su contribución al realce de la señal espectral correspondiente al área quemada (carbón, cenizas o vegetación afectada) con respecto a otros tipos de cubierta natural o artificial (Chuvieco et al., 2006). Muchos de estos índices combinan información de las regiones espectrales del rojo (600 a 700 nm), e infrarrojo cercano (700 a 1300 nm), especialmente indicadas para analizar el estado de la vegetación. Se ha demostrado que las áreas quemadas presentan una mayor reflectividad con respecto a la vegetación no afectada en la región del visible, especialmente si existen depósitos de cenizas procedentes de la combustión. Sin embargo, la reflectividad de las áreas quemadas es menor que la de la vegetación en el infrarrojo cercano (NIR) debido al efecto absorbente del carbón. Al combinar varias bandas los índices espectrales tienden a minimizar efectos atmosféricos o relacionados con la influencia del suelo lo que también resulta de interés en la discriminación de áreas quemadas (Chuvieco, 2002 en Pavón & Rodríguez-Verdú, 2006)

La región espectral del infrarrojo medio de onda corta (SWIR) (1300 a 2500 nm) ha demostrado también gran interés para la cartografía de áreas quemadas. Diversos estudios han comprobado que en esta región espectral se produce un aumento de los valores de reflectividad tras un incendio, como consecuencia de la pérdida de agua en la materia vegetal. Teniendo en cuenta que los efectos atmosféricos son mucho menores que en otros rangos del espectro visible, resulta obvio el potencial del SWIR en la cartografía de incendios, sobre todo tras la proliferación de sensores que obtienen información en esta región del espectro (LANDSAT TM, ETM y OLI, NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, TERRA-MODIS...) (Martín et al., 2002).

Las bandas del SWIR han sido implementadas en una nueva generación de índices espectrales para cartografiar áreas quemadas mejorando los resultados respecto al uso de índices basados en las regiones del rojo e infrarrojo cercano (Martín et al., 2002; Pereira, Sa et al., 1999; Rogan & Franklin, 2001 en Pavón & Rodríguez-Verdú 2006)

En este trabajo se ha realizado un análisis del comportamiento espectral de las zonas quemadas en la región del Azuay a partir de la información contenida en imágenes adquiridas por el sensor MODIS (bandas del visible, NIR y SWIR). Para ello se han utilizado datos procedentes de dos productos MODIS con distintos niveles de corrección radiométrica en los valores de reflectividad. Concretamente se utilizaron productos con y sin corrección del efecto de las condiciones de iluminación y observación (factor de reflectividad bidireccional (BRDF)) lo que nos permitió valorar la idoneidad de este tipo de correcciones para la cartografía de áreas quemadas. Adicionalmente, a partir de estas imágenes, se han calculado una serie de índices espectrales propuestos en la literatura para la cartografía de áreas quemadas. Finalmente se ha abordado un análisis de separabilidad espectral entre los valores de los índices y bandas registrados en píxeles correspondientes a áreas quemada identificadas en las imágenes respecto a los de otras cubiertas. El estudio se ha realizado para imágenes obtenidas inmediatamente después de la ocurrencia de incendios y también para imágenes adquiridas varios meses después del evento con el propósito de analizar la persistencia temporal de la señal espectral correspondiente al área quemada en la zona de estudio y poder determinar así, la fecha más idónea para la selección de imágenes satelitales de cara a un proceso operativo de cartografía sistemática de los incendios en la zona.

Con esta información ha sido posible, por tanto, identificar las bandas e índices potencialmente más eficaces para discriminar áreas quemadas en función de las características del área de estudio y de la información espectral disponible, analizando además el efecto temporal sobre la degradación de la señal procedente del área quemada.

II. MÉTODO

A. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio incluye una ventana de 221.760,63 km² definida por las coordenadas Noroeste: 625490, 9725253 y Sureste: 794717, 9596666; como se muestra en la Figura 1. Esta ventana está centrada en el cantón Cuenca, perteneciente a la provincia del Azuay, la misma que se encuentra ubicada al sur del Ecuador. El cantón Cuenca por su ubicación geográfica, topografía y tipo de cobertura vegetal presenta vulnerabilidad a la presencia de incendios forestales provocados en su mayoría por el ser humano con la finalidad de ampliar la frontera agropecuaria.

El cantón Cuenca presenta una cobertura vegetal de páramo que ocupa el 28% del territorio, siendo éste un ecosistema sensible a los incendios forestales. Otro tipo de cobertura vulnerable al fuego son los bosques de *Polylepis* y vegetación leñosa nativa que juntos cubren un 24% del territorio cantonal. Por tanto, el 52% del cantón es vulnerable a este tipo de siniestros (Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca, 2011).

Como ya se indicó (Tabla I) durante los meses de agosto a octubre del año 2012 en el cantón Cuenca se vio afectado por una serie de incendios forestales, algunos de tamaño considerable que serán objeto de estudio de este trabajo.

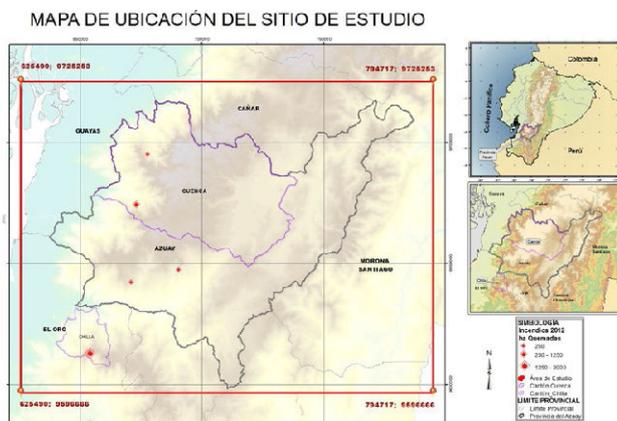


Figura 1. Ubicación del área de estudio

B. DATOS

En el presente estudio se han utilizado imágenes satelitales obtenidas por el sensor MODIS (Moderate Resolution imaging Spectroradiometer), que se encuentra a bordo de las plataformas TERRA y AQUA. Este sensor adquiere datos de carácter global con una frecuencia diaria. Posee 36 bandas espectrales que ofrecen información en longitudes de onda que van desde 405 a 14385 nm (Visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio de onda corta e infrarrojo térmico) (Tabla II). Dos de estas bandas (banda 1 y 2 correspondientes a las regiones del rojo e infrarrojo cercano) cuentan con una resolución espacial de 250m, cinco bandas tienen resolución de 500m y las 29 bandas restantes de 1 Km. Este sensor permite detectar focos de calor, como los incendios forestales mediante la información captada en la región del infrarrojo térmico (TIR).

TABLA II.
CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR MODIS.

BANDA	RANGO ESPECTRAL (NM)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)
1	620-670	250
2	841-876	250
3	459-479	500
4	545-565	500
5	1230-1250	500
6	1628-1652	500
7	2105-2155	500
8	405-420	1000
9	438-493	1000
10	483-493	1000
11	526-536	1000
12	546-556	1000
13	662-672	1000
14	673-383	1000
15	743-753	1000
16	862-877	1000
17	890-920	1000
18	931-941	1000
19	915-965	1000
20	3660-3840	1000
21	3929-3989	1000
22	3929-3989	1000
23	4020-4080	1000
24	4433-4498	1000
25	4482-4529	1000
26	1360-1390	1000
27	6535-6895	1000
28	7175-7475	1000
29	8400-8700	1000
30	9580-9880	1000
31	10780-11280	1000
32	11770-12270	1000
33	13185-13485	1000
34	13485-13785	1000
35	13785-14085	1000
36	14085-14385	1000

Además de las imágenes originales, el organismo que se encarga de la adquisición y distribución de los datos a nivel global (Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS, USA) genera una gran cantidad de productos derivados del sensor MODIS que han sido diseñados para analizar distintas características de la cubierta terrestre, los océanos y la atmósfera. En este trabajo se han utilizado concretamente los productos MD09A1 y MCD43A4. Sus principales características se describen en la Tabla III. Todos los productos se han descargado de forma gratuita desde la plataforma de acceso a las imágenes del USGS (www.glovis.usgs.gov).

El producto MOD09A1, ofrece información de la reflectividad captada por el sensor en 7 bandas que recogen datos espectrales en las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio de onda corta (459 a 2155 nm). Se trata de un producto compuesto temporalmente con información adquirida durante un período de ocho días. La imagen resultante toma para cada píxel, las mejores observaciones (menor contaminación por nubes, mejor calidad radiométrica y geométrica, etc.) durante este período, lo que permite disminuir la cantidad de nubes y otros posibles problemas de adquisición en la imagen (García-Mora & Mas, 2011)

El producto MCD43A4, es un compuesto de 16 días que combina información procedente de las plataformas TERRA y AQUA. Tiene las mismas bandas que el producto MOD09A1

pero cuenta con una corrección de la reflectividad en función de las condiciones de observación e iluminación teniendo en cuenta el factor de reflectancia bidireccional que considera la anisotropía (la energía reflejada no es la misma en todas las direcciones, dependiendo del ángulo de observación y de iluminación solar) de las diferentes coberturas del suelo y aplica una corrección para atenuar este efecto. Este tipo de corrección simula una observación nadir para todos los píxeles de la imagen lo cual permite, en principio, una comparación más adecuada entre píxeles de la misma imagen y también entre imágenes adquiridas en distintas fechas. Al ser un producto combinado de dos satélites permite disminuir errores por nubes, sombras, etc. En el estudio se ha utilizado este producto para realizar una comparación con el producto MOD09A1 (García-Mora & Mas, 2011).

En este trabajo los productos MOD09A1 y MCD43A4 se utilizaron para analizar el comportamiento espectral de las áreas quemadas en la zona de interés mediante el análisis de las bandas originales de la imagen y los índices espectrales que se calcularon a partir de ellas.

TABLA III.
CARACTERÍSTICAS DE PRODUCTOS MODIS UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO

PRODUCTOS	MOD09A1	MCD43A4
Plataforma	TERRA	Combinado TERRA/AQUA
Resolución Temporal	8 Días	16 Días
Información Espectral	Reflectividad bandas 1 -7	Reflectividad bandas 1-7 Corregida del BRDF
Resolución Espacial	500 m	500 m

Para seleccionar las imágenes que se utilizaron en el presente trabajo se consideró la cercanía a las fechas de los incendios registrada por la Secretaría Nacional de Riesgos (Tabla I). De igual manera se escogieron imágenes post-incendios (más y menos recientes), evitando las que tenían una alta cobertura de nubes. Las imágenes pre-seleccionadas y finalmente utilizadas en este estudio aparecen relacionadas en la Tabla IV y Figura 2.

TABLA IV.
PRODUCTOS E IMÁGENES MODIS UTILIZADAS EN EL TRABAJO

PRODUCTO MODIS	IMAGEN	DÍA JULIANO	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	INCENDIOS REGISTRADOS POR SNR	ÁREA (HA)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)
MCD43A4	MCD43A4.A2012249.h10v09.005.2012270132613	249	05-sep-12	21-sep-12	03-sep-12	1250	500
					06-sep-12	2000	
	MCD43A4.A2012329.h10v09.005.2012346153255	329	24-nov-12	09-dic-12	03-sep-12	1250	
					06-sep-12	2000	
MOD09A1	MOD09A1.A2012249.h10v09.005.2012258065321	249	05-sep-12	13-sep-12	03-sep-12	1250	500
					06-sep-12	2000	
	MOD09A1.A2012329.h10v09.005.2012340002622	329	24-nov-12	01-dic-12	03-sep-12	1250	
					06-sep-12	2000	

C. PRE - PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Los productos MODIS son distribuidos por el USGS en mosaicos (tiles) de 10x10 ° en proyección sinusoidal, con una resolución radiométrica de 16 bits. Los valores de reflectividad de las bandas originales están escalados entre 0 y 10.000. Gracias a la herramienta MCTK conversión Toolkit, una extensión del software ENVI que está disponible libremente en: <https://github.com/dawwhite/MCTK>, hemos re proyectado las imágenes al sis-

tema UTM, WGS84 zona 17 sur y re-escalado los valores a 8 bits (valores de reflectividad de 0 a 1) para poder calcular los índices espectrales. Además, se recortaron las imágenes al área de estudio con el fin de trabajar con la ventana definida en la Figura 1 correspondiente a la provincia del Azuay y sus zonas aledañas.

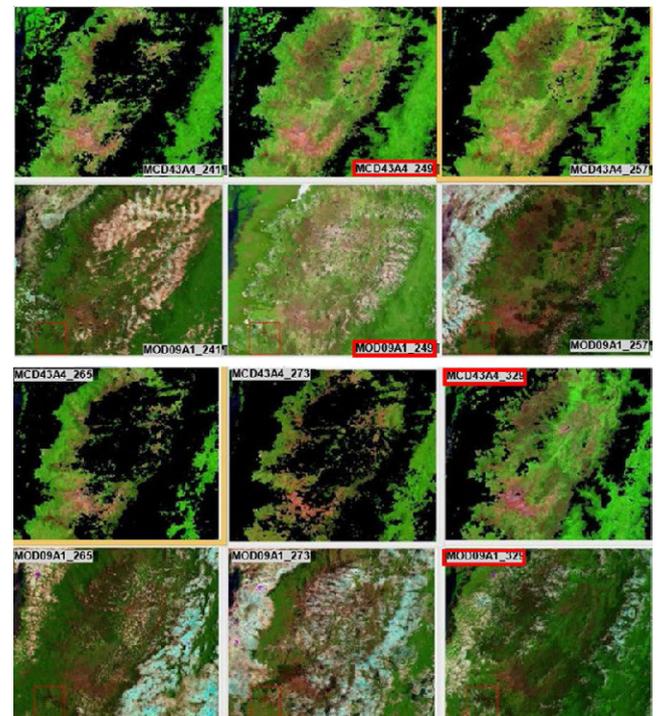


Figura 2. Serie temporal de productos de reflectividad (MOD09A1 y MCD43A4) pre-seleccionadas en este estudio.

Las fechas finalmente utilizadas aparecen remarcadas en rojo. Composición en color RGB de las bandas 721 (Figura 2). En el producto MCD43A4 los píxeles con calidad insuficiente para aplicar la corrección del BRDF (nubes) aparecen con valor 0 (negro). En el producto MOD09A1 los píxeles con todos blancos-azulados corresponden a cobertura de nubes.

D. CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES.

En este trabajo se han calculado seis índices espectrales que se han seleccionado entre los habitualmente utilizados en la literatura para la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes de satélite. El objetivo fue comprobar cuál de ellos permite una mejor discriminación entre áreas quemadas y otras cubiertas en la zona de estudio en función de sus características específicas (tipo y tamaño de incendios, características de las cubiertas vegetales, etc.). Todos los índices se han calculado a partir de los productos MOD09A1 Y MCD43A4 con el propósito de comparar los resultados entre índices calculados con valores de reflectividad corregidos y no corregidos del efecto de reflectividad bidireccional. Los índices calculados son:

1) **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**

Se calcula como la diferencia normalizada de las bandas del rojo y del infrarrojo cercano ecuación [1]:

$$NDVI = \frac{IRC-C}{IRC+C} \tag{1}$$

Su rango varía de -1 a 1 con valores próximos a 1 para zonas con vegetaciones vigorosas y próximas a 0 para zonas desprovistas de vegetación, como es el caso de las zonas quemadas.

A pesar que este índice se ha utilizado para análisis multitemporales con la finalidad de cartografiar áreas quemadas, se ha demostrado que no es el más idóneo para este fin en relación a otros índices desarrollados para este propósito debido, entre otros factores, a que está muy afectado por la influencia del suelo (Chuvieco et al., 2002; Pereira, 1999; Stroppiana al., 2002; Trigg & Flasse, 2001 en Saldivia & Salinero 2007), sin embargo con motivos de corroborar esta información fue aplicado en este trabajo.

$$IAQ_i = 1 / ((\rho_{c_r} - \rho_{i,r})^2 + (\rho_{c_m} - \rho_{i,m})^2) \quad (2)$$

El índice combina información de las regiones del rojo e infrarrojo cercano sienta los puntos de convergencia de 0,1 y 0,6 respectivamente. Estos puntos representan la reflectividad esperada en una zona recientemente quemada con un grado de severidad alto (combustión completa o casi completa de la vegetación y presencia de carbón y cenizas) lo que ayuda a enfatizar la separabilidad espectral de las zonas quemadas respecto a otras cubiertas vegetales y no vegetales (suelos, agua, etc.) (Martín & Chuvieco, 1998 en Heredia Laclaustra et al., 2003).

3) BAIM (Burned Area Index MODIS)

Es una variación del IAQ, donde la banda del rojo se sustituye por la del infrarrojo medio de onda corta (SWIR) menos influenciada por los efectos atmosféricos (Martín et al., 2005 en Chuvieco et al. 2006). En este trabajo se calcularon dos versiones del BAIM que proponen distintos valores de convergencia para la banda del SWIR BAIM1 $P_{cswir} = 0,2$; $P_{cswir} = 0,04$ y BAIM2 $P_{cswir} = 0,2$; $P_{cswir} = 0,08$. El sensor MODIS, presenta tres bandas del SWIR, las bandas 5, 6 y 7. Para este estudio se utilizó la banda 7, debido al bandeado existente en la banda 5 para los productos con datos de la plataforma TERRA y la banda 6 presenta bandeado para los productos provenientes de la plataforma AQUA, como lo muestra la ecuación [3]

$$BAI = \frac{1}{(P_{cswir} - \rho_{swir})^2 + (P_{cnir} - \rho_{nir})^2} \quad (3)$$

4) GEMI (Global Environmental Monitoring Index)

$$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) - \left[\frac{\rho_{RED} - 0.125}{1 - \rho_{RED}} \right] \quad (4)$$

Fue definido como una alternativa al NDVI, se encuentra menos afectado por el suelo y las condiciones atmosféricas. Trabajos anteriores han demostrado que resulta más apropiado para la cartografía de áreas quemadas que el NDVI (Martín & Chuvieco 1998 en Pavón & Rodríguez-Verdú, 2006) (Ecuación [4])

Dónde (Ecuación [5]):

$$\eta = \frac{2 \cdot (\rho_{NIR}^2 - \rho_{RED}^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0.5} \quad (5)$$

5) NBR (Normalized Burn Ratio)

Presenta la misma formulación del NDVI pero utiliza las banda del infrarrojo próximo (0,76-0,9 μm) (banda2) e infrarrojo medio de onda corta (2,08-2,35 μm) (banda 7). Fue diseñado originalmente para ser utilizado a partir de imágenes Landsat (Key & Benson, 2005) (Ecuación [6]):

$$NBR = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IRC} + \rho_{SWIR}} \quad (6)$$

Diversos trabajos han demostrado que la incorporación de la banda del SWIR mejora considerablemente la distinción entre áreas quemadas y no quemadas con respecto al NDVI.

E. CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LAS ÁREAS QUEMADAS

Con el propósito de analizar el comportamiento espectral de las áreas quemadas y las principales cubiertas presentes en la zona de estudio se identificaron píxeles representativos de cada una de estas cubiertas en las imágenes/productos analizados y se extrajeron, para esos píxeles, los valores de cada banda original (bandas 1 a 7) y de cada uno de los índices calculados.

Los píxeles representativos de cada cubierta o regiones de interés (ROIs), como se los denomina en el programa ENVI utilizado en el análisis, fueron localizados visualmente sobre composiciones en color de las imágenes. En el caso de los píxeles correspondientes a áreas quemadas, éstos se identificaron sobre dos grandes incendios ocurridos en la zona de Chaucha (Cuenca - Azuay) y Chilla (Chilla - El Oro). Para la ubicación de las áreas representativas de las cubiertas de ocupación de suelo se utilizó como apoyo la cartografía de uso de suelo generada por el Municipio de Cuenca para el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón, año 2010. Además de las áreas quemadas se analizaron un total de 5 cubiertas de usos, 3 correspondientes a vegetación natural (páramo, bosque y pastizal), 1 cubierta que representa las zonas de cultivo y otra a las zonas urbanas. Se incorporó además una categoría de cubierta nubosa por ser ésta muy frecuente en la zona de estudio. Se intentó que los ROI de cada cubierta incluyeran zonas suficientemente homogéneas y representativas lo que, en algunos casos, condicionó el número de píxeles identificados en cada categoría. La Figura 3 y Tabla V muestran las cubiertas analizadas y la localización de los ROIs identificados para cada una de ellas.

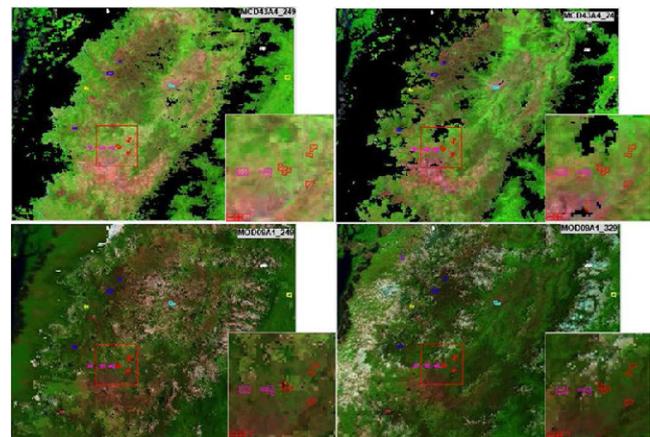


Figura.3 Localización de los ROIs identificados para cada cubierta.

Incluyen los píxeles cuyos valores serán utilizados en el análisis de caracterización y separabilidad espectral. En las ventanas de zoom se observan los ROIs de las cubiertas de cultivos y pastizal

Cabe mencionar que la localización de algunos ROIs tuvo que adaptarse a cada imagen para evitar incluir píxeles contaminados por nubes o sombras de nubes dado que su posición varía en las distintas fechas analizadas.

TABLA V.

TIPOS DE CUBIERTA IDENTIFICADOS PARA EL ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN/SEPARABILIDAD ESPECTRAL Y NÚMERO DE PÍXELES TOMADOS POR MUESTRA

CUBIERTAS	Nº DE PÍXELES	COLOR EN LA FIGURA 3
Nubes	17	Blanco
Área quemada	14	Café
Páramo	37	Azul
Bosque	36	Amarillo
Cultivos	36	Magenta
Área urbana	14	Cardenillo
Pastizal	37	Rojo

Una vez realizadas la extracción de los píxeles correspondientes a cada cubierta para los productos MODIS analizados en este trabajo se calcularon los valores de media y desviación estándar para cada cubierta y banda/índice, se construyeron gráficos de separabilidad que muestran el valor de media \pm 1 desviación típica para cada banda/índice y tipo de cubierta. Este tipo de gráficos permite analizar, de forma cualitativa, el solapamiento espectral entre categorías en las distintas bandas e índices analizados considerando, no sólo el valor promedio, sino también la dispersión de los valores espectrales que caracterizan a cada cubierta, es decir, su variabilidad interna.

F. ANÁLISIS DE SEPARABILIDAD ESPECTRAL.

Aunque los gráficos de separabilidad espectral antes mencionados permiten una primera valoración cualitativa de la capacidad de bandas e índices para discriminar entre áreas quemadas y otras cubiertas de la imagen, en este trabajo se realizó, además, un análisis cuantitativo para poder establecer de forma más precisa qué banda o índice espectral discrimina de mejor forma el área quemada del resto de cubiertas analizadas. Para ello calculamos un índice M de separabilidad propuesto por Pereira (Ecuación [7]) (1999 en Pavón & Rodríguez-Verdú, 2006).

Donde:

$$M = \frac{(\mu_c - \mu_q)}{(\sigma_c + \sigma_q)}$$

- μ_c = Es la media de cada una de las cobertura vegetales no quemadas.
- μ_q = Es la media de las áreas quemadas.
- σ_c = Desviación estándar de los valores de las coberturas vegetales no quemadas
- σ_q = Desviación estándar de las áreas quemadas

Valores de M superiores a 1, indican una buena separabilidad, mientras que los valores menores a 1 demuestran un solape espectral de los histogramas de las diferentes coberturas con respecto al área quemada, es decir, no existe una buena discriminación de las mismas. Los valores de separabilidad nos indicarán qué bandas o índices son más adecuados para la cartografía de incendios forestales con imágenes MODIS en Ecuador.

III. RESULTADOS

A. CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LAS ÁREAS QUEMADAS

Las Figuras 4 y 5 muestran los gráficos de caracterización espectral elaborados a partir de la información correspondiente a las bandas originales de los productos MODIS analizados.

En estas figuras las líneas horizontales representan los valores medios de reflectividad de los píxeles identificados para cada categoría; y las barras verticales la dispersión respecto a ese valor medio (\pm 1 desviación típica). Líneas horizontales muy próximas o solapadas indicarán un comportamiento espectral muy similar de las cubiertas en las correspondientes

bandas/índices espectrales. Por el contrario, líneas muy separadas indicarán una buena separabilidad espectral entre las cubiertas. Las barras verticales por su parte, permiten analizar posibles confusiones considerando la variabilidad espectral interna de cada cubierta. Es posible que algunas cubiertas presenten valores de media distintos (por tanto espectralmente separables) pero que esta separabilidad no sea posible si consideramos su variabilidad interna (desviación típica). En principio cuanto mayor sea ésta variabilidad, mayor será el riesgo de confusión con otras cubiertas.

Para una correcta visualización de los datos en los gráficos generados los valores originales de los índices espectrales NDVI, NBR y GEMI han sido re-escalados (x 100) para que alcancen un rango similar a los índices IAQ, BAIM1 y BAIM2.

En la Figura 4 se observa que las cubiertas vegetales (bosque, pastizal, cultivos y páramo) presentan un comportamiento espectral típico, con valores de reflectividad bajos en las bandas 3, 4 y 1 (visible) debido al efecto absorbente de los pigmentos foliares; altos en la banda 2 (infrarrojo cercano) debido a la reflexión de la radiación solar que producen en esta región las cavidades de aire internas de las hojas sanas y vigorosas; y medios en las bandas 5, 6 y 7 (infrarrojo medio de onda corta), relacionados con el contenido de agua de las plantas. El área quemada presenta los valores más bajos en todas las bandas debido en parte al efecto absorbente de los residuos de la combustión (carbón y cenizas). Se observan solapes evidentes entre áreas quemadas y cubiertas vegetales en las bandas del visible y también, aunque en menor medida, en la banda 7. Sin embargo la separabilidad es mayor en las bandas 2, 5 y 6 (NIR y SWIR). Se observa claramente cómo la confusión con otras cubiertas, especialmente con el páramo, aumenta en la imagen de noviembre (DOY 329), adquirida varios meses después de los incendios analizados, debido a las transformaciones que se producen en las áreas quemadas con el paso del tiempo y que incluyen habitualmente la desaparición de los materiales de combustión (carbón y cenizas) por efecto del viento y la lluvia; y la regeneración de la vegetación. Estas transformaciones hacen que la respuesta espectral de las áreas quemadas sea menos nítida y se asemeje más a otras cubiertas presentes en la imagen. Esto confirma la conveniencia de utilizar imágenes post-incendio adquiridas en fechas próximas a la ocurrencia de los incendios para realizar una adecuada discriminación y delimitación de las zonas afectadas. Esto sólo es posible en la zona de estudio si se utilizan imágenes procedentes de sensores de alta o muy alta resolución temporal tipo MODIS. En la misma Figura 4 vemos que tanto la categoría área urbana como la categoría nubes presentan un comportamiento espectral bastante diferenciado respecto a las áreas quemadas. Las nubes presentan valores de reflectividad muy altos y, aunque su variabilidad interna también es muy elevada, no existe riesgo de confusión con las áreas quemadas. Sin embargo, las sombras de nubes, no analizadas en este estudio, si han sido identificadas por diversos autores como áreas problemáticas de cara a la cartografía de incendios, pues presentan un comportamiento espectral muy similar a las zonas recientemente quemadas, especialmente en la región del visible. Esto mismo ocurre con las zonas de agua que presentan típicamente valores muy bajos de reflectividad en todo el espectro óptico por lo que el riesgo de confusión con zonas recientemente quemadas también es importante. En el caso de las láminas de agua el problema de la confusión espectral no es tan grave ya que, al ser zonas con una ubicación estable, pueden utilizarse máscaras, basadas por ejemplo en información obtenida de mapas de usos, para eliminarlas previamente del análisis y evitar así confusiones espectrales.

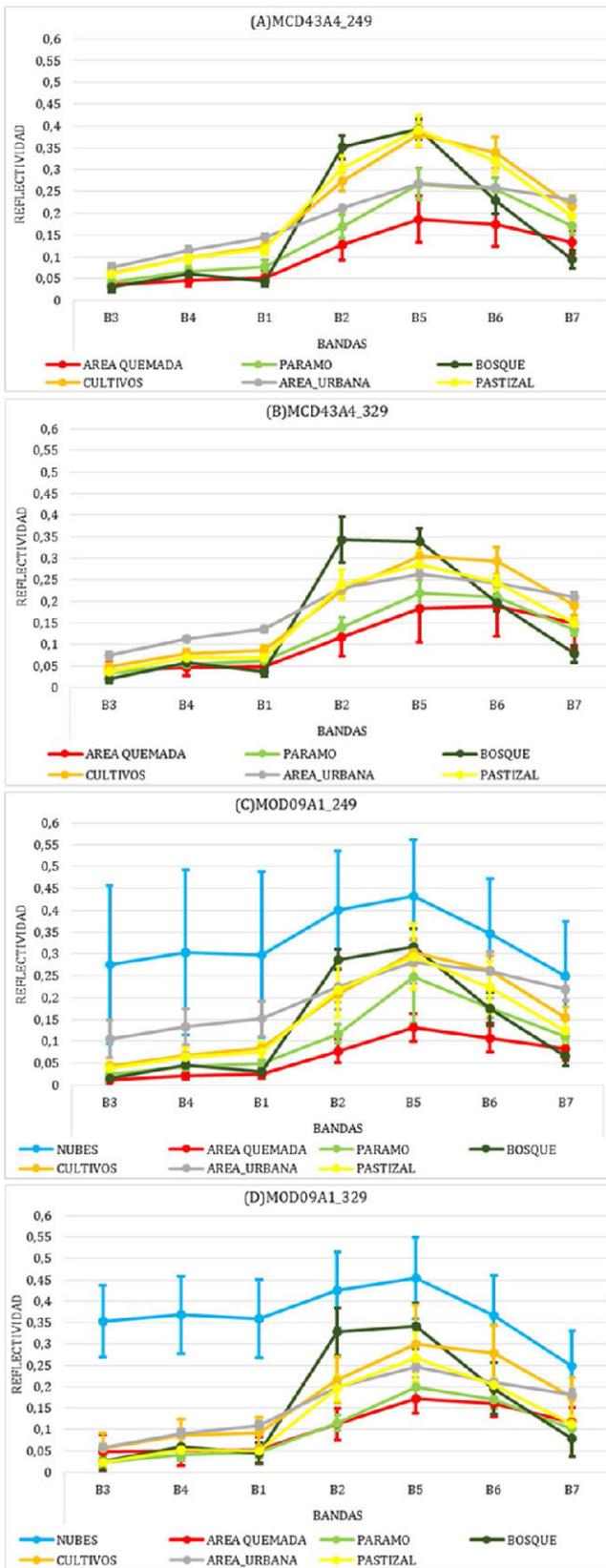


Figura.4 Caracterización espectral de las cubiertas analizadas para las 7 bandas originales.

- A) producto MCD43A4 de septiembre 2012 (día 249),
- B) producto MCD43A4 de noviembre 2012 (día 329),
- C) producto MOD09A1 de septiembre 2012 (día 249),
- D) producto MOD09A1 de noviembre 2012 (día 329)

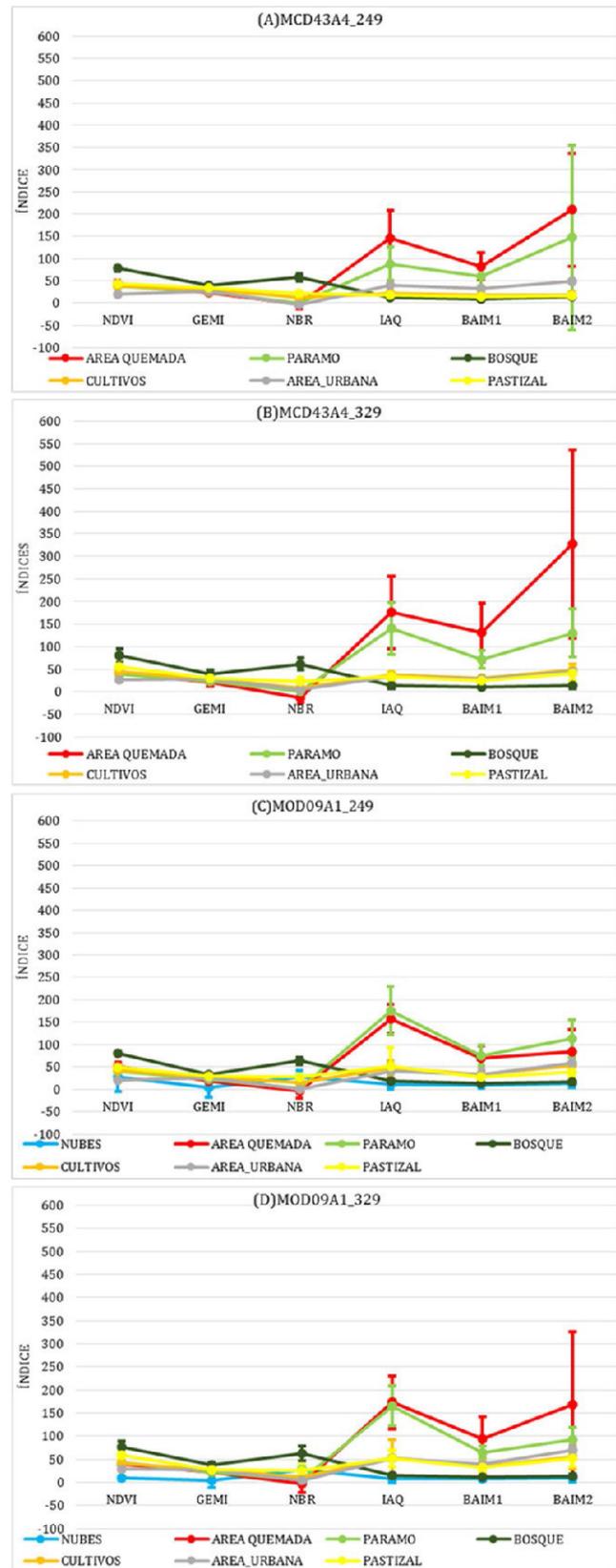


Figura.5 Caracterización espectral de las cubiertas analizadas para los 6 índices espectrales.

- A) producto MCD43A4 de septiembre 2012 (día 249),
- B) producto MCD43A4 de noviembre 2012 (día 329),
- C) producto MOD09A1 de septiembre 2012 (día 249),
- D) producto MOD09A1 de noviembre 2012 (día 329)

A simple vista, el comportamiento espectral de las distintas cubiertas es muy similar en los productos con y sin corrección del BRDF (MCD43A4 y MOD09A1 respectivamente). Sin embargo, parece observarse una mayor variabilidad interna de las cubiertas en el caso del producto MCD43A4, que podría dificultar la separabilidad espectral del área quemada respecto a otras cubiertas. Esto lo podremos confirmar a partir de análisis cuantitativo realizado con el índice de separabilidad que se comenta en la siguiente sección.

Como podemos observar en la Figura 5 el comportamiento de los índices estudiados, para las diferentes cubiertas vegetales, permiten identificar en una primera aproximación cualitativa, cuál de los seis índices presenta una mejor discriminación entre áreas quemadas y otras cubiertas. Para el producto MODIS MCD43A4 (Figura 5 A y B), el índice NDVI, permite una buena discriminación de las coberturas vegetales más vigorosas, en este caso el bosque, el cual no presenta solapamientos con respecto a otras coberturas, de igual manera sucede con el área urbana, debido a sus características espectrales, sin embargo las coberturas de páramo y cultivos no son bien discriminadas con este índice. Pudimos observar que los valores generados por este índice presentan solapamiento entre las coberturas cultivos, páramo, pastizales y el área quemada, lo cual concluye que este índice no discrimina el área quemada objeto de este estudio lo que corrobora lo ya mencionado en varios estudios (Pereira 1999). Lo mismo ocurre con el índice GEMI, con valores menores pero similares existiendo solapamiento, en especial con las cubiertas de cultivos, pastizales y área urbana. El bosque presenta puntos de confusión con las cubiertas mencionadas y, presenta de igual manera valores similares entre el área quemada y el páramo.

El índice NBR, presenta mejores resultados que los mencionados anteriormente, sin embargo la similitud en el comportamiento del páramo y el área quemada sigue presentándose como un problema para el estudio. Este índice sustituye la banda del rojo (banda 1) por la del infrarrojo medio de onda corta (banda 7) que, como vimos en la figura 4, presenta mejor separabilidad entre zonas quemadas y otras cubiertas. Sin embargo, la mayor separabilidad entre el páramo y el área quemada en la región del SWIR se observa en la banda 5 por lo que podría analizarse en futuros estudios la posibilidad de utilizar ésta en lugar de la banda 7, en la formulación del NBR.

Con respecto al producto MOD9A1, el comportamiento de los índices es similar al del producto con corrección del BRDF, no existe una variación notable, salvo que presenta una variabilidad interna menor, lo cual permitiría, en principio, una mejor separabilidad entre las cubiertas, esto considerando imágenes cercanas a la fecha de incendios.

Los índices IAQ, BAIM1 y BAIM2 presentan una buena separabilidad entre área quemada y otras cubiertas a excepción del páramo, que presenta valores similares a los de los incendios, especialmente en la imagen de septiembre. Una de las peculiaridades de estos índices es su alta variabilidad interna (elevada desviación típica) que influye negativamente en su capacidad de discriminación. Estos índices han sido creados para potencializar la presencia de carbón y cenizas en las bandas del infrarrojo medio de onda corta. Sin embargo, como se pudo observar en la Figura 4, de las tres bandas SWIR de MODIS (5, 6 y 7), esta última presenta la peor discriminación con respecto a las otras dos bandas. Aunque los autores que propusieron estos índices utilizaron la banda 7 con el propósito de, mejorar la discriminación con respecto a sombras y agua, consideramos que, en este caso, sería posible contemplar la utilización de la banda 5 (para productos MODIS que

provengan del sensor AQUA) o la banda 6 (para productos del sensor TERRA), esto debido al bandeado ya explicado, para mejorar los resultados de estos índices.

La Figura 5B nos muestra que el producto MCD43A4, parece ofrecer una discriminación mayor de las diferentes cubiertas, en comparación con el producto MOD09A1 (Figura 5D) lo que indicaría que a este es más adecuado para la cartografía de incendios en la zona cuando no se cuenta con imágenes recientes respecto a la fecha del incendio.

Como veíamos en el caso de las bandas originales, también los índices permiten discriminar sin problema la cubierta nubosa respecto al área quemada debido a que ambas presentan un comportamiento espectral muy diferenciado.

B. ANÁLISIS DE SEPARABILIDAD ESPECTRAL

En las Tablas. 6 y 7 se muestran los valores de separabilidad M obtenidos para cada cobertura y cada banda/índice en los dos productos y fechas analizados. En general, podemos decir que los valores de M mayores de 1 indican una buena separabilidad espectral, mientras que los valores menores de 1 representan una importante superposición de los histogramas de las dos clases que se comparan (en este caso áreas quemadas frente a otras cubiertas). En las tablas hemos resaltado en color verde la mayor separabilidad para cada cubierta y en el color rojo los valores más bajos de separabilidad.

Los valores de índice M obtenidos confirman los resultados cualitativos previamente comentados en los gráficos de separabilidad. En general, existe una buena separabilidad espectral entre las zonas quemadas y el resto de cubiertas de la imagen excepto para la cubierta páramo, que presenta los valores más bajos de M, en algunos casos inferiores a 1, especialmente en el producto MCD43A4. La separabilidad de esta cubierta se reduce considerablemente en la imagen de noviembre (DOY 329), donde el páramo presenta siempre valores de M inferiores a 1, es decir, no es espectralmente diferenciable de las áreas quemadas. Esto refuerza la necesidad de contar con imágenes recientes post-incendio para realizar una adecuada discriminación de las áreas quemadas. Esto es especialmente importante en la zona de estudio, donde las áreas de páramo son unas de las más sensibles a la ocurrencia de incendios.

Las otras dos cubiertas de vegetación natural consideradas en este estudio presentan valores de separabilidad aceptables, especialmente en las bandas 2 y 5 (NIR y SWIR) siendo, en general, más altos los valores de separabilidad para el bosque que para el pastizal. Los valores de separabilidad también disminuyen en la imagen de noviembre pero siguen manteniéndose por encima de 1 en la banda del NIR y en la mayor parte de los índices espectrales.

Los cultivos presentan valores de separabilidad similares a los del pastizal, mientras que las áreas urbanas ofrecen también valores de separabilidad altos, especialmente en la región del visible.

En la imagen MCD43A4 para la fecha de septiembre (DOY 249) la banda 2 (NIR) presenta la mejor separabilidad con respecto al área quemada para la mayor parte de las cubiertas analizadas, salvo en el caso del páramo y el área urbana. Para la imagen del mes de noviembre del producto MCD43A4, sin embargo, en general el índice NBR, presenta el valor más alto de separabilidad. Esto indica que los índices espectrales ayudan a realzar la respuesta espectral de las áreas quemadas cuando ésta resulta ya más débil debido al tiempo transcurrido desde el inicio del incendio hasta la adquisición de la imagen.

Esto debe tenerse en cuenta de cara a un posible uso operativo de las imágenes MODIS para la cartografía de incendios en el Ecuador

El análisis del producto MOD09A1, muestra que, en general, los índices espectrales presentan mejor separabilidad que las bandas originales, especialmente en el caso del IAQ. Estos resultados no coinciden con los de otros autores, donde los índices basados en el NIR-SWIR mejoran los resultados respecto a los que utilizan ROJO-NIR, como el IAQ. Esto puede deberse a que, en la zona de estudio, la banda 7, utilizada en el cálculo de los índices NIR-SWIR (NBR, BAIM1 y BAIM2) presentan valores de separabilidad relativamente bajos comparados con otras bandas del SWIR como la banda 5 o la 6. Esto sugiere la posibilidad de proponer, en trabajos futuros, una modificación de estos índices basada en el uso de estas bandas en lugar de la banda 7. No obstante debe tenerse en cuenta, como ya hemos comentado, que la banda 5 presenta un problema de bandeo en el sensor MODIS-TERRA y la banda 6 en el sensor MODIS-AQUA por lo que habrá de utilizarse una u otra en función del origen de los datos utilizados. También es interesante constatar que el BAIM1 ofrece siempre mejores valores de separabilidad que el BAIM2 por lo que podemos deducir que el punto de convergencia del NIR= 0,04 se adapta mejor a las características de la zona de estudio. Esto sugiere también la posibilidad de adaptar los puntos de convergencia de este índice para realizar la cartografía de áreas quemadas en Ecua-

dor. Para ello se podría analizar una serie más larga de datos, incluyendo otros incendios que permitan confirmar cuál es el comportamiento espectral tipo de los incendios en el Ecuador

Si comparamos los valores de separabilidad promedio obtenidos para los productos MCD43A4 y MOD09A1 vemos que los resultados son muy similares. Para el producto MOD09A1 se calculó el valor medio para todas las cubiertas, y también sin considerar la cobertura de nubes para hacerlo más comparable a la media obtenida para el producto MCD43A4. De la comparación de estos valores observamos que la separabilidad media es ligeramente superior en el producto MOD09A1 en la imagen de septiembre pero es inferior en la de noviembre. Esto podría indicar que la corrección del BRDF aplicada al producto MCD43A4 realza mejor la separabilidad espectral entre el área quemada y otras cubiertas cuando la señal post-incendio es menos nítida debido al tiempo transcurrido desde la ocurrencia del incendio a la adquisición de la imagen.

La Figura 6 muestra de forma gráfica los valores de separabilidad de las Tabla. 6 y Tabla. 7, en la cual podemos comparar más fácilmente el comportamiento global de cada banda/índice, con respecto a cada cubierta, producto y fecha.

Resulta evidente que los valores de separabilidad disminuyen notablemente conforme nos alejamos de la fecha del incendio, esto debido a la pérdida de contenido de carbón y ceniza en el área quemada.

TABLA VI.
VALORES DE SEPARABILIDAD M CALCULADOS PARA LAS IMÁGENES MCD43A4

COBERTURA VEGETAL		NUBES		PARAMO		BOSQUE		CULTIVOS	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	1,37	2,51	1,39	0,14	0,27	0,15	2,99	0,58
	B2	2	2,5	0,79	0,06	4,13	2,34	2,8	1,14
	B3	1,41	2,44	1,16	0,46	0,3	0,36	2,94	0,1
	B4	1,44	2,54	1,39	0,22	1,45	0,17	3,19	0,48
	B5	1,87	2,14	0,83	0,42	2,54	1,91	2,75	1,02
	B6	1,51	1,65	1,25	0,15	0,93	0,38	2,29	1,21
	B7	1,09	1,15	0,68	0,33	0,36	0,52	1,39	0,72
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	0,6	1,91	0,75	0,21	2,19	1,67	0,77	0,13
	GEMI	0,58	0,96	1,12	0,07	3,5	2,05	2,98	1,17
	NBR	1,05	1,02	0,19	0,31	2,8	1,81	0,85	0,51
	IAQ	3,24	2,51	0,21	0,07	3,9	2,6	2,22	1,24
	BAIM1	1,72	1,63	0,13	0,49	1,97	1,67	1,14	0,99
	BAIM2	1,19	0,97	0,33	0,42	1,31	0,98	0,53	0,63
COBERTURA VEGETAL		ÁREA URBANA		PASTIZAL		MEDIA		MEDIA SIN NUBES	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	2,54	1,37	1,58	0,05	1,69	0,8	1,76	0,46
	B2	1,86	2	1,58	1,3	2,19	1,56	2,23	1,37
	B3	1,93	0,19	1,21	0,5	1,5	0,68	1,52	0,32
	B4	2,27	0,91	1,55	0,05	1,88	0,73	1,97	0,37
	B5	1,84	1,54	1,53	0,99	1,89	1,34	1,9	1,17
	B6	1,98	1,24	1,26	0,9	1,54	0,92	1,54	0,78
	B7	2,6	1,37	0,68	0,07	1,14	0,7	1,14	0,6
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	2,68	0,62	0,21	1,06	1,2	0,93	1,32	0,74
	GEMI	2,3	1,88	1,61	1,19	2,01	1,22	2,3	1,27
	NBR	0,17	0,28	1,42	0,91	1,08	0,81	1,09	0,76
	IAQ	2,37	1,96	1,43	1,63	2,23	1,67	2,02	1,5
	BAIM1	0,91	1,08	1,16	1,06	1,17	1,15	1,06	1,06
	BAIM2	0,35	0,61	0,73	0,67	0,74	0,71	0,65	0,66

TABLA VII.
VALORES DE SEPARABILIDAD M CALCULADOS PARA LAS IMÁGENES MOD09A1

COBERTURA VEGETAL		PARAMO		BOSQUE		CULTIVOS	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	0,88	0,5	0,25	0,43	2,46	1,31
	B2	0,64	0,32	3,5	2,3	2,49	1,68
	B3	0,37	0,22	0,38	0,66	1,87	0,34
	B4	0,81	0,34	0,72	0,4	2,34	1,29
	B5	0,91	0,34	2,72	1,45	2,44	1,14
	B6	1,07	0,21	0,67	0,08	1,91	1,02
	B7	0,79	0,21	0,85	0,91	1,63	0,51
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	0,58	0,12	2,59	1,18	0,57	0,13
	GEMI	0,7	0,18	3,28	1,02	2,3	0,7
	NBR	0,13	0,91	3,27	3,31	1,03	1,32
	IAQ	0,6	0,26	2,15	1,89	1,91	1,57
	BAIM1	0,44	0,7	2,31	1,75	1,91	1,44
	BAIM2	0,18	0,76	1,5	1,46	1,42	1,27
COBERTURA VEGETAL		ÁREA URBANA		PASTIZAL		MEDIA	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	3,85	3,58	2,22	0,82	1,93	1,33
	B2	1,98	1,99	2,68	1,52	2,26	1,56
	B3	2,76	1,3	1,45	0,12	1,37	0,53
	B4	3,22	2,83	2,05	1	1,83	1,17
	B5	1,42	0,92	2,34	0,95	1,97	0,96
	B6	1,46	0,65	1,87	0,62	1,4	0,52
	B7	2,96	0,87	1,3	0,01	1,51	0,5
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	2,52	0,74	0,01	0,54	1,25	0,54
	GEMI	1,15	0,62	2,37	0,72	1,96	0,65
	NBR	0,12	1,49	1,6	1,84	1,23	1,78
	IAQ	1,68	1,68	1,99	1,56	1,67	1,39
	BAIM1	1,56	1,51	2,04	1,45	1,65	1,37
	BAIM2	1,22	1,31	1,46	1,28	1,16	1,22

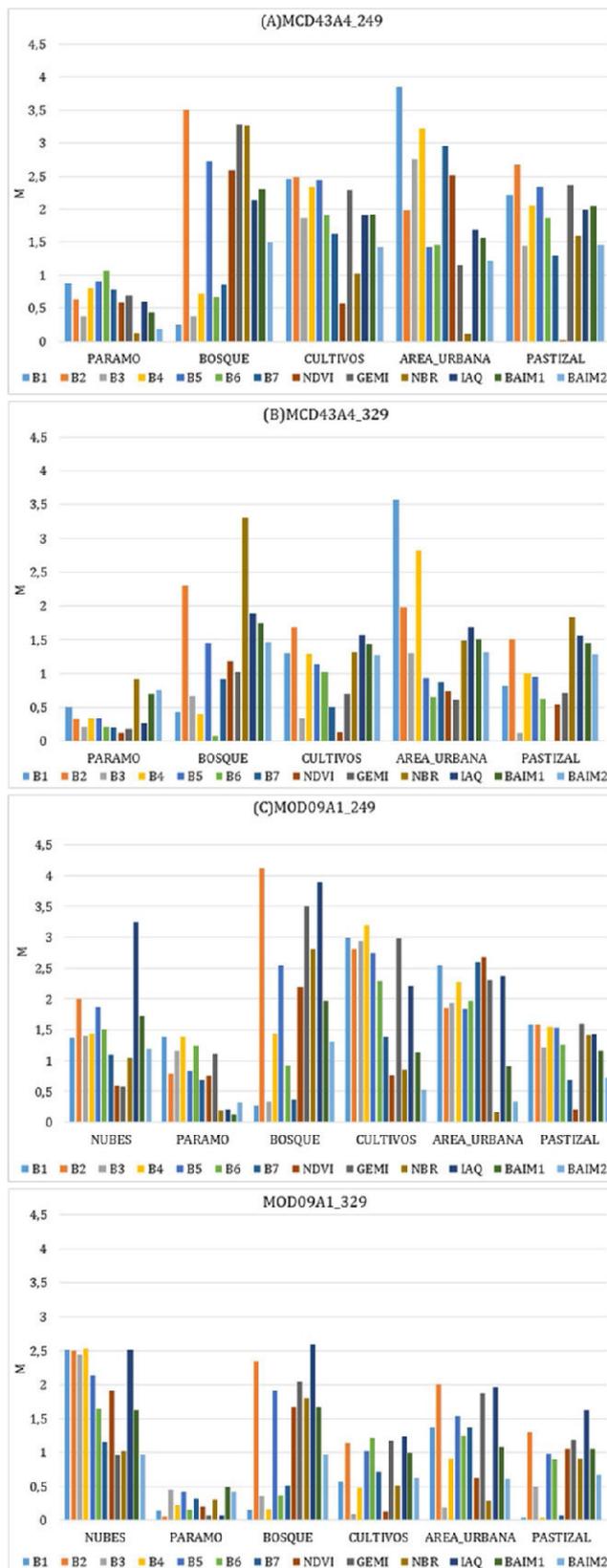


Figura.6 Valores de separabilidad M de las cubiertas analizadas con respecto al área quemada.

- A) producto MCD43A4 de septiembre 2012 (día 249),
- B) producto MCD43A4 de noviembre 2012 (día 329),
- C) producto MOD09A1 de septiembre 2012 (día 249),
- D) producto MOD09A1 de noviembre 2012 (día 329)

En el presente estudio se han analizado los factores más importantes relacionados con la definición de una metodología operativa para la cartografía de incendios forestales en Ecuador a partir de teledetección. Estos factores se refieren al tipo de imágenes, productos, fechas y bandas/índices más adecuados para discriminar espectralmente las áreas quemadas de otras cubiertas naturales y artificiales.

El alcance del presente estudio ha estado limitado por dos factores ajenos al mismo: en primera instancia por la cobertura de nubes existente en las fechas en las que se presenta la época de incendios forestales en la zona de estudio que ha dificultado la obtención de imágenes; en segundo lugar por el tamaño de los incendios ya que la escala a la cual se trabaja con los productos MODIS no permite discriminar incendios pequeños, por lo cual fue preciso ampliar la zona de estudio con el fin de obtener información de siniestros de mayor tamaño.

IV. CONCLUSIONES

Respecto a la selección de imágenes. En el estudio se ha puesto de manifiesto la imposibilidad de abordar la cartografía de incendios en Ecuador mediante imágenes de resolución espacial media-alta del tipo Landsat. La elevada cobertura nubosa impide obtener una serie de imágenes adecuada para esta aplicación desde el punto de vista espacial y temporal. La alternativa más conveniente es recurrir a imágenes de resolución espacial media-baja y temporal alta tipo MODIS. Este tipo de imágenes tienen una frecuencia temporal y resolución espectral adecuada para la cartografía de incendios aunque su resolución espacial limita las posibilidades de obtener información de áreas quemadas sólo para los incendios de mayor tamaño (> 100 ha). En general estos grandes incendios son los que producen mayores pérdidas ambientales y económicas por lo que el interés de obtener una cartografía sistemática y actualizada de estos eventos es evidente.

Respecto a la selección de productos MODIS. Los resultados indican que los productos con y sin corrección del BRDF ofrecen resultados muy similares en cuanto a su capacidad para discriminar áreas quemadas cuando se analizan imágenes adquiridas inmediatamente después de la ocurrencia del incendio. Sin embargo el producto MCD43A4 parece más recomendable cuando se recurre a imágenes adquiridas varios meses después del incendio.

En lo que se refiere a la selección temporal de las imágenes para la cartografía de áreas quemadas, los resultados obtenidos muestran claramente el interés de contar con imágenes adquiridas en fechas lo más próximas posible a la ocurrencia de los incendios, debido a que, con el tiempo, existe una pérdida de los depósitos de carbón y cenizas, dificultando la discriminación de áreas quemadas. Por lo tanto, para una metodología operativa se recomienda analizar todas las imágenes libres de nubes disponibles a lo largo de la estación de incendios.

Por último, en lo que respecta a la información espectral más adecuada para realizar la cartografía, este estudio concluye que las bandas NIR y SWIR son las más adecuadas para la discriminación de áreas quemadas respecto a otras cubiertas de la imagen. Sin embargo, la banda 7 de MODIS presenta una menor separabilidad que las bandas 5 y 6 por lo que se podría plantear el uso de estas bandas en nuevas propuestas de índices adaptados a las características de la zona de estudio. Por la ubicación de los incendios, principalmente en zonas de páramo, existe dificultad al momento de discriminar éstas co-

berturas, por lo que podrían también utilizarse los resultados obtenidos en este trabajo para definir índices específicos que permitan discriminar mejor este tipo de cubierta.

La escasa información existente con respecto a los incendios forestales en la zona de estudio no permitió realizar una cartografía y validación de los resultados obtenidos. Sin embargo, consideramos que los hallazgos metodológicos de este

trabajo servirán de base para posteriores estudios que aborden el análisis de series temporales más largas y zonas más extensas que permita demostrar la posibilidad de utilizar las imágenes MODIS para realizar un seguimiento de la ocurrencia de incendios en Ecuador complementando la información facilitada por las fuentes oficiales.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme las fuerzas que se necesitan para seguir con paso firme por este camino que es la vida.

A la Doctora María del Pilar Martín, por el apoyo incondicional y la transferencia de conocimientos que ha permitido llegar a los objetivos planteados.

Al Ing. Omar Delgado, por su apoyo, tiempo y consideración para lograr culminar con este trabajo de tesis.

A Juan Pablo, mi esposo, por su apoyo constante y por impulsarme siempre a ser mejor.

REFERENCIAS

Chuvieco, E. et al., 2006. Cartografía global de áreas quemadas en América Latina: experiencias del proyecto AQL2004. XII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica; Cartagena - Colombia. Available at: http://quemadas.cptec.inpe.br/~rquemadas/documentos/200609_chuvieco_etal_aql2004_12selper_cartagena.pdf.

García-Mora, T.J. & Mas, J.F., 2011. Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), pp.83-94.

González, D., Quintano Pastor, C. & Shimabukuro, 2009. Análisis de imágenes basado en objetos aplicado a imágenes fracción derivadas del sensor MODIS para cartografiar áreas quemadas en la cuenca Mediterránea. *Anais do XIV Simposio Brasileiro de Sensoramento Remoto - SBSR, Natal-RN*, (978-85-17-00044-7), pp.2737-2743. Available at: <http://mar.tecn.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/10.20.21.29/doc/2737-2743.pdf>.

González, F. & Merino, S., 2009. Estimación de Superficies Quemadas Mediante Teledetección: Los Incendios de Galicia de Agosto 2006. *Actas de las I Jornadas Técnicas SIGTEFOR*, Sociedad Española de Ciencias Forestales, 29(1575-2410), pp.39-47. Available at: seforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/article/.../1086.

Groot, W.J. De, Flannigan, M.D. & Stocks, B.J., 2012. El Cambio Climático y los Incendios. *Memorias del Cuarto Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Incendios Forestales: Cambio Climático e Incendios Forestales*, pp.1-12. Available at: http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr245/es/psw_gtr245_001.pdf.

Heredia Laclaustra, A. et al., 2003. COMPARACIÓN DE DISTINTAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DIGITAL PARA LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS CON IMÁGENES LANDSAT ETM+. *Geofocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (1578-5157), pp.216-234. Available at: http://geofocus.rediris.es/docPDF/Articulo12_2003.pdf.

Matín, P., Díaz Delgado, R. & Chuvieco, E., 2002. Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS. *Proceedings: Forest fire*, pp.1-9. Available at: http://www.ebd.csic.es/ricardo/publi/Martin_etal_2002.pdf.

Pavón, P.O. & Rodríguez-Verdú, F., 2006. Cartografía de área quemada.

Pereira, J.M.C., 1999. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1 PART 1), pp.217-226.

Saldivia, S.O. & Salinero, E.C., 2007. Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas. , pp.27-43.

Santis, A. De & Vaughan, P., 2009. Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. *IBADER: Instituto de Biodiversidad de Agraria e Desenvolvimento Rural*, 5(1885-5547), pp.93-100. Available at: <http://hdl.handle.net/10347/3819>.

Valenzuela, J.G. et al., 2008. Detección y cuantificación de área quemada por incendios forestales utilizando geomática. *Ambiencia*, 4(2175-9405), pp.107-122. Available at: <http://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/279/372>.

Verdú, F. & Salas, J., 2010. CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS MEDIANTE ANÁLISIS VISUAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN LA ESPAÑA PENINSULAR PARA EL PERÍODO 1991- 2005. *Geofocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 10(1578-5157), pp.54-81. Available at: http://geofocus.rediris.es/2010/Articulo3_2010.pdf.

Fallah Ghalhari, G. A., Dadashi Roudbari, A. A., & Asadi, M. (2016). Identifying the spatial and temporal distribution characteristics of precipitation in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(12), 595. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2606-4>

Wang, X. L., Chen, H., Wu, Y., & Feng, Y. (2010). New Techniques for the Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2416-2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>

Zhang, X., & Srinivasan, R. (2009). GIS-Based Spatial Precipitation Estimation: A comparison of Geostatistical approaches, 45(4), 894-906.

Análisis delictivo en el cantón Cuenca, Ecuador, aplicando técnicas espaciales apoyadas por SIG libre

Bravo López, Paúl Esteban

Department of Geoinformatics/Universidad de Salzburgo
Santiago/Región Metropolitana/
Chile
paulbravolopez7@gmail.com

RESUMEN

El análisis del crimen comprende una serie de enfoques; de ellos, el espacial es muy importante ya que destaca la importancia de la ubicación donde ocurre un delito. Por esta razón, las instituciones involucradas en temas de seguridad deben contar con métodos que incluyan esta clase de análisis, con el fin de mejorar su trabajo operativo.

Esta investigación abarca el análisis espacial de diferentes delitos ocurridos en el cantón Cuenca, Ecuador a nivel urbano y rural, durante el año 2015 mediante la aplicación de diferentes técnicas que permiten detectar la distribución de los datos y la existencia de concentración de delitos utilizando software libre y destacando la importancia de los Sistemas de Información Geográfica para el análisis del crimen.

La metodología aplicada, se basa en un estudio teórico de técnicas espaciales útiles para el análisis delictivo como Media aritmética espacial, Elipse de desviación estándar, Análisis por agrupación, Análisis del vecino más cercano y Kernel Density Estimation junto con el software utilizado; además de todas las etapas que deben cumplirse imprescindiblemente para la obtención de análisis confiables y verídicos. Estas etapas contienen varios aspectos importantes como la obtención de información confiable, la transformación espacial de esa información y la elaboración de los resultados finales que se presentan mediante mapas, los cuales plasman las diferentes técnicas de análisis investigadas.

Los resultados obtenidos, permiten detectar las zonas de la ciudad y parroquias rurales que presentan mayores índices delictivos, los cuales se corroboran al aplicar diversas técnicas. Es importante mencionar que a nivel urbano dichas zonas se concentran alrededor de sitios donde existe concentración de gente como plazas, parques, centros comerciales y de transporte y a nivel rural en parroquias cercanas al área urbana del cantón.

Palabras clave: **Análisis espacial, Análisis del crimen, Hot Spot, Software libre, Cuenca.**

ABSTRACT

Crime analysis includes a number of approaches. Among them, the spatial one is very important since it emphasizes the importance of the location where a crime occurs. For this reason, the institutions involved in security issues should have methods that include

this type of analysis, in order to improve their operational work.

This research covers the spatial analysis of different crimes occurring in the canton Cuenca, Ecuador at urban and rural level, during the year of 2015, through the application of different techniques to detect the distribution of data and the existence of concentration of crimes, using free software and highlighting the importance of Geographic Information Systems for the analysis of crime.

The applied methodology is based on a theoretical study of useful spatial techniques for criminal analysis such as Mean Center, Standard Deviation Ellipse, Cluster Analysis, Nearest Neighbor Index and Kernel Density Estimation together with the software used; in addition to all common stages that must be fulfilled and which are essential for obtaining reliable and veridical analyzes. These stages contain several important aspects such as obtaining reliable information, spatial transformation of this information and the elaboration of the final results that are presented through maps, which reflect the different techniques of investigated analysis.

The obtained results allow detecting the zones of the city and rural parishes that present high criminal indices, which are corroborated when applying diverse techniques. It is important to mention that, at the urban level, these areas are concentrated around places where there is concentration of people such as squares, parks, shopping centers and transport centers and, at a rural level, in parishes near the urban area of the canton.

Keywords: Spatial analysis, Crime analysis, Hot Spot, Free Software, Cuenca.

I. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos la delincuencia ha sido asociada con el espacio. Ruiz García (2012) menciona que autores que datan del siglo XVIII como Henry Fielding, Patrick Colquhoun y Bernard Mandeville describieron características inherentes de la criminalidad que se refieren principalmente a ámbitos sociales y espaciales.

Akpınar y Usul (2004) afirman que la distribución de incidentes criminales en el espacio no se da en forma geográficamente aleatoria, ya que estos incidentes son fenómenos humanos; y por ello, para que un incidente ocurra, el delincuente y su víctima deben estar en la misma ubicación en un periodo de tiempo. Esto permite afirmar la importancia de conocer la localización de los diferentes actos delictivos en un centro poblado.

Con el paso del tiempo, el surgimiento de nuevas herramientas ha posibilitado perfeccionar las diferentes técnicas de análisis del crimen, principalmente mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), llegando a implementarse la denominada "geografía del crimen" a través de varios estudios que involucran otras ciencias sociales como Psicología y Sociología (Ruiz García, 2012).

La investigación se realizará con información delictual de sucesos registrados en el cantón Cuenca, uno de los más importantes de Ecuador, el cual se ha visto afectado por actos criminales que alteran la tranquilidad de sus habitantes. Dentro de este, existen sectores "tradicionalmente" peligrosos que son evitados por la ciudadanía para la realización de diferentes actividades.

El objetivo principal de la investigación consiste en analizar espacialmente las muertes violentas y robos - hurtos a domicilios, personas y vehículos ocurridos en el cantón Cuenca, Ecuador a nivel urbano y rural durante el año 2015, y del cual se derivan objetivos específicos como la identificación de los sectores con mayor índice delictivo del cantón en estudio dentro de la zona urbana; la determinación de las parroquias rurales del cantón en estudio con mayor incidencia delictiva y la evaluación de las principales herramientas de software libre útiles para su aplicación en análisis de actos delictivos.

Lo mencionado anteriormente permitirá a las instituciones competentes contar con una metodología de trabajo útil para sus procesos de combate a la delincuencia.

Finalmente, es importante mencionar que se cuenta con varios trabajos previos de temas similares, sin embargo, la investigación realizada por Alberto Ruiz García (2012) "SIG Crimen y Seguridad", es destacable, ya que contiene una metodología similar a la descrita en este trabajo, pero aplicada a la ciudad de Madrid, España y con la utilización de diferente software SIG.

II. MÉTODO

El proceso metodológico inicia con la selección de datos delictivos, para con ellos elaborar las estadísticas globales y aplicar las técnicas de análisis espacial que permitan verificar la existencia de clusters, implementar densidades y determinar las parroquias rurales con mayor índice delictivo; para finalmente elaborar los mapas que permitan verificar los resultados y plantear una metodología de trabajo que pueda ser utilizada por las instituciones involucradas en asuntos de seguridad ciudadana.

Para la obtención de mejores resultados, es importante contar con algunos datos referentes a la zona de estudio, los cuales se resumen en la Tabla I:

TABLA I

Definición de valores específicos para la realización de análisis de acuerdo a la zona urbana de Cuenca.

PARÁMETRO	VALOR
Longitud de calles de la zona urbana)	1.253.833,52319 m.
Área de la zona urbana	76.369.938,29107 m ²
Coordenadas del punto inferior izquierdo	X: 714.265 Y: 9.675.306
Coordenadas del punto superior derecho	X: 734.271 Y: 9.687.848

Para determinar el índice delictivo, es necesario basarse en datos que permitan conocer donde éstos se han cometido. El método más utilizado para registrar la ocurrencia de un delito es la denuncia, las cuales son receptadas principalmente por

la Fiscalía General que cuenta con sedes en todas las provincias del país. Estos datos en formato no espacial deben ser georreferenciados para brindarles el enfoque espacial necesario y poder trabajarlos en un SIG.

Además es importante mencionar que, dada la gran extensión de las parroquias rurales, los procedimientos de georreferenciación que se realizan en ellas no presentan gran precisión, por ello el análisis en esta clase de parroquias se basa en conocer la frecuencia de ocurrencia de los delitos analizados para determinar cuáles presentan un mayor índice delictivo. A nivel urbano, la situación es diferente, ya que se cuentan con capas de calles, predios, manzanas, edificios, entre otras, que permiten ubicar de una mejor manera los diferentes actos delictivos dentro de la ciudad; por ende los análisis realizados en esta investigación se enfocan mayoritariamente en el área urbana del cantón en estudio.

A continuación se describen de forma breve cada uno de los análisis realizados en esta investigación.

ESTADÍSTICAS GLOBALES: Las estadísticas principales determinadas fueron Mean Center (MC) y Standard Deviational Elipse (SDE), los cuales son los análisis más simples, pues no implicaron realizar procedimientos largos ni complejos. Es válido recalcar que el MC es el punto en el que la distribución que se encuentra en equilibrio, es decir es el "centro de gravedad" de la distribución de datos y la SDE describe la distribución espacial del conjunto de datos, dando a conocer su dispersión y orientación la cual se calcula alrededor del MC y abarca aproximadamente el 68 % de los casos.

VERIFICACIÓN DE CLUSTERS: Los agrupamientos o clusters fueron detectados aplicando la técnica Nearest Neighbor Hierarchical Clustering (NNH) mediante convex hulls: polígonos que contienen un cierto número de puntos del conjunto de datos analizado. La razón por la que se utilizó esta técnica fue debido a que permitió detectar agrupaciones de delitos, e identificar los sectores más críticos.

Es elemental mencionar que según la cantidad de datos, será la extensión del polígono generado; con muchos datos los polígonos serán pequeños, debido a que estos no están demasiado dispersos, pero con pocos datos, la dispersión entre ellos aumenta y se generan polígonos más grandes. Para una mejor comprensión de lo antes mencionado se adjunta la Figura 1:

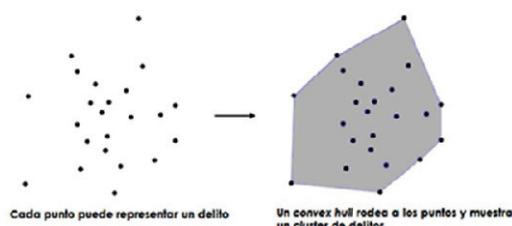


Figura 1: Ilustración de convex hulls aplicados al análisis delictivo.

En este sentido, es importante definir algunos conceptos referentes a esta técnica, que van a permitir entender los resultados obtenidos de mejor manera.

Nearest Neighbor Index: Índice de vecino más cercano; según Levine (2013), este índice permite determinar la distancia media entre sucesos comparándola con la que se esperaría si dichos sucesos se distribuyeran de manera aleatoria. Los valores que puede tomar este índice varían entre -1 y 1 y su significado es:

Valores menores a 1: indican que los sucesos se encuentran más concentrados de lo que se espera en una distribución aleatoria.

Valores cercanos a 1: indican que los hechos se distribuyen de manera aleatoria.

Valores mayores a 1: los sucesos se encuentran más dispersos de lo que se espera en una distribución aleatoria.

Average Density (Densidad promedio): Es el número de incidentes divididos para el área, es decir el número promedio de incidentes por unidad de área, en este caso metros cuadrados. Esta densidad también es conocida como Intensity (Levine, 2013). Para obtener resultados más precisos, es importante ingresar el área de la zona de estudio, la misma que se especificó en la Tabla I.

Los valores de Mean Nearest Neighbor y Minimum Distance también permitieron determinar qué tan agrupados estuvieron los eventos analizados.

ANÁLISIS DE DENSIDAD: La realización de este análisis se basa principalmente en la técnica Kernel Density Estimation (KDE), cuyo propósito es estimar la intensidad de puntos en un sector determinado. Esta intensidad se define como una densidad de puntos limitante, es decir número de puntos por unidad de área. Generalmente esta estimación se realiza en un grid de puntos que cubren el área de estudio y con base en las estimaciones de intensidad realizadas en estos puntos se genera una superficie de intensidad (Rogerson y Yamada, 2008).

Según Eck et al. (2005), la generación de superficies raster para el análisis de hot spots permite una interpretación más fácil de los patrones espaciales del crimen en comparación a otras técnicas, mostrando con una mejor precisión la distribución y ubicación de las áreas con alto índice delictivo.

Esta técnica es popular debido a que permite representar de una forma visualmente atractiva una distribución espacial; además se considera como un método preciso comparada con otras técnicas de detección de hot spots (Chainey, 2013) y según Elmes, Roedel y Conley (2014) es quizás la técnica más utilizada para la visualización de hot spots debido a su altas capacidades de predicción.

Según Chainey (2013), la manera más usual de representar geográficamente incidentes criminales es mediante puntos. KDE se aplica en dichos puntos para obtener una superficie de suavizado que representa la densidad de la distribución de puntos. En términos matemáticos KDE se expresa con la ecuación [1]:

$$f(x, y) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{d_i}{h}\right) \quad (1)$$

Donde $f(x,y)$ es el valor de la densidad en la ubicación (x,y) , n es el número de incidentes/puntos, h es el valor de ancho de banda, d_i es la distancia geográfica entre el incidente i y la ubicación (x,y) y k es la función de densidad conocida como Kernel (Chainey, 2013).

Otro aspecto que se debe destacar en KDE es la selección de dos parámetros sumamente importantes que son el ancho de banda y el tamaño de celda ya que estos serán determinantes para los resultados que se van a obtener.

De acuerdo a diversos estudios, Chainey (2013) llegó a la conclusión de que el tamaño de celda tiene un impacto pequeño en el resultado final, ocurriendo lo contrario con el tamaño del ancho de banda. El mismo autor afirma que mientras más

pequeño es el tamaño de la celda, se requiere más procesamiento computacional debido al mayor número de cálculos que se realizan. Mientras que, con anchos de banda más pequeños mejor será la capacidad del KDE para predecir patrones espaciales del crimen (Chaïney, 2013).

Al ser el ancho de banda un aspecto crítico, además de que varios autores tienen criterios diversos respecto a su elección; Moreno (2005) sugiere que dicha elección se realice según estos tres enfoques:

- Elegirlos subjetivamente ensayando con varios valores de ancho de banda y escogiendo el valor que ayude a expresar de mejor forma el mensaje que se desea transmitir.
- Asumiendo que una distribución conocida subyace a los datos
- Mediante métodos automáticos de obtención, lo cual no es aconsejable.

Es válido destacar que una de las grandes ventajas de esta técnica es su precisión a la hora de localizar y definir los límites de los hot spots, por lo que se la puede considerar como una excelente herramienta para la detección de zonas urbanas conflictivas que permita a las instituciones competentes ubicar las zonas de mayor incidencia delictiva y tomar las medidas respectivas (Ruiz García, 2012).

DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DELICTIVO A NIVEL RURAL: La determinación de parroquias rurales con mayor índice delictual, se realizó mediante mapas de coropletas, los cuales reflejaron las parroquias con mayor cantidad de delitos registrados, pudiendo identificarlas según una gama de colores establecida. La gama de colores cambió según la cantidad de datos analizados por cada tipo de delito.

La presentación de estos mapas puede ser muy general, debido a la dificultad que representa georreferenciar con certeza los datos en la zona rural; sin embargo brindaron información que permitió saber donde existió más concentración de los diferentes tipos de delitos. En este sentido es importante mencionar que esta determinación también puede realizarse a nivel de parroquias urbanas, sin embargo no fue necesario, pues las técnicas descritas anteriormente permitieron analizar de manera más precisa la zona urbana.

HERRAMIENTAS UTILIZADAS: Como se mencionó anteriormente, es importante diferenciar la aplicación de las diferentes técnicas a nivel urbano o rural, por ello la Tabla II, muestra la aplicación de las diferentes herramientas de software aplicadas, las cuales son netamente libres:

TABLA II

Definición de los diferentes análisis realizados.

PROCEDIMIENTO - ANÁLISIS	DIVISIÓN ADMINISTRATIVA	SOFTWARE A UTILIZAR
Estadísticas globales (MC - SDE)	Zona urbana	CrimeStat IV
Clusters (NNH)	Zona urbana	CrimeStat IV
Densidad (KDE)	Zona urbana	QGIS
Índice delictivo en parroquias rurales	Zona rural	QGIS

III. RESULTADOS

Los resultados que se presentan, han sido clasificados de acuerdo a los análisis mencionados en la metodología y se describen a continuación.

ESTADÍSTICAS GLOBALES: Como se mencionó anteriormente, MC y SDE permiten verificar la distribución de los datos. La

Tabla III, muestra los resultados obtenidos al calcular estas medidas mediante el software CrimeStat. Estos valores son el área de la SDE (en kilómetros cuadrados) y la orientación que presenta la elipse para cada tipo de delito analizado.

TABLA III

Características obtenidas para SDE.

DELITO	ÁREA SDE (KM ²)	ORIENTACIÓN DE LA ELIPSE
Muertes violentas	30,28	Sureste
Robo-Hurto a domicilios	29,39	Noreste
Robo-Hurto a personas	11,82	Noreste
Robo-Hurto de vehículos	23,88	Noreste

Los valores presentados en la tabla anterior permiten vislumbrar que, tres de los cuatro tipos de delitos analizados tuvieron la misma orientación de elipse, noreste, siendo todos ellos robos y hurtos; mientras que el cuarto (muertes violentas) tuvo una elipse orientada hacia el sureste. El delito que presentó una elipse de menor extensión (11.82 km²) fue robo y hurto a personas; esto se debe a que estos actos delictuales estuvieron concentrados. Los robos y hurtos a domicilios y vehículos presentaron áreas mayores a 20 km² y finalmente la extensión de la elipse correspondiente a muertes violentas tuvo una extensión mayor a 30 km² debido a la dispersión de los diferentes crímenes de esta clase.

Es importante aclarar que la orientación de la elipse refleja la orientación de la distribución de datos dentro del área investigada, en este caso, la zona urbana del cantón en estudio.

El mapa de la Figura 2 muestra el resultado de esta técnica aplicada a todos los delitos:

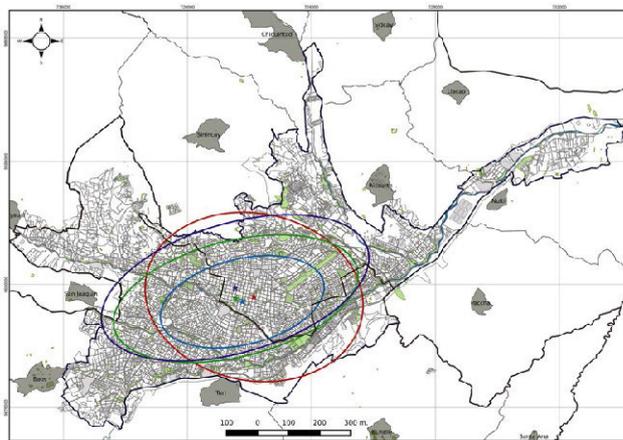


Figura 2: Mapa de resultados de MC y SDE.

VERIFICACIÓN DE CLUSTERS: Los parámetros más importantes respecto a los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla IV.

TABLA IV

Valores de análisis de clusters por delito.

DELITO	MNHD (METROS)	MD (METROS)	NNI
Muertes violentas	1160.67	3.54	0.95774
Robo Hurto a domicilios	107.52	0.00	0.68990
Robo Hurto a personas	63.08	0.00	0.49402
Robo Hurto de vehículos	285.41	0.00	0.84410

Donde MNHD es *Mean Nearest Neighbor Distance*, MD *Minimum Distance* y NNI *Nearest Neighbor Index*.

Observando los valores de NNI reflejados en la tabla anterior, se determinó que las muertes violentas presentaron un valor muy cercano a 1, es decir estos delitos se distribuyeron aleatoriamente. Los valores correspondientes a robos y hurtos presentaron valores menores a 1, lo cual indica concentración, sin embargo es importante notar que existió más concentración en los delitos de este tipo cometidos hacia personas y una baja concentración en los delitos cuyo objetivo eran vehículos.

El mapa de la Figura 3 muestra el resultado de esta técnica aplicado a los delitos de robos y hurtos:

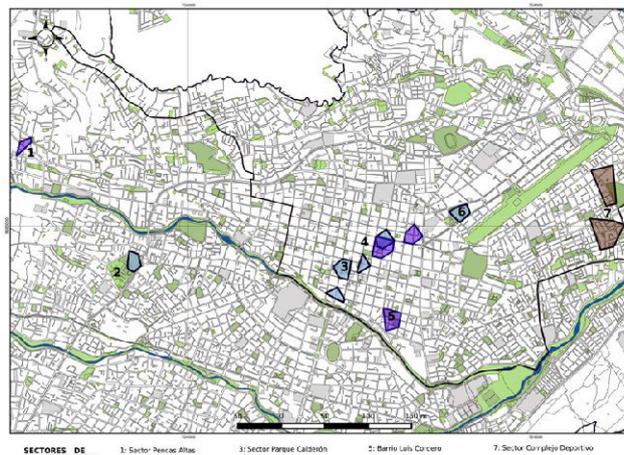


Figura 3: Mapa de clusters para delitos de robos y hurtos.

ANÁLISIS DE DENSIDAD: La Figura 4 presenta un mapa de aplicación de esta técnica con datos de robos y hurtos a personas, resaltando los lugares cercanos a las zonas críticas para una mejor ubicación. También fue necesario ampliar los sectores con mayor presencia de “zonas rojas” (zonas con alta incidencia delictiva) para detectar de mejor manera lugares de referencia que permitan una ubicación más certera de dichas zonas. El mapa de la figura, corresponde a robos y hurtos a personas, los cuales presentaron concentración en el centro de la ciudad, aunque se dispersaron por gran parte del área urbana.

Se debe recalcar que autores como Eck (2005) y Moreno (2005), consideran a KDE como la mejor técnica para visualizar fenómenos criminales, pues es evidente la facilidad de interpretación que presenta basada en la gama de colores correspondiente.

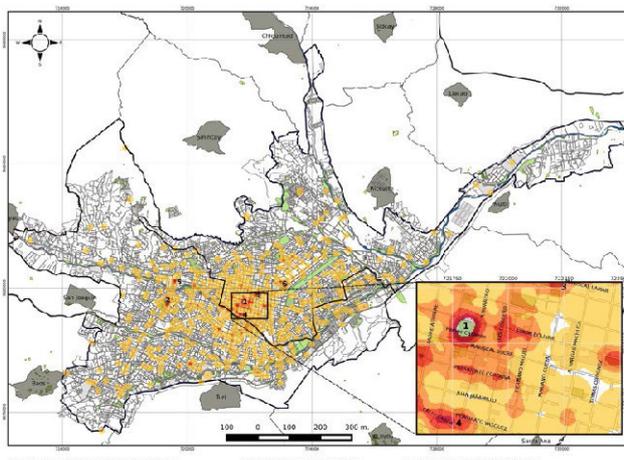


Figura 4: Mapa de densidad de robos y hurtos a personas.

DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DELICTIVO A NIVEL RURAL: Los resultados obtenidos permitieron detectar las parroquias rurales con más alto índice de los diferentes delitos analizados a través de sendos mapas de coroplemas. En este sentido, se puede afirmar que para este caso la interpretación fue muy simple, ya que solamente se basó en la gama de colores, la cual indicó la frecuencia de incidentes ocurridos en cada parroquia.

La Figura 5 muestra el mapa de coroplemas correspondiente a los robos y hurtos a personas suscitados a nivel de parroquias rurales del cantón en estudio y se puede observar que la parroquia Baños es la que mayor índice presentó en este tipo de acto delictivo.

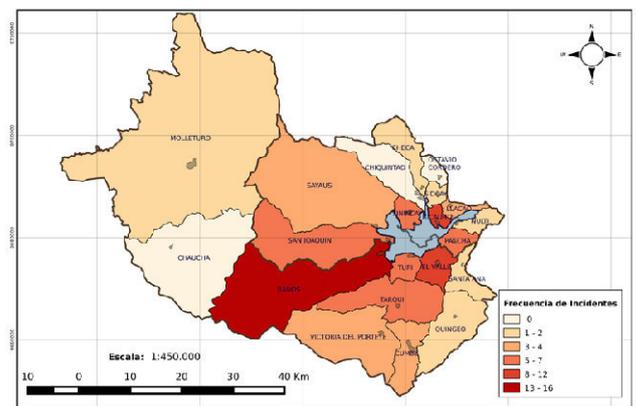


Figura 5: Mapa de coroplemas de robos y hurtos a personas.

Para cerrar este apartado es importante acotar que los resultados reflejaron los sectores con mayor concentración de hechos delictivos a nivel urbano y rural. También es importante señalar que la información obtenida para la realización de este trabajo se basó en las denuncias realizadas a las instituciones competentes, por lo que no reflejó la totalidad de actos delictivos ocurridos en el cantón.

IV. CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se ha confirmado que el análisis espacial es la base para una detección certera de los lugares con alto índice delictivo. Además, el hecho de trabajar con SIG ha permitido resaltar la importancia que tiene el espacio, pues todos los eventos suscitados en nuestro planeta ocurren en algún lugar.

Se ha demostrado la gran utilidad que tienen los SIG para el seguimiento y análisis de actos delictivos, ya que los resultados obtenidos, permitieron detectar las zonas que presentaron altos índices de criminalidad. Akpınar y Usul (2004) mencionan que los resultados de utilizar SIG para este tipo de análisis brindan una idea acerca del estado actual de los patrones criminales.

Es importante considerar que los delitos no pueden desaparecer por sí solos, por ello las instituciones competentes, cuya tarea preponderante es proteger la seguridad de la ciudadanía y tomar medidas que ayuden a minimizar el riesgo criminal, deben identificar las ubicaciones y periodos de tiempo en los que la actividad delictiva es más propensa de ocurrir (Lab, 2000 citado en Akpınar y Usul, 2004). Precisamente la identificación de lugares con alta incidencia delictiva en el cantón en estudio durante el periodo de tiempo establecido, fue un objetivo cumplido con la realización de este trabajo.

A nivel rural fue muy complicado realizar análisis certeros, debido a que las parroquias de esta clase son muy extensas y

presentan localidades, comunidades y caseríos dispersos en toda su área. Esto hace que sea muy difícil ubicar con precisión los diferentes delitos ocurridos, razón por la cual no es posible aplicar varias de las técnicas investigadas. Sin embargo, un conteo de eventos, mediante el método de clasificación Natural Breaks ha permitido detectar la cantidad de delitos ocurridos en cada parroquia.

A nivel urbano ha sido posible detectar de mejor manera las zonas de concentración (hot spots) de los delitos aplicando las diferentes técnicas estudiadas. Se puede evidenciar que Kernel Density Estimation (KDE) es muy buena para cumplir este objetivo, ya que la superficie que genera permite identificar fácilmente las zonas de alta densidad con base en una gama de colores. Se debe considerar que los parámetros críticos utilizados en esta técnica (radio y tamaño de celda) son

esenciales para que los resultados se acoplen a la realidad de la zona de estudio.

Las herramientas de análisis espacial utilizadas en este trabajo de investigación fueron en su totalidad software libre. Se logró demostrar que el hecho de no contar con presupuestos para la adquisición de herramientas SIG de alto costo, no es una razón para dejar de lado este tipo de análisis. Si bien el manejo de estas herramientas es más complejo en comparación con las privativas, los resultados obtenidos fueron muy útiles.

De acuerdo a los resultados, es importante plantear a futuro la realización de análisis más complejos que brinden un seguimiento más amplio de los problemas delictivos, por ejemplo análisis predictivos o análisis de rutas del crimen.

REFERENCIAS

- Akpınar, E. y Usul, N. (2004). Geographic information systems technologies in crime analysis and crime mapping. [Archivo PDF]. Proceedings. ESRI.
- Chainey, S. P. (2013). Examining the influence of cell size and bandwidth size on kernel density estimation crime hot spot maps for predicting spatial patterns of crime. [Archivo PDF]. Bulletin of the Geographical Society of Liege, 60, 7-19.
- Chainey, S. y Ratcliffe, J. (2013) GIS and Crime Mapping Mastering GIS: Technology, Applications & Management. John Wiley & Sons.
- Eck, J., Chainey, S., Cameron, J., y Leitner, M. (2005). Mapping Crime: Understanding Hot Spots. U.S. Dept. Of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice. Washington D.C.
- Elmes, G., Roedl, G., y Conley, J. (2014). Forensic GIS: The Role of Geospatial Technologies for Investigating Crime and Providing Evidence (Vol. 11). United States of America: Springer.
- Levine, N. (2013d). Chapter 5: Distance Analysis I and II. CrimeStat IV: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations, Version 4.0). The National Institute of Justice, Washington, DC.
- Moreno, A. (2005). Modelización cartográfica de densidades mediante estimadores Kernel. [Archivo PDF]. Treballs de la Societat Catalana de Geografia, (30), 155-170.
- Rogerson, P., y Yamada, I. (2008). Statistical detection and surveillance of geographic clusters. United States of America: CRC Press.
- Ruiz García, A. (2012). SIG, crimen y seguridad. Análisis, predicción y prevención del fenómeno criminal.(Tesis de maestría publicada). Universidad Complutense de Madrid, España.

Detección de patrones secuenciales generalizados de movilidad de ciclistas a partir de datos crowdsourcing

Quezada Adriana, Orellana Daniel

LlactaLAB, Departamento de
Espacio y Población, Universidad
de Cuenca
Av. 12 de Abril, Cuenca/Azuay/
Ecuador
adriana.quezada@ucuenca.edu.ec,
daniel.orellana@ucuenca.edu.ec

RESUMEN

La movilidad en bicicleta conlleva beneficios para el ambiente, la economía y la salud de la población. No obstante, la adopción de la bicicleta como medio de transporte, está limitada por la carencia de geoinformación detallada que describa el comportamiento de los ciclistas y permita la creación de estrategias adecuadas de planificación y promoción. En este estudio presentamos un método para obtener conocimiento sobre los patrones de movilidad de ciclistas urbanos utilizando datos crowdsourcing, minería de datos y técnicas de visualización de geo-información. Demostramos la viabilidad del método analizando un año de datos de la aplicación Strava METRO en la ciudad de Cuenca, y extrayendo y visualizando patrones secuenciales generalizados (GSP) de movimiento. Los resultados evidencian que la aplicación del método propuesto permite generar información relevante para el conocimiento sobre movilidad no motorizada utilizando conjuntos masivos de datos recolectados con técnicas de crowdsourcing.

Palabras clave: **movilidad no motorizada, bicicletas, geoinformación de crowdsourcing, patrones secuenciales generalizados, comportamiento colectivo espacial.**

ABSTRACT

Bicycle mobility lead to environmental, economic and health benefits to the population. Nonetheless, the implementation of bicycle-based transport systems is limited due to lack of detailed geodata describing the behavior of cyclists in order to build appropriate planning and promotion strategies. In this study, we present a method to extract knowledge about urban cyclist's mobility patterns using crowdsourced geodata, data mining and geodata visualization techniques. We demonstrate the viability of the method by analyzing a year-long data from the Strava METRO application in the city of Cuenca (Ecuador); and extracting and visualizing generalized sequential patterns (GSP) of movement. The results that data mining analysis technique applied to massive datasets allows the generation of relevant information about the non-motorized mobility knowledge.

Keywords: non-motorized mobility, bikes, crowdsourced geoinformation, generalized sequential patterns, collective spatial behavior.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la movilidad no motorizada, sea a pie o en bicicleta, se posiciona como una estrategia potente de mitigación ante el actual detrimento de la calidad ambiental, económica, y de la salud de la población. El predominio de la movilidad motorizada como medio de transporte y el incremento del parque automotor, son factores impulsores del aumento de las emisiones de gas de efecto invernadero, ante lo cual, grupos de expertos a nivel global sugieren a los gobiernos incentivar la inversión en transporte público, en la construcción de infraestructura para peatones y ciclistas, a fin de adoptar sistemas de transporte modales de baja emisión de CO₂. (Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari, 2014). En el campo de la salud, se ha definido a la bicicleta como un medio de transporte saludable. El uso de la bicicleta incrementa la condición física de las personas, mitigando los efectos nocivos del sedentarismo, los cuales se intensifican con el uso del auto privado (Fishman, 2016).

Ante los beneficios de este medio de transporte, planificadores e investigadores se cuestionan cómo incrementar la movilidad en bicicleta. Varias investigaciones a nivel mundial han encaminado sus esfuerzos al análisis de propuestas para el fomento del uso de la bicicleta. Los resultados evidencian que la dotación de infraestructura completa (vías, señalización, iluminación, parqueaderos, etc.) impacta más en la movilidad en bicicleta que la implementación parcial de esta (Pucher, Dill, & Handy, 2010). De acuerdo a Fishman (2016), aproximadamente al 60% de la población tiene interés en utilizar la bicicleta, pero al mismo tiempo les preocupa hacerlo por la falta de seguridad. Es clave que las estrategias para incrementar el número de usuarios incluyan la implementación de redes de ciclovías, complementadas con zonas de parqueo, señalización, iluminación, así como aspectos del como la disminución del tráfico vehicular, la accesibilidad a amenidades y servicios en las rutas, señalización, entre otros, a fin de mejorar la percepción de seguridad del usuario (Fishman, 2016). En efecto, los países que registran mayor actividad de ciclistas cuentan con una infraestructura extensa y segura (Pucher, Dill, & Handy, 2010). Otros aportes que la investigación ha hecho se enmarcan en la obtención de datos descriptivos y detallados de la movilidad en bicicleta, como son: el número de viajes, su origen y destino, el espacio geográfico y temporal, características demográficas y socioeconómicas de los usuarios, así como sus percepciones y motivaciones (Handy, van Wee, & Kroesen, 2014). No obstante, las ciudades afrontan el desafío de motivar el uso de la bicicleta como medio de transporte, con recursos económicos limitados. El entender el comportamiento espacial de los ciclistas, permite optimizar esos recursos e invertir de manera efectiva en la planificación de la movilidad no motorizada en bicicleta. Sin embargo, datos descriptivos que expliquen el comportamiento de los ciclistas generalmente son escasos, a veces inexistente, y su obtención es costosa (Iacono, Krizek, & El-Geneidy, 2010).

DATOS CROWDSOURCING Y LA MOVILIDAD EN BICICLETA

La aparición de datos abiertos y Big Data, representa un instrumento idóneo tanto para planificadores urbanos y de transporte, así como para la comunidad científica que se enfoca en el estudio de la movilidad no motorizada en bicicleta, al ser información geolocalizada disponible, de rápida expansión y muchas veces, de acceso abierto. En el ámbito del estudio de la movilidad en bicicleta, estos recursos han sido ampliamente utilizados. Aspectos como el tráfico, los flujos,

el comportamiento, los modos de transporte, tipos de viaje, entre otros, han sido medidos con datos provenientes del sistema de geo-localización espacial. Estos han sido analizados y complementados con el uso de sistemas de información geográfica, plataformas virtuales, dispositivos móviles, teléfonos móviles inteligentes, y aplicaciones móviles de información geográfica voluntaria y crowdsourcing. Esta última, ha sido ampliamente usada por ciclistas, permitiendo la recolección masiva de datos. Entre las aplicaciones más populares están *Endomondo*, *MapMyRide* y *Strava*. Actualmente empresas como Strava METRO, comercializan estos datos para la planificación e investigación sobre movilidad no motorizada (Romanillos, Austwick, Ettema, & De Kruijf, 2015). De hecho, en los últimos, varios estudios los han utilizado para identificar: patrones de tiempo de los viajes, frecuencias, tipos de viaje, rutas origen-destino (Selala & Musakwa, 2016), volumen de tráfico de ciclistas y su asociación con factores del entorno (Jestico, Nelson, & Winters, 2016), evaluación de intervenciones en la infraestructura de la movilidad no motorizada (Heesch & Langdon, 2016), el rol de la movilidad en bicicleta en la actividad física (Handy et al., 2014), entre otros. El resultado de estas investigaciones evidencia que la información crowdsourcing de Strava es útil (Heesch & Langdon, 2016; Jestico et al., 2016; Romanillos et al., 2015; Selala & Musakwa, 2016). Comparada con otras metodologías de recolección de datos, como el conteo manual, la información proporcionada por Strava es útil (Jestico et al., 2016), no solo por la cantidad de datos, sino por la capacidad de abarcar simultáneamente escalas mayores, apropiadas para la planificación urbana (Griffin & Jiao, 2015). Sin embargo, se advierte no considerar los datos crowdsourcing como una muestra representativa de la población de ciclistas, ni una manera de identificar ciclistas potenciales (Griffin & Jiao, 2015; Romanillos et al., 2015). Quienes utilizan este tipo de aplicaciones generalmente son personas interesadas en conocer su condición física, sus rutas, la calidad de aire, etc. Esta falta de representatividad se traduce a términos de localización geográfica, aspectos demográficos y socioeconómicos (Romanillos et al., 2015). De hecho, estudios han demostrado que el número de viajes identificados con la aplicación se relaciona con el nivel de ingreso de sus usuarios (Selala & Musakwa, 2016).

Los datos crowdsourcing aportan principalmente a los planificadores y tomadores de decisiones; es información que les permite mejorar el entendimiento del comportamiento espacial de los ciclistas, y tener un acercamiento a las cualidades espaciales de sus rutas preferidas y de las que evitan, siendo insumos importantes para el diseño y planificación de infraestructura de movilidad en bicicleta, y para el monitoreo de la existente. Pocos son los estudios que se han enfocado en el campo de la planificación urbana, y en el desarrollo de metodologías para analizar las rutas registradas (Romanillos et al., 2015). En este sentido, es importante considerar que, si bien la información de estas bases de datos se caracteriza por su nivel de detalle, su utilidad sólo se manifiesta una vez que se detectan y se visualizan patrones que evidencian el comportamiento colectivo espacial de los ciclistas.

DETECCIÓN DE PATRONES DE MOVILIDAD EN BICICLETA

Los datos crowdsourcing de actividades en bicicleta, por si solos, no evidencian patrones que describen las rutas preferidas por el colectivo de ciclistas, sino únicamente las rutas individuales agregadas y anonimizadas. Al respecto, la minería de datos ofrece algoritmos enfocados al análisis de datos espaciales de trayectoria, que permiten extraer conocimiento de conjuntos de datos. La minería de datos de patrones de trayectoria facilita el análisis de patrones de movimiento de

un gran volumen de datos espaciales, identificando patrones donde varios individuos se mueven en conjunto, patrones de rutas o espacios comunes (clusters) de objetos en movimiento, patrones de periodicidad, y patrones secuenciales de una trayectoria o de un conjunto de trayectorias (Zheng, 2015). La minería de patrones secuenciales es un proceso que extrae patrones secuenciales específicos cuyo valor de soporte excede un valor mínimo de soporte predeterminado. Los patrones extraídos con este proceso son secuencias que describen comportamientos comunes útiles para propósitos como: la detección de rutas apropiadas, predecir localizaciones, entender trayectos, etc., para diferentes propósitos en varios campos de las ciencias (Orellana, Bregt, Ligtenberg, & Wachowicz, 2012/6; Slimani & Lazzez, 2013; Zheng, 2015). La detección de aspectos comunes se ejecuta en base a un orden relativo y no absoluto (Orellana et al., 2012). Existen cinco algoritmos base para la extracción de los patrones secuenciales: *Apriori-like algorithm*, *Breadth First Search-based algorithm*, *Depth First Search-based algorithm*, *incremental-based algorithm* y *closed sequential patterns based algorithm*; a partir de estos se han desarrollado una serie de algoritmos que los han perfeccionado (Slimani & Lazzez, 2013). Es el caso del algoritmo BIDE, desarrollado para extraer patrones secuenciales generalizados (GSP), en base al esquema de control de cierre de secuencias denominado *BI Directional Extension*. Su eficacia radica en no necesitar un candidato (conjunto de patrones secuenciales generalizados) para identificar o validar nuevos patrones, lo que optimiza el uso de memoria en su proceso (Wang & Han, 2004). La relevancia de los GSPs se determina en base a un análisis exploratorio y a criterios subjetivos y objetivos. Los criterios son objetivos cuando su análisis se basa en datos crudos y en la aplicación de teorías de probabilidad, de estadística, o de información. Los criterios son subjetivos cuando en su análisis intervienen los datos y el usuario de los datos, ante el cual la novedad y la sorpresa queda a su juicio en base a conocimientos adquiridos. (Geng & Hamilton, 2006).

MOVILIDAD NO MOTORIZADA EN CUENCA

La ciudad de Cuenca, es la tercera cabecera cantonal más importante del Ecuador y se localiza en la zona montañosa de los Andes al sur del país. La ciudad crece de manera dispersa, continua y con baja densidad. Está formada por 15 parroquias urbanas y 21 parroquias rurales. Siguiendo las tendencias globales, en Cuenca, la movilidad motorizada es la que predomina como medio de transporte; el crecimiento del parque automotor ha incrementado al 11% anual, y consecuentemente, la disminución de la calidad del aire, considerando que el sector del transporte representa el 57% de emisiones de gases efecto invernadero local, llegando a índices de contaminación aún menores a la norma establecida por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (BID, 2015). El panorama para la movilidad no motorizada en Cuenca no es alentador; el 24% de la población se desplaza a pie, y apenas el 1% en bicicleta (“Colectivo Cuenca Ciudad para Vivir,” 2016). El gobierno local ha desarrollado proyectos para motivar el uso de la bicicleta como transporte público, mediante la “Red Urbana de Ciclovías” y la “Bicicleta Pública para Cuenca” (BID, 2015), y desde el 2012 se incorpora parcialmente infraestructura para bicicletas en la ciudad. Los estudios realizados han favorecido a identificar el perfil del usuario (género, edad, ocupación, etc.) de diferentes medios de transporte, los viajes origen-destino, las características de los viajes (tiempo, motivo, medio de transporte) (GAD Municipal del Cantón Cuenca, 2015), entre otros aspectos; sin embargo, muy poco se conoce en relación a las trayectorias individuales y las rutas más frecuentadas por el colectivo de ciclistas en Cuenca, es decir, sobre su comportamiento espacial. Es así,

que en el marco del proyecto “Pies y Pedales”, desarrollado por el grupo de investigación LactaLAB - Ciudades Sostenibles de la Universidad de Cuenca, proponemos detectar, extraer y visualizar patrones secuenciales generalizados de movilidad de ciclistas de la zona urbana de Cuenca, utilizando datos crowdsourcing de la aplicación Strava METRO, algoritmos de minería de datos y técnicas de visualización, con la finalidad de brindar una metodología que permita construir conocimiento sobre la movilidad no motorizada en bicicleta.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este artículo se basa en el enfoque de análisis exploratorio de datos espaciales (ESDA) para detectar e interpretar patrones de movimiento a fin de entender el comportamiento espacial de los usuarios de la bicicleta en el área urbana de Cuenca. El enfoque metodológico consistió en tres fases principales: La primera, la extracción y preprocesamiento de datos crowdsourcing de las trayectorias de ciclistas de la zona urbana de Cuenca. La segunda, la aplicación del algoritmo BIDE para extraer los patrones secuenciales generalizados (GSPs) de movimiento que representan rutas frecuentes de los lugares por los que los ciclistas cruzan durante sus viajes. Finalmente, el análisis de las propiedades principales de los patrones extraídos: tamaño, soporte, localización y relación con variables socioeconómicas.

A. EXTRACCIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE DATOS CROWDSOURCING

Strava METRO es un servicio de datos que ofrece información geográfica, temporal y descriptiva del movimiento de ciclistas y peatones de un área geográfica específica, compatible con diferentes ambientes de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Strava, 2015). La información fue recolectada por usuarios de la aplicación Strava, en teléfonos móviles inteligentes que permite monitorear las trayectorias a pie o en bicicleta. Los datos recolectados son pre-procesados, agregados y anonimizados por el proveedor de datos y ofertados como información para la planificación urbana. Se adquirió un conjunto de datos para la ciudad de Cuenca para el período Agosto 2014 - Julio 2015. El conjunto de datos consiste en tres productos principales: a) Streets, representa datos agregados de un minuto por cada Edge en una red de calles obtenidas de OpenStreetMap; b) Nodes, similares a los Edges pero agregados por intersección de calles con información acerca del tiempo de espera, y c) Origen/Destino (OD) el cual se deriva de las Streets y de los reportes de origen y destino, así como las localidades intermedias de cada viaje. Estas localidades son agregadas dentro de sectores censales para preservar el anonimato de los usuarios y para luego comparar con datos socioeconómicos. El análisis descrito en este artículo se enfoca en el producto OD, del cual extrajimos las secuencias correspondientes a la ciudad de Cuenca, para aplicar un análisis exploratorio de los viajes en bicicleta que inician en la zona urbana.

Debido al potencial sesgo socioeconómico de estos datos, analizamos la correlación de la frecuencia de orígenes de viajes con el estatus socioeconómico. Para esto se calculó para cada sector censal el Índice de Condiciones de Vida (ICV), el cual resume las condiciones de vida de la población y su estatus socioeconómico (Orellana & Osorio, 2014).

Todos los datos fueron procesados en R (R project, 2015) y QGIS (QGIS, 2017).

B. EXTRACCIÓN DE PATRONES SECUENCIALES GENERALIZADOS

Los patrones secuenciales generalizados (GSPs) pueden ser definidos como frecuencias de secuencias generalizadas que pueden ser encontradas en conjuntos de eventos ordenados temporalmente (Agrawal & Srikant, 1995). La palabra generalizado implica, por un lado, que los eventos ocurrieron en un orden relativo más que en uno absoluto, y por otro lado, que la detección de secuencias frecuentes podría tener eventos intermedios presentes únicamente en algunas de las secuencias originales. Un ejemplo ilustrativo de GSP es representado en la Figura 1. A la izquierda se encuentran 5 secuencias de números (s1...s5). A la derecha, cuatro GSPs fueron detectados. La secuencia generalizada más común (GSP1: 5, 6) se encuentra en todas las secuencias originales, mientras que en la segunda (GSP2: 5, 6, 1) se encuentra en cuatro de las cinco secuencias originales. El valor de soporte de un GSP indica la razón entre el número de secuencias en la que el GSP es encontrado y el número total de secuencias del conjunto de datos.

s1: 1,2,3,5,6,3,1	GSP1: 5,6 (support = 1)
s2: 1,2,4,5,6,1	GSP2: 5,6,1 (support = 0.8)
s3: 1,5,6,7,9	GSP3: 1,5,6 (support = 0.6)
s4: 2,5,3,6,1	GSP4: 2,5,6 (support = 0.6)
s5: 4,5,6,1	

Figura 1. Ejemplo de patrones secuenciales generalizados extraídos de un conjunto de secuencias de eventos.

En nuestro caso, cada secuencia es un viaje en bicicleta con todos los sectores censales, y en el orden en el que estos fueron recorridos. Por lo tanto, la misión de este análisis es encontrar rutas frecuentes seguidas por los ciclistas. La interpretación del ejemplo provisto en la Figura 1. en términos de comportamiento espacial es que todos los viajes fueron del sector censal 5 al sector censal 6, a pesar del lugar en el que estuvieron antes, después o en la mitad de estos tramos. Analizar los GPSs en lugar de las secuencias originales nos permite un mejor exploración y entendimiento del comportamiento de la movilidad colectiva.

Los GSPs fueron extraídos usando el algoritmo BIDE+, implementado en *Sequential Pattern Mining Framework* (SPMF) (Fournier-Viger et al. 2016). La ventaja del algoritmo BIDE+ es que evita la redundancia al extraer solo los patrones secuenciales "cerrados", i.e. secuencias que no están contenidas en otras secuencias que tiene el mismo valor de soporte. Un patrón cerrado produce una clase equivalente de patrones que comparten el mismo cierre, y aquellos patrones están parcialmente ordenados, es decir, de acuerdo a la relación de inclusión. Los elementos más pequeños en la clase equivalente son llamados generadores mínimos, y el único elemento máximo es llamado patrón cerrado (Fournier-Viger et al., 2008). Los GSPs cerrados, fueron extraídos con un valor mínimo de soporte igual a 0.14 (es decir, que aparece en al menos el catorce por ciento de los viajes). Los GPSs resultantes fueron exportados a un archivo separado por comas para un mayor análisis.

C. EXPLORACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LOS GSPS

Con el fin de interpretar los GSPs y obtener conocimiento sobre el comportamiento de la movilidad colectiva de los usuarios de bicicleta en la zona urbana de Cuenca, los patrones extraídos fueron analizados de acuerdo a sus propiedades intrínsecas: tamaño, soporte y frecuencia. Finalmente, los GPSs y sus propiedades destacadas fueron representadas usando la técnica de visualización *Flow maps*, que representan mo-

vimientos colectivos entre localidades, y son especialmente adecuado para visualizar patrones de movimientos secuenciales generalizados (Orellana et al., 2012).

III. RESULTADOS

Del conjunto de datos, filtramos los viajes en bicicleta que inician únicamente en los sectores censales de la zona urbana de Cuenca, sin distinción del tipo de viaje. Obtuvimos 4939 secuencias (viajes), cuyas trayectorias se componen de 3 a 429 localidades; es decir, existen viajes en los que un ciclista cruza por 429 sectores censales. Se identificó que, a pesar que los viajes inician en la zona urbana, muchos de ellos realizan parte de su trayectoria, por la zona periurbana de Cuenca. Como se puede observar en la Figura 2, al visualizar en conjunto los viajes registrados, su análisis se dificulta, razón por lo cual fue necesario aplicar las técnicas de minería de datos para extraer información útil.

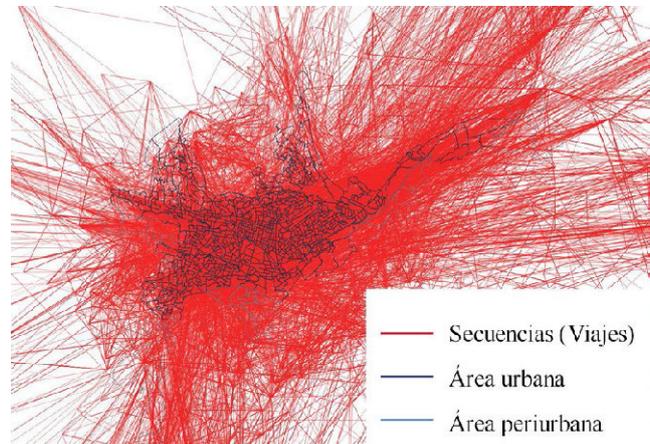


Figura 2. Mapa de viajes en bicicleta originados en la zona urbana de Cuenca y registrados por la aplicación móvil Strava.

En cuanto a la relación entre la frecuencia de origen de viajes y el Índice de Condiciones de Vida (ICV) en los sectores censales, se evidenció una correlación positiva leve pero estadísticamente significativa, lo cual confirmaría el sesgo socioeconómico del conjunto de datos (Figura 3). Los sectores con mayores condiciones de vida son también aquellas donde se originan el mayor número de viajes (Figura 4).

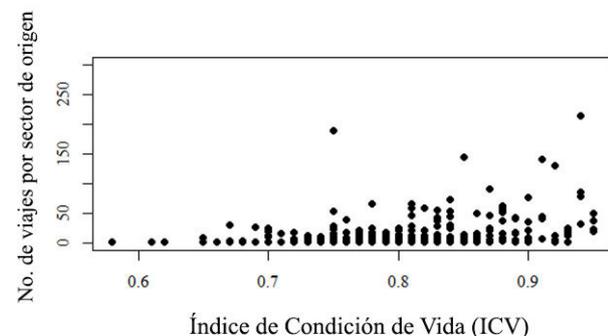


Figura 3. Relación entre la frecuencia de los sectores origen y su ICV ($r = 0,31$, p -valor < 0.0001).

El algoritmo BIDE+ extrajo 1365 patrones secuenciales generalizados (GSP) con un soporte mínimo de 0.10. (Figura 5), caracterizados por tener un tamaño de 8 localidades (Figura 6), y un valor de soporte inferior a 0,3 (Figura 7). En el mapa de

flujos, se evidencia que los GSPs se ubican al noreste (Sectores de Monay, Capulisipamba, Challuabamba,) y al sur (Sectores de El Ejido y Control Sur) de la zona urbana de Cuenca, extendiéndose hacia algunos sectores de su periferia. En relación a los patrones de movimiento de origen y destino, se identificó 316 rutas compuestas por dos localidades (correspondientes al origen y destino), de las cuales las más frecuentes también se concentran en la zona noreste de la ciudad, y se direccionan al norte y sur, y hacia sectores externos al límite urbano (Figura 8).

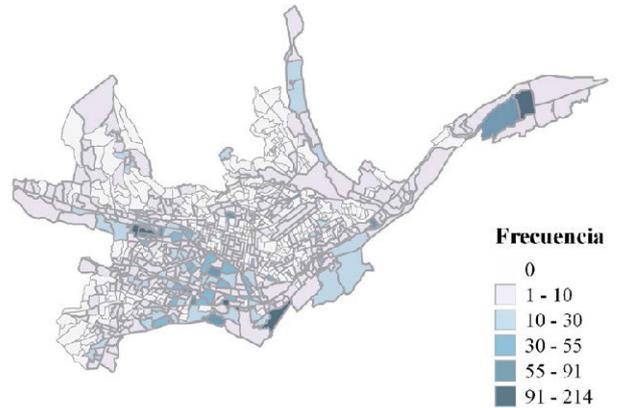


Figura 4. Mapa de los sectores de Cuenca donde se inician los viajes en bicicleta

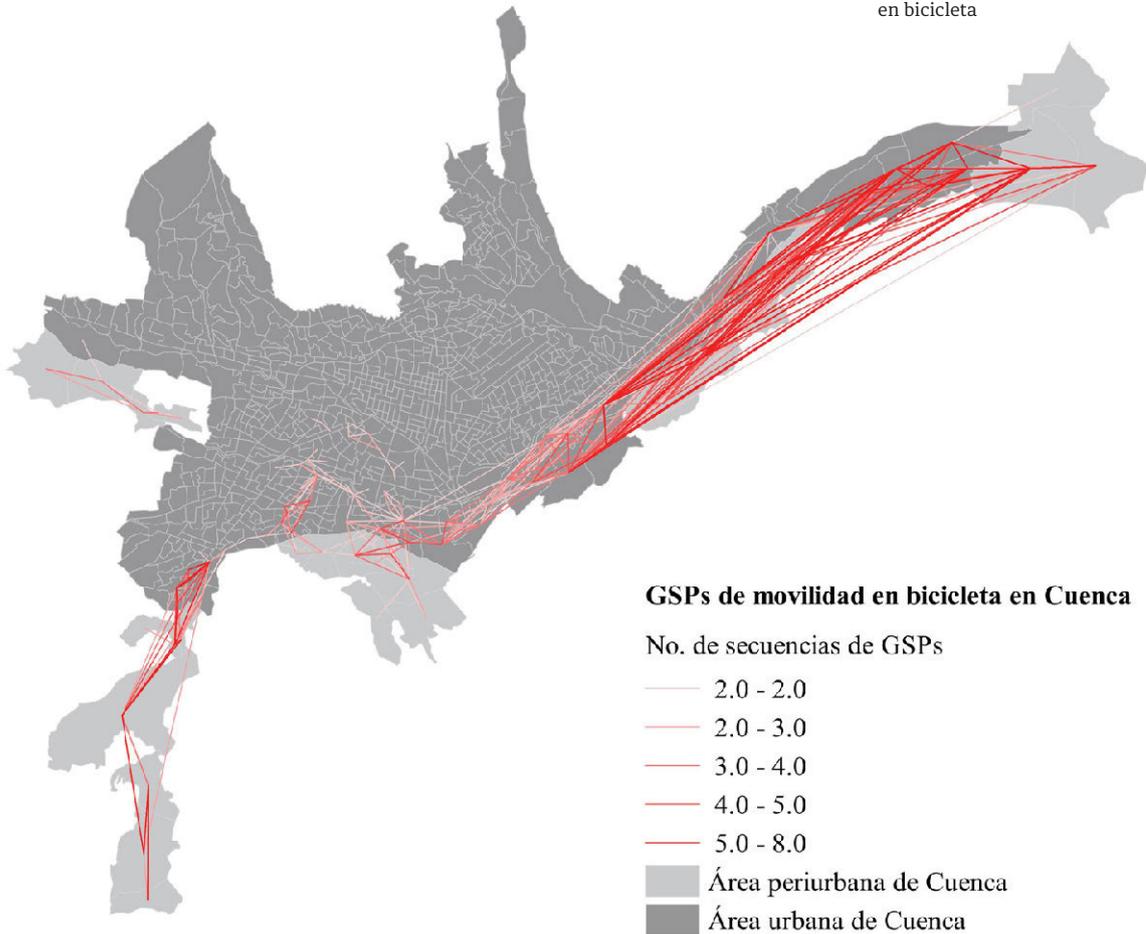


Figura 5. Mapa de Patrones Secuenciales Generalizados de la movilidad en bicicleta en Cuenca.

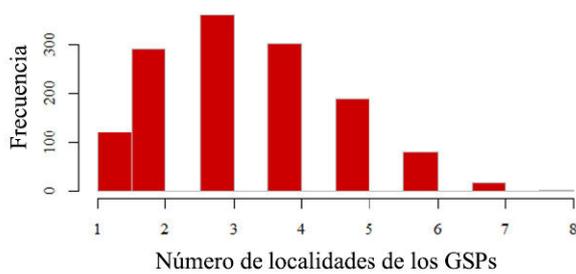


Figura 6. Número de localidades de los Patrones Secuenciales Generalizados y su frecuencia

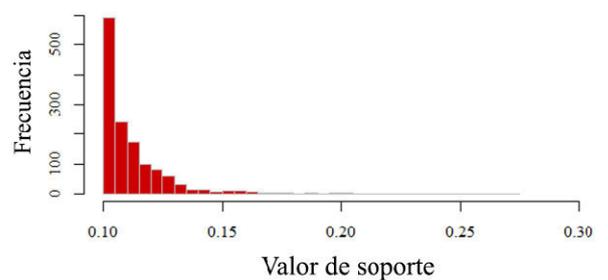


Figura 7. Frecuencia del valor de soporte de los Patrones Secuenciales Generalizados.

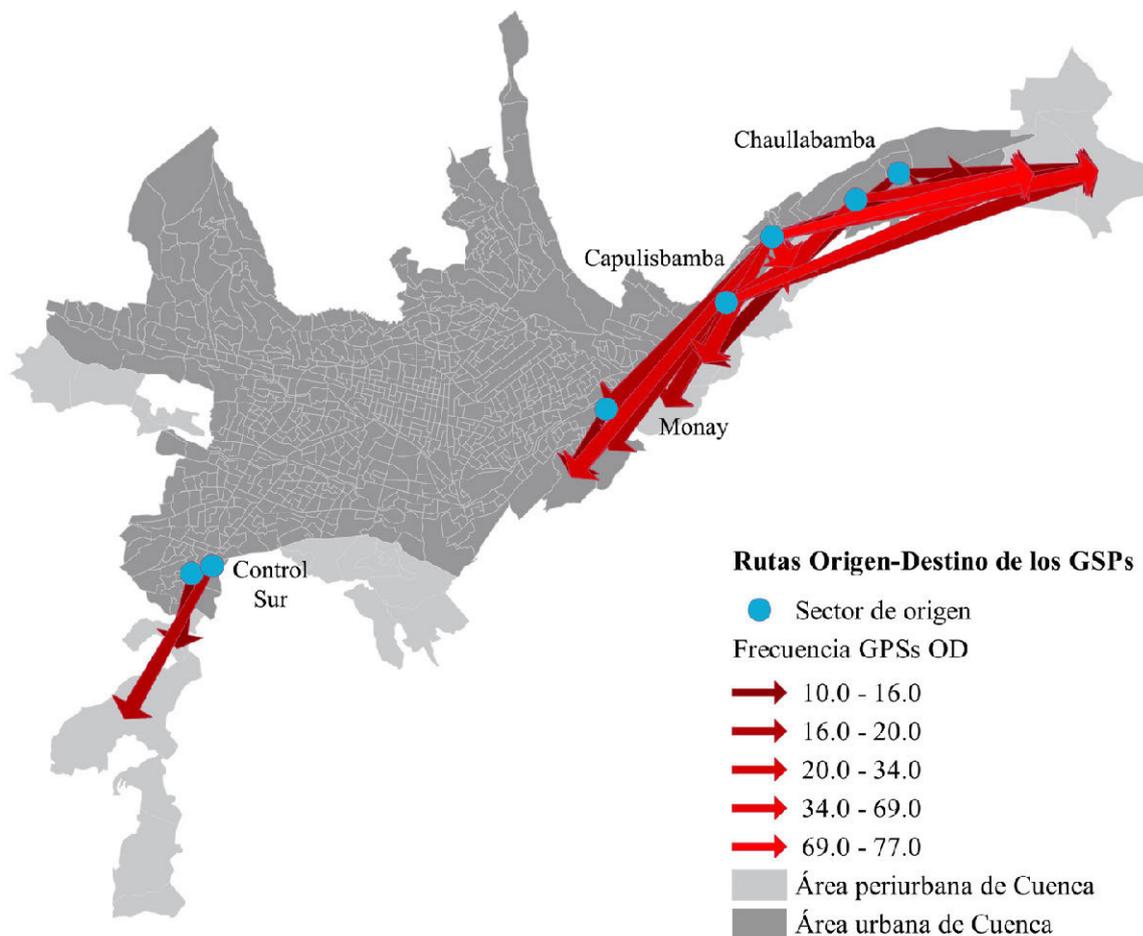


Figura 8. Rutas origen-destino más frecuentes identificadas en los patrones secuenciales generalizados de la movilidad en bicicleta en Cuenca.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo presentamos una metodología para detectar patrones secuenciales generalizados de movilidad de ciclistas a partir de datos crowdsourcing. La extracción y pre-procesamiento de estos datos produjo información descriptiva de la movilidad en bicicleta, tal como el número de viajes en la zona urbana de Cuenca que se han registrado en la aplicación Strava durante el periodo de un año, y el tamaño de los trayectos de acuerdo al número de sectores censales que han cruzado en cada viaje. Al explorar la relación del ICV de los sectores censales con el número de actividades en bicicleta hemos encontrado una correlación estadísticamente significativa, lo cual confirmaría un sesgo socioeconómico en los datos que se debe tener en cuenta para la interpretación de los patrones. Aún así, los patrones detectados en los datos de Strava podrían ser indicadores de la cantidad de actividad ciclística en general (Jestico et al., 2016).

Por otro lado, los patrones secuenciales generalizados (GSPs) detectados, describen aspectos comunes de las trayectorias registradas por el colectivo de ciclistas en la aplicación Strava. De acuerdo a los valores de soporte, tamaño y frecuencia de los GSPs, las rutas más comunes de la movilidad de ciclistas se caracterizan por ser trayectos cortos, que carecen de

localidades intermedias destacadas. El valor de soporte bajo, también indica que la preferencia de rutas de los ciclistas es diversa.

A diferencia de las rutas descritas por los datos crowdsourcing, los GSPs permiten visualizar y localizar en el área de estudio, las rutas comunes de la movilidad de ciclistas, lo que ofrece un acercamiento a las zonas urbanas de Cuenca claves para la planificación de infraestructura para la movilidad no motorizada en bicicleta. La metodología presentada permite obtener insumos relevantes del comportamiento espacial de los ciclistas en base a datos crowdsourcing, minería de datos y visualización, la cual es aplicable a conjuntos de datos provenientes de diferentes fuentes de recolección de información georeferenciada. Para aprovechar el potencial de esta metodología, y generar conocimiento sobre el comportamiento espacial colectivo de los ciclistas de una población específica, es necesario orientar esfuerzos para generar información georeferenciada de aquellos ciclistas que no tienen acceso a tecnologías móviles. En cuanto al sesgo que representan los datos de Strava, es importante profundizar en el estudio de los perfiles de usuarios potenciales de bicicleta en un contexto específico, para relacionar y definir el papel que cumplen los usuarios de Strava en ese contexto y el conocimiento que aportan al mismo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto “Pies y Pedales, estudio de los patrones de movilidad de ciclistas y peatones para la movilidad sustentable”, financiado por la Dirección de Investigación DIUC de la Universidad de Cuenca. Los autores desean agradecer a los miembros del grupo de investigación LlactaLAB - Ciudades Sustentables del Departamento de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca por su contribución.

REFERENCIAS

- Agrawal, R., & Srikant, R. (1995). Mining sequential patterns (pp. 3-14).
- BID. (n.d.). Cuenca, Ciudad Sostenible / Plan de Acción. Retrieved from <https://dl.dropboxusercontent.com/u/13114503/Cuenca%20Ciudad%20Sostenible.pdf>
- Colectivo Cuenca Ciudad para Vivir. (n.d.). Retrieved May 31, 2017, from [http://www.cccv.ec/download/20170316_EncuestaCCCV2016\(Sitio\).pdf](http://www.cccv.ec/download/20170316_EncuestaCCCV2016(Sitio).pdf)
- Fishman, E. (2016). Cyclist as transport. *Transports Reviews*, 36(1), 1-8.
- Fournier-Viger, P., Lin, J. C.-W., Gomariz, A., Gueniche, T., Soltani, A., Deng, Z., & Lam, H. T. (2016). The SPMF Open-Source Data Mining Library Version 2. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 36-40).
- GAD Municipal, del C. C. (2015). Plan de Movilidad y Espacios Públicos: Plan Operativo de Bicicletas.
- Geng, L., & Hamilton, H. J. (2006). Interestingness measures for data mining. *ACM Computing Surveys*, 38(3), 9-es.
- Griffin, G. P., & Jiao, J. (2015). Where does bicycling for health happen? Analysing volunteered geographic information through place and plexus. *Journal of Transport & Health*, 2(2), 238-247.
- Handy, S., van Wee, B., & Kroesen, M. (2014). Promoting Cycling for Transport: Research Needs and Challenges. *Transport Reviews*, 34(1), 4-24.
- Heesch, K. C., & Langdon, M. (2016). The usefulness of GPS bicycle tracking data for evaluating the impact of infrastructure change on cycling behaviour. *Health Promotion Journal of Australia: Official Journal of Australian Association of Health Promotion Professionals*. <https://doi.org/10.1071/HE16032>
- Iacono, M., Krizek, K. J., & El-Geneidy, A. (2010). Measuring non-motorized accessibility: issues, alternatives, and execution. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 133-140.
- Jestico, B., Nelson, T., & Winters, M. (2016). Mapping ridership using crowdsourced cycling data. *Journal of Transport Geography*, 52, 90-97.
- Orellana, D., Bregt, A. K., Ligtenberg, A., & Wachowicz, M. (2012/6). Exploring visitor movement patterns in natural recreational areas. *Tourism Management*, 33(3), 672-682.
- Orellana, D., & Osorio, P. (2014). Segregación socio-espacial urbana en Cuenca, Ecuador. *Analitika*, 8(2), 27-38.
- Pucher, J., Dill, J., & Handy, S. (2010). Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling: an international review. *Preventive Medicine*, 50 Suppl 1, S106-25.
- Romanillos, G., Austwick, M. Z., Ettema, D., & De Kruijff, J. (2015). Big Data and Cycling. *Transport Reviews*, 36(1), 114-133.
- Selala, M. K., & Musakwa, W. (2016). The Potential of Strava Data to Contribute in Non-Motorised Transport (NMT) Planning in Johannesburg. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B2, 587-594.
- Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari. (2014). Transport. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Slimani, T., & Lazzez, A. (2013, November 2). Sequential Mining: Patterns and Algorithms Analysis. arXiv [cs.DB]. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1311.0350>
- Strava. (2015). Strava METRO. Comprehensive User Guide (Version Version 2.0 for 2015). Retrieved from http://ubdc.ac.uk/media/1323/stravametro_200_user_guide_withoutpics.pdf
- Wang, J., & Han, J. (2004). BIDE: efficient mining of frequent closed sequences. In *Proceedings. 20th International Conference on Data Engineering* (pp. 79-90).
- Zheng, Y. (2015). Trajectory Data Mining: An Overview. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 6(3), 29.

El análisis de umbral como identificador de patrones delictuales en varios niveles geográficos del cantón Cuenca, Ecuador año 2013 al 2016

Velastegui Casco Edy Samuel

Viracochabamba 2-91/
Azuay/Ecuador
Samuv23@hotmail.com

RESUMEN

El objetivo del Análisis de Umbral es una técnica estadística que identifica delitos y áreas geográficas que han “cruzado el umbral” de actividad normal a excepcional en el cantón Cuenca, Ecuador. Este tipo de análisis funciona mediante la realización de dos preguntas simples (Bruce, 2012): ¿Cuál es el volumen normal o esperado para este tipo de delito, en esta área o en este periodo de tiempo? Y ¿Cómo se compara la actividad actual con la que es normal?; Luego el grado de desviación ayuda a que el analista clasifique sus análisis si los delitos o incidentes con violencia son inusualmente muchos en la zona de estudio. El análisis observa con mayor detención cada uno de los incidentes para encontrar si los patrones han emergido. El análisis de umbral, es capaz de observar varios niveles geográficos, desde una pequeña área hasta toda una jurisdicción, según Bruce (2012), el análisis de umbral requiere de bases de datos históricas precisas de por lo menos tres años para cada tipo de delito o incidente del cual se pretende hacer cálculos, sin embargo este tipo de análisis es más preciso si se utiliza un conjunto de datos de cinco a siete años anteriores. Mediante el análisis de umbral se identifica en el cantón Cuenca, Ecuador que la parroquia Hermano Miguel y El Valle presenta una significancia estadística donde los incidentes se han incrementado año a año en un 200% con un valor Z de 2,31; quiere decir que este tipo de incidente es “caluroso”, en la mayoría de casos, algún factor externo influye en la categoría, a menudo un patrón o una serie que ocurra en el área. Estas categorías deben tener mayor atención para una mejor investigación y análisis.

Palabras clave: **Media, Desviación estándar, Valor Z, Análisis de umbral y Coeficiente de variación.**

ABSTRACT

The objective of Threshold Analysis is a statistical technique that identifies crimes and geographical areas that have “crossed the threshold” of normal to exceptional activity, which for this study will be applied for the city of Cuenca, Ecuador. This type of analysis works by asking two simple questions (Bruce, 2012): What is the normal or expected volume for this type of crime, in this area or in this period of time? And how current activity compares with normal activity? Therefore, the degree of deviation helps the analyst classify his analyzes if crimes or incidents with violence are unusually increased in the area of

study. The analysis looks more closely at each of the incidents to find out if patterns have emerged. Threshold analysis is able to observe several geographic levels, from a small area to an entire jurisdiction. According to Bruce (2012), the threshold analysis requires accurate historical databases of at least three years for each type of crime or incident for which calculations are intended, but this type of analysis is more accurate if the dataset used belongs to the last five to seven years. By means of threshold analysis, it is identified that in Cuenca - Hermano Miguel and El Valle parishes - have a statistical significance where incidents have increased year by year by 200% with a Z value of 2.31; this means that this type of incident is "hot". In most cases, some external factor influences the category, often a pattern or series occurring in the area. These categories should be given greater attention for better research and analysis.

Keywords: Mean, Standard deviation, Z-value, Threshold analysis and Coefficient of variation.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis delictual es una actividad decisiva para el éxito de las estrategias de reducción del delito. La Fundación Paz Ciudadana y Asociación Internacional de Análisis Delictuales IACA (2010), mencionan que la experiencia de países anglosajones, donde la policía y la comunidad universitaria han logrado fructíferas alianzas de las políticas de prevención del delito y del diseño de modelos de gestión de información y conocimiento en las organizaciones evaluación de programas e investigaciones de seguridad pública. Sin embargo en América Latina se trata de una función poco conocida y escasamente descrita, lo que explica en parte que las instancias de entrenamiento no sean frecuentes y que se trate de una labor casi exclusiva de la policía y en ellas sea una materia conocida sólo por algunos.

La Fundación Paz Ciudadana (2012), manifiesta que mejorar el análisis delictual es una necesidad en muchos países e instituciones de prevención y persecución penal en América Latina, tomando como una labor decisiva para tener éxito de las estrategias para la reducción del delito, el análisis delictual implica lograr conjugar factores organizacionales, individuales y situacionales. Innovando una clara voluntad institucional, con un plan maestro de gestión y desarrollo, con procesos de aprendizaje y mejoramiento de la tecnología en las organizaciones, para conseguir resultados positivos.

El "análisis de umbral" es un texto inédito (Bruce 2012), el describe como mediante una técnica estadística y el empleo de un software simple se puede llegar a detectar cuando está ocurriendo delitos e incidentes fuera de la norma o del comportamiento observado en el pasado. Es una técnica tremendamente útil que ayuda a detectar cambios emergentes; en otras palabras, ayuda a estar alerta, además ayuda a estandarizar una tarea que contribuye, como ocurre en el caso anterior, a que la labor del analista pase a ser más relevante aun, asumiendo la labor de anticipar o advertir y dejando de ser solamente un recolector o procesador de datos de sucesos ocurridos en el pasado. Nuevamente, la proactividad se vincula al análisis delictual eficaz potenciado a la organización responsable de prevenir los delitos y problemas de inseguridad.

Cristopher W. Bruce (2012), manifiesta que desde que se inició del análisis delictual, los analistas delictuales tácticos han buscado formas más rápidas y más eficientes para identificar series y patrones emergentes. El método más confiable, la revisión de cada delito y la comparación con una base de datos de delitos anteriores, es esencialmente imposible para los analistas de instituciones grandes o que cuentan con poco personal de seguridad. En vez de eso, se basan en métodos automáticos para examinar datos o disminuir potenciales patrones.

Mediante este análisis se aplica para determinar la concentración de los delitos en el cantón Cuenca desde el año 2013

al 2016 para saber los sectores o parroquias que tienen un comportamiento significativo, para ayudar a las instituciones pertinentes en el área de seguridad, mediante el Boletín Cuenca en Cifras 2016 que elabora el Centro de Estudios Estratégicos del Consejo de Seguridad Ciudadana del cantón Cuenca, donde se aplica esta técnica estadística. Para determinar el comportamiento o concentración de mayor conflictividad.

II. MÉTODO

El proceso metodológico empieza con la recopilación de los datos, donde mediante el escaneo de los expedientes judicializados de la Fiscalía Provincial del Azuay, luego se realiza la crítica y codificación de las variables de los expedientes y se los digita en una base de datos que pasa a la etapa de revisión y validación de las bases de datos, luego se realiza la georeferenciación de la información desde el nivel de parroquias, áreas urbana, rural, distritos y circuitos de acuerdo a la competencia cantonal, luego pasa a la etapa de consolidación de la base de datos.

Para el análisis cuantitativo se aplica "El Análisis de Umbral", que es una técnica estadística que identifica delitos y áreas geográficas que han "cruzado el umbral" de actividad normal a excepcional. Este tipo de análisis funciona mediante la realización de dos preguntas simples (Bruce, 2012):

- ¿Cuál es el volumen normal o esperado para este tipo de delito, en esta área o en este periodo de tiempo?
- ¿Cómo se compara la actividad actual con la que es normal?

Luego el grado de desviación ayuda a que el analista clasifique sus análisis. Si los delitos o incidentes con violencia son inusualmente muchos en la zona de estudio. El análisis observa con mayor detención cada uno de los incidentes para encontrar si los patrones han emergido.

El análisis de umbral, es capaz de observar varios niveles geográficos, desde una pequeña área hasta toda una jurisdicción.

Según Bruce (2012), el análisis de umbral requiere de bases de datos históricas precisas de por lo menos tres años para cada tipo de delito o incidente del cual se pretende hacer cálculos, por lo que es recomendable, un conjunto de datos de cinco a siete años anteriores.

¿QUÉ ES NORMAL?

El análisis de umbral comienza calculando una cantidad "normal" o "esperada" para cada tipo de incidente durante un periodo de tiempo establecido por el analista (Bruce, 2012). Generalmente, esto se logra aplicando un promedio de los datos correspondientes a los tres años anteriores (2013-2015).

A continuación se explican los principales parámetros utilizados para la realización de este análisis.

PROMEDIO O MEDIA PARA LOS DELITOS O INCIDENTES:

Es la suma de los valores dividida para el número total de estos (n).

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \tag{1}$$

Donde μ es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis; x_j el número de delitos o incidentes ocurridos en cada año y n son el número total de años de análisis.

Además de la media, necesitamos saber la cantidad normal de desviación de esta media durante cierto lapso de años. Esto se determina mediante la Desviación Estándar de la media que nos indica cuanto se desvía usualmente cada puntaje de la media.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LOS DELITOS O INCIDENTES:

Se define como la raíz cuadrada, de la diferencia, la cual es la suma de los cuadrados de cada valor menos la media, dividida por n (Bruce, 2012).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \mu)^2}{n}} \tag{2}$$

Donde σ es la desviación estándar de los delitos o incidentes ocurridos en el periodo de análisis; x_j el número de delitos o incidentes ocurridos en cada año, μ es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis y n son el número total de años de análisis.

COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA LOS DELITOS O INCIDENTES:

También es importante calcular el Coeficiente de Variación (C.V.), el cual se obtiene dividiendo la desviación estándar para la media.

El coeficiente de variación más bajo es cero (si todos los valores son idénticos). No existe un máximo absoluto; pero en la práctica es poco común encontrar un C.V. mayor a uno.

Un C.V. con valor cerca de cero (0) indica muy poca diferencia entre los datos. Podría significar que el tipo de incidente tiene cantidades pequeñas y que es bastante predecible.

Un C.V. con valor cerca de uno (1) indica una variedad significativa estadística en el tipo de incidente de año a año, lo que lo hace muy impredecible.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \tag{3}$$

Donde el CV es el coeficiente de variación que determina el nivel de variación del comportamiento de los delitos e incidentes de año a año, σ es la desviación estándar de los delitos o incidentes ocurridos en el periodo de análisis y μ es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis.

PORCENTAJE DE CAMBIO PARA LOS DELITOS O INCIDENTES:

Es la diferencia entre el año actual y el promedio, dividido por el promedio.

$$Cambio = \frac{x_j - \mu}{\mu} * 100\% \tag{4}$$

Donde el *Cambio* es el porcentaje de variación del comportamiento de los delitos e incidentes del año actual con el prome-

dio de los años anteriores y μ es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis.

El problema del porcentaje de cambio es que no justifica la cantidad normal de fluctuación en la categoría del incidente analizado, la cual previamente hemos medido por medio de la desviación estándar. El porcentaje de cambio considera la diferencia en términos del promedio; pero lo que en realidad necesitamos es una estadística que considere la diferencia en términos de promedio y desviación estándar. Aquí es donde aparece el puntaje estándar (también llamado puntaje o valor z).

PUNTAJE O VALOR ESTÁNDAR (Z) PARA DELITOS O INCIDENTES:

El puntaje o valor estándar nos dice cuán lejos del promedio se encuentra un valor individual (por ejemplo del año en curso). Para propósitos del análisis del umbral, el puntaje estándar es la diferencia entre el año actual y el promedio, dividido por la desviación estándar (Bruce, 2012).

$$Z = \frac{x_j - \mu}{\sigma} \tag{5}$$

Donde el calor Z es el indicador que nos permite determinar si los delitos o incidentes han cruzado el umbral en determinadas áreas geográficas, x_j el número de delitos o incidentes ocurridos en cada año, μ es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis y σ es la desviación estándar de los delitos o incidentes ocurridos en el periodo de análisis.

Los puntajes o valores estándar funcionan en una escala que va de negativa a positiva. No existe un valor absoluto máximo ni mínimo para la escala; no obstante, la mayoría de los valores se encontrarán entre -1 y 1 y casi todos estarán entre -2 y 2. Valores mayores o menores se vuelven cada vez menos comunes.

Por lo general, se puede interpretar los puntajes estándar como se muestra a continuación:

TABLA I

Colores y escalas para el análisis de los delitos e incidentes ocurridos en determinada área geográficas del cantón Cuenca según el valor Z ponderado.

Color	Escala	Valor Z
	Frío	Bajo - 2
	Normal	-1 a 1
	Fresco	-1 a -2
	Templado	1 a 2
	Caluroso	Sobre 2

Para la Interpretación de puntaje o valor estándar Z:

- Bajo -2: El tipo de incidente es “frío”, Significativamente Bajo lo Normal. Se debe investigar qué factores pueden causar que este incidente esté disminuyendo, así se puede aplicar este logro en otro periodo de tiempo, otras áreas u otros delitos.
- -1 a -2: El tipo de incidente es “fresco”, Algún factor puede estar influyendo en que baje, o quizá sea sólo una fluctuación aleatoria.
- -1 a 1: El tipo de incidente es “normal”, Esta dentro del rango que esperaríamos para esta categoría.
- 1 a 2: El tipo de incidente es “templado”, Un poco más de lo normal. Hay que poner un poco más de atención.

- Sobre 2: El tipo de incidente es “caluroso”, En la mayoría de casos, algún factor externo influye en la categoría, a menudo un patrón o una serie que ocurra en el área. Estas categorías deben tener mayor atención para una mejor investigación y análisis. Observar Figura 1.

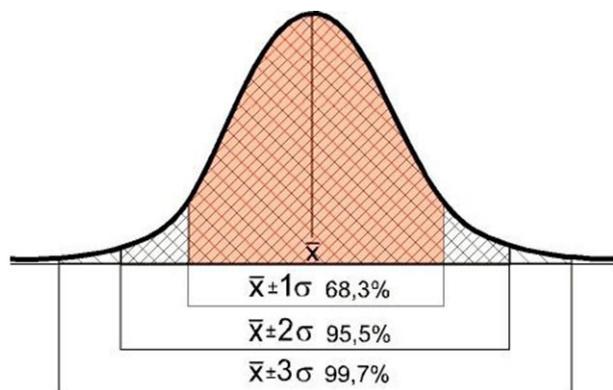


Figura 1. Campana de Gauss, donde se muestra los valores Z.

La teoría detrás del uso del puntaje estándar se basa en una distribución normal (representada por la campana de Gauss). El uso del puntaje estándar en esta instancia no es poner a prueba la significancia estadística, sin priorizar nuestro centro de atención.

Como ejemplo podemos referirnos a la TABLA V, que muestra que los homicidios y asesinatos cometidos con arma blanca han disminuido en un 8%, lo cual no suena a una reducción muy grande. Sin embargo, debido a que la delincuencia usualmente es bastante predecible, rara vez varía de un rango normal de 4-13 (promedio +/- la desviación estándar). El hecho de obtener este porcentaje es en realidad muy importante, lo cual indica el puntaje estándar z (-0,15), que tiene un comportamiento normal de año a año.

Por otra parte, los asesinatos y homicidios que se han cometido con arma contundente han disminuido en 50% lo que aparentaría ser importante. No obstante, debido a que la delincuencia varía de manera considerable de un año a otro, el puntaje estándar nos dice correctamente que la disminución en el año 2016 no es significativa en términos estadísticos.

El puntaje estándar sirve para definir el “umbral”, en el “análisis de umbral”. Los analistas tendrán que experimentar con los datos presentados. Los puntajes estándar altos son una buena señal de que un patrón, una serie o algún otro fenómeno están influyendo en la categoría (Bruce, 2012).

III. RESULTADOS

Los resultados que se han sido analizados mediante la metodología mencionada en el cantón Cuenca a nivel de parroquia, a continuación se muestra:

Los hallazgos presentados se lo realizaron para los Delitos contra la vida registrados en los años 2013, 2014, 2015 y 2016.

Los resultados del análisis de umbral enfocado en delitos contra la vida y registrados en el año 2016 representan el 63% en las parroquias urbanas. (TABLA II). En el período 2013-2016, el 17% de delitos contra la vida en promedio se registró en la parroquia El Vecino.

De acuerdo al análisis de umbral (valor Z), en las parroquias: Monay, San Blas, San Sebastián y Yanuncay existe una disminución estadística significativa leve (fresco) de 100% en

cada una en el año 2016 con respecto a los años anteriores; esto quiere decir que en las parroquias El Vecino, El Batán, Bellavista, El Sagrario, Gil Ramírez Dávalos y Totoracocha se presenta un incremento del 0% al 50% respectivamente y una disminución del 25% en la parroquia Sucre, lo cual estadísticamente no es significativo, mostrando un comportamiento normal a través del tiempo. En la parroquia Huayna Cápac observamos una disminución estadística significativa alta (frío) del 100%. En la parroquia Hermano Miguel existió un incremento del 200% en el año 2016 con respecto a los demás años, lo que significa un incremento estadístico significativo alto (caluroso) e indica la presencia de un factor externo de consideración en el año 2016.

Sin embargo los delitos contra la vida a nivel urbano muestran una disminución del 38%. Esta disminución es estadísticamente significativa leve (fresco), lo que quiere decir que existe algún factor que esté influyendo en la baja o solamente es una fluctuación aleatoria en el año 2016 con respecto a los demás años.

TABLA II
CANTÓN CUENCA: DELITOS CONTRA VIDA POR PERÍODO SEGÚN PARROQUIA URBANA (2013-2016).

Parroquia Urbana	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Prom.	Desv. Est.	C.V.	Año 2016	Cambio	Z	Escala
El Vecino	0	5	4	3,00	2,65	0,9	3	0%	0,03	normal
El Batán	4	0	0	1,33	2,31	1,7	2	50%	0,29	normal
Hermano Miguel	1	1	0	0,67	0,68	0,9	2	200%	2,31	caluroso
Machángara	0	2	1	1,00	1,00	1,0	2	100%	1,00	normal
Sucre	1	2	1	1,33	0,68	0,4	2	50%	1,15	templado
Bellavista	0	1	1	0,67	0,68	0,9	1	50%	0,58	normal
El Sagrario	0	2	0	0,67	1,15	1,7	1	50%	0,29	normal
Gil Ramírez Dávalos	2	1	0	1,00	1,00	1,0	1	0%	0,03	normal
Huayna Cápac	2	1	3	2,00	1,00	0,5	1	-50%	-1,00	normal
Monay	0	2	2	1,33	1,16	0,9	1	25%	-0,26	normal
Totoracocha	1	1	0	0,67	0,68	0,9	1	50%	0,58	normal
Yanuncay	3	4	1	2,67	1,63	0,6	1	-63%	-1,09	fresco
Canaribamba	1	0	0	0,33	0,68	1,7	0	-100%	-1,98	normal
San Blas	0	1	1	0,67	0,68	0,9	0	-100%	-1,15	fresco
San Sebastián	4	3	2	3,00	1,00	0,3	0	-100%	-3,00	frío
Total*	15	26	16	20,33	5,13	0,3	18	-11%	-0,45	normal

*Incluye únicamente los casos que cuentan con información de la parroquia donde se registró el delito.
Fuente: Fiscalía Provincial del Azuay
Datos sujetos a variación

Los resultados del análisis de umbral enfocado en delitos contra la vida y registrados en el año 2016 representan el 48% en las parroquias rurales. (TABLA III). En el período 2013-2016, el 38% de homicidios y asesinatos en promedio se registraron en las parroquias El Vecino, Yanuncay y San Sebastián.

De acuerdo al análisis de umbral (valor Z), en las parroquias: Victoria del Portete existe una disminución estadística significativa leve (fresco) de 100% en el año 2016 con respecto a los años anteriores; Algún factor puede estar influyendo en que baje, o quizá sea sólo una fluctuación aleatoria en esta área geográfica. En las parroquias El Valle y Baños se presenta un incremento del 200% respectivamente en el año 2016 con respecto a los demás años, lo que significa un incremento estadístico significativo alto (caluroso) y moderado (templado) e indica la presencia de un factor externo de consideración en el año 2016, que a menudo un patrón o una serie que ocurra en el área. Estas categorías deben tener mayor atención para una mejor investigación y análisis.

Mientras tanto que en la parroquia de Molleturo muestra una disminución del 100%. Esta disminución es estadísticamente significativa alta (frío), lo que quiere decir que es significativamente bajo lo normal. Se debe investigar qué factores pueden causar que este incidente esté disminuyendo, así se pue-

de aplicar este logro en otro periodo de tiempo, otras áreas u otros delitos, en el año 2016 con respecto a los demás años, mientras que en las demás parroquias el análisis de umbral nos muestra un comportamiento normal en el año 2016 con respecto a los años anteriores, quiere decir que el comportamiento delictual en estas áreas geográficas se mantienen los delitos e incidentes constantes en el tiempo.

TABLA III
CANTÓN CUENCA: DELITOS CONTRA VIDA POR PERÍODO SEGÚN PARROQUIA RURAL (2013-2016).

Parroquia Rural	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Prom.	Dev. Est.	C.V.	Año 2016	Cambio	Z	Escala
El Valle	1	1	0	0,67	0,56	0,9	2	200%	2,31	caluroso
Turi	2	0	1	1,00	1,00	1,0	2	100%	1,00	normal
Bañica	1	0	0	0,33	0,56	1,7	1	200%	1,15	templado
Paocha	0	0	0	0,00	0,00	0,0	1	100%	-	-
Sirincaiy	2	0	1	1,00	1,00	1,0	1	0%	0,00	normal
Chiquinad	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Laoco	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Molleturo	1	1	2	1,33	0,56	0,4	0	-100%	-2,31	frío
Nulvi	0	0	1	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Octavo Cercero	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Quingeo	0	1	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Ricaurte	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
San Joaquín	2	0	0	0,67	1,16	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Santa Ana	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Sayausi	1	1	1	1,00	0,00	0,0	0	-100%	-	-
Sicayá	0	0	1	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Victoria del Portete	0	1	1	0,67	0,56	0,9	0	-100%	-1,15	fresco
Total*	15	5	6	9,33	5,13	0,5	7	-25%	-0,45	normal

*Incluye únicamente los casos que cuentan con información de la parroquia donde se registró el delito.
Fuente: Fiscalía Provincial del Azuay.
Datos sujetos a variación

A continuación el análisis de umbral nos permite identificar las posibles causas que determinan estos tipos de delitos suscitados en el cantón Cuenca.

En promedio el 65% de casos de homicidios y asesinatos suscitados en el año 2016 se encuentran en investigación.

En la TABLA IV se observa que las causas de homicidios y asesinatos en investigación, riñas y violencia intrafamiliar mantienen un comportamiento normal en el tiempo de acuerdo al valor Z. mientras que en las causas de asalto/robo, venganza y problemas pasionales existen una disminución estadística significativa leve (fresco) a través del tiempo. Lo que quiere decir que los casos que más se dieron fueron por las causas de riñas callejeras y violencia intrafamiliar.

TABLA IV
CANTÓN CUENCA: DELITOS CONTRA LA VIDA POR PERÍODO SEGÚN CAUSA DEL SUCESO (2013-2016).

Causa del suceso	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Prom.	Dev. Est.	C.V.	Año 2016	Cambio	Z	Escala
En investigación	18	14	16	16,00	2,00	0,1	17	6%	0,50	normal
Riñas	6	3	2	3,67	2,08	0,6	4	9%	0,16	normal
Violencia intrafamiliar	1	1	0	0,67	0,68	0,9	1	60%	0,38	normal
Asalto/robo	2	1	3	2,00	1,00	0,5	0	-100%	-2,00	fresco
Venganza	2	2	2	2,00	0,00	0,0	0	-100%	-	-
Problema pasional	2	3	0	1,67	1,53	0,9	0	-100%	-1,08	fresco
Otros	6	8	5	6,33	1,53	0,2	4	-37%	-1,53	fresco
Total	37	32	29	32,33	4,51	0,1	26	-20%	-1,40	fresco

*Incluye únicamente los casos que cuentan con información de la parroquia donde se registró el delito.
Fuente: Fiscalía Provincial del Azuay.
Datos sujetos a variación

De la misma manera mediante el análisis de umbral se puede analizar el arma utilizada para el cometimiento de estos delitos donde nos muestra que en promedio el 44% de casos de homicidios y asesinatos suscitados en el periodo 2013-2016 fueron cometidos con arma blanca y arma de fuego.

En la TABLA V se observa que el delito perpetrado con arma de fuego presenta un incremento del 62%, variación que es

estadísticamente es significativa moderada (templada) según el valor Z (análisis de umbral); por el contrario los homicidios y asesinatos a través de ahorcadura presenta una disminución del 100% que es estadísticamente significativo leve (fresco) de acuerdo al valor Z, en el año 2016 con respecto a los años anteriores.

TABLA V
CANTÓN CUENCA: DELITOS CONTRA LA VIDA POR PERÍODO SEGÚN TIPO DE ARMA UTILIZADA (2013-2016)

Armas utilizadas	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Prom.	Dev. Est.	C.V.	Año 2016	Cambio	Z	Escala
Arma blanca	13	9	4	8,67	4,51	0,5	8	-8%	-0,15	normal
Arma de fuego	4	6	3	4,33	1,53	0,4	7	62%	1,75	templado
Objeto contundente	4	0	2	2,00	2,00	1,0	1	-50%	-0,50	normal
Estrangulación	2	1	1	1,33	0,58	0,4	1	-25%	-0,58	normal
Ahorcadura	0	2	2	1,33	1,15	0,9	0	-100%	-1,15	fresco
Otros	11	7	8	6,67	2,08	0,2	3	-65%	-2,72	frío
En investigación	3	7	8	6,00	2,65	0,4	6	0%	0,00	normal
Total	37	32	28	32,33	4,51	0,1	28	-20%	-1,40	fresco

*Incluye únicamente los casos que cuentan con información de la parroquia donde se registró el delito.
Fuente: Fiscalía Provincial del Azuay.
Datos sujetos a variación

IV. CONCLUSIONES

El análisis de umbral es una técnica estadística multivariante cuantitativa muy útil para identificar patrones delictuales en las áreas geográficas conflictivas en el cantón Cuenca, Ecuador, además permite analizar el comportamiento de las diferentes variables que identifican las posibles causas de los delitos que se incrementan o disminuyen.

Al aplicar el análisis de umbral para determinar la conflictividad estadísticamente en las áreas geográficas del cantón Cuenca, Ecuador, el mismo que muestra que la parroquia urbana Hermano Miguel y parroquia rural El Valle son las áreas donde se registró un comportamiento creciente de este delito a través del tiempo, presentando un incremento significativo estadísticamente del 200% de año a año, lo que quiere decir que el tipo de incidente es "caluroso", En la mayoría de casos, algún factor externo influye en la categoría, a menudo un patrón o una serie que ocurra en el área. Estas áreas deben tener mayor atención para una mejor investigación y análisis.

En la parroquia urbana Huayna Cápac y parroquia rural Molleturo, el análisis de umbral en estas áreas geográficas identifica una baja estadísticamente significativa del 100%, lo que quiere decir que el tipo de incidente es "frío", bajo lo normal; se debe investigar qué factores pueden causar que este incidente esté disminuyendo, así se puede aplicar este logro en otro periodo de tiempo, otras áreas u otros delitos. A demás se determina mediante el análisis de umbral que las posibles causas de estos delitos se deben a riñas y violencia intrafamiliar, y que la mayoría de estos delitos fueron cometidos con arma blanca y arma de fuego en un 62%.

Este tipo de análisis permite que se determinen los patrones delictuales o de incidencia en determinadas áreas geográficas, permitiendo profundizar el análisis y llegar a determinar las posibles causas de fondo, para poder dar explicación a la baja o incremento de este tipo de delitos dentro de una jurisdicción, como lo han venido realizando en otros países en Europa y actualmente en América Latina.

REFERENCIAS

Bruce, C. (2012). El análisis de umbral: utilizando estadísticas para Identificar patrones delictuales. En Varela, F. (Ed.). (2012). *Análisis delictual: técnicas y metodologías para la reducción del delito*. (pp. 88-97). International Association of Crime Analysts y Fundación Paz Ciudadana. Santiago de Chile.

Cuenca en cifras. CEE-SC. (2013, 2104, 2015 y 2016). *Boletín Estadístico del Consejo de Seguridad Ciudadana de Cuenca: Análisis estadístico cuantitativo y espacial de delitos y contravenciones ocurridos en el cantón Cuenca*. Capítulo I. Delitos contra la Vida. (pp. 11-17). Centro de Estudios Estratégicos del Consejo de Seguridad Ciudadana. Cuenca Ecuador.

Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca

Abad Lorena¹, Mejía Danilo^{1,2}

1 Carrera de Ingeniería Ambiental/
Facultad de Ciencias Químicas/Uni-
versidad de Cuenca
12 de Abril s/n y Agustín Cueva/
Azuay/Ecuador
lore.abad6@gmail.com

2 Centro de Estudios Ambientales/
Facultad de Ciencias Químicas/Uni-
versidad de Cuenca
Av. Víctor Manuel Albornoz s/n y
Av. De los Cerezos /Azuay/Ecuador
danilo.mejia@ucuenca.edu.ec

RESUMEN

Cuenca presenta alta contaminación atmosférica incluyendo emisiones por material particulado, que afectan a la salud de los pobladores y al desarrollo biótico por su interacción y permanencia en la atmósfera. Se identifica una ecuación empírica para estimar concentraciones de PM₁₀ a partir de correlaciones entre mediciones terrestres del contaminante con valores derivados de imágenes satelitales Landsat 8. Se genera un modelo de regresión lineal múltiple aplicando la reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) y niveles digitales (DN), con un coeficiente de determinación múltiple R² 0.55 y un valor-p de 0.002. Se obtiene un mapa de distribución de PM₁₀ para estimar concentraciones de este contaminante en sitios sin cobertura de la red de monitoreo de la ciudad. Incluir bandas térmicas en los modelos mejora notablemente el coeficiente de determinación. Sin embargo, existen zonas donde los valores estimados de PM₁₀ superan los rangos promedio, recomendando una validación in situ.

Palabras clave: **calidad del aire, contaminación urbana, material particulado, PM₁₀, sensores remotos, Landsat 8.**

ABSTRACT

Cuenca city presents high atmospheric pollution values due to traffic, industrial activity, and urban expansion, among other factors. Within the city main pollutants, particulate matter affects the citizen's health and biotic development due to their atmospheric interaction and permanence. The aim of the study is to identify an empirical equation to estimate particulate matter less than 10 micrometers in diameter (PM₁₀) concentrations through correlations between in situ measurements of this pollutant with values derived from Cuenca's urban area Landsat 8 satellite imagery. A multiple linear regression model is generated applying top of the atmosphere reflectance (TOA) and digital numbers (DN), which gives a multiple determination coefficient R² of 0.55 and a p-value of 0.002. The generated PM₁₀ distribution map allows the estimation of the pollutant's concentration in places where the monitoring network has no coverage. However, there are certain locations where estimated PM₁₀ values overpasses the average range, for which an in-situ validation is suggested.

Keywords: **air quality, urban pollution, particulate matter, PM₁₀, remote sensing, Landsat 8.**

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica ha sido estudiada y analizada dada su relación directa con la generación de problemas ambientales y de salud en los habitantes, principalmente de áreas urbanas con un marcado desarrollo industrial y productivo. Esto ha despertado la necesidad de monitorear las concentraciones de diversos contaminantes a través de equipos in situ, de manera que se puedan determinar las causas, formas de dispersión y las medidas preventivas y de control que se deben tomar para poder afrontar el problema (Christopher & Gupta, 2010; Grantz, Guo et al., 2014).

Las redes de monitoreo son los instrumentos utilizados para suministrar información regular sobre la calidad de aire, determinando parámetros como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, ozono, material particulado y datos meteorológicos (Jung, Y., Park, W., & Park, O. 2003; Grosso, Ferreira, & Mesquita, 2007). Estas cuentan con una buena resolución temporal y exactitud (Li & Hou, 2015). Las redes de vigilancia requieren de un análisis del territorio a monitorear, para determinar así el número y ubicación de las estaciones, así como la cantidad de parámetros de estudio, considerando la disponibilidad de recursos de la zona (Ministerio del Ambiente, 2010). A más de limitaciones económicas, las redes de monitoreo terrestres no ofrecen una cobertura global de las concentraciones de contaminantes, debido a que una estación representa un solo punto de observación y su generalización podría verse limitada con respecto al área de estudio. (Guo et al., 2014; Gupta et al., 2006; Othman, Jafri, & Lim, 2010).

El análisis de la atmósfera puede realizarse aplicando nuevas tecnologías, como es el caso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos. Los sensores remotos permiten, a través de imágenes satelitales, analizar propiedades físicas de la atmósfera, de manera que se pueden determinar concentraciones de contaminantes con una mayor área de visualización y estudio, aumentando así el rango de observación. De esta manera se aporta a los datos de monitoreo in situ permitiendo analizar los patrones de dispersión del contaminante a nivel global, regional o local (Grosso, Ferreira, & Mesquita, 2007). Los valores de concentración de contaminantes pueden obtenerse directamente con el uso de sensores propios para su detección o del procesamiento de estas imágenes y correlaciones de datos obtenidos con estas concentraciones. Algoritmos de determinación de Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) y de reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) son generalmente utilizados para la determinación de aerosoles, que posteriormente permiten estimar valores de material particulado.

El material particulado forma parte de los aerosoles, correspondiendo a las partes sólidas y líquidas, que no se depositan, sino que permanecen en la atmósfera, alcanzando grandes distancias y facilitando así su entrada al organismo a través de la vía respiratoria. Se clasifican en aquellas partículas con diámetro menor a 10 micras (PM_{10}) y aquellas con diámetro menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$). Las primeras pueden ingresar desde la nariz y la garganta hasta los pulmones, mientras que el $PM_{2.5}$ ingresa directamente a los alveolos pulmonares hacia el torrente sanguíneo (Brook et al., 2010). El material particulado es de importancia además para el ambiente debido a su capacidad de interacción con la atmósfera terrestre. Se han identificado impactos en aspectos bióticos como inhibición de la capacidad fotosintética en plantas y afecciones a la integridad física de la fauna cercana a focos de contaminación, incidiendo directamente en los ecosistemas (Christopher & Gupta, 2010; Grantz, Garner, & Johnson, 2003; Guo et al., 2014).

El uso de imágenes satelitales para el monitoreo de la calidad del aire aporta una visión global de la zona de estudio, indicando inclusive las fuentes de contaminación y donde se deben enfocar aquellas medidas de prevención y control. Esta tecnología es aplicable a la estimación de material particulado debido principalmente a sus características físicas que pueden ser detectadas a partir del espectro electromagnético. A pesar de su limitación temporal, las imágenes satelitales aportan con una visión única sobre la calidad del aire, complementando los métodos convencionales (Wald & Baleyraud, 1999).

La mayoría de estudios aplican distintos algoritmos de Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) para su posterior correlación con concentraciones de material particulado tanto PM_{10} como $PM_{2.5}$. Los algoritmos empleados varían en complejidad pues introducen variables físicas para su cálculo. Dentro del estudio de Aerosoles se ha utilizado el satélite Landsat con resultados positivos en lugares como Arabia Saudita, donde se toma en cuenta bandas RGB para encontrar un algoritmo multiespectral que permita modelar el comportamiento del PM_{10} en la atmósfera, concluyendo que son métodos aplicables para la generación de mapas de distribución de contaminantes y para ubicación de puntos de contaminación de áreas urbanas (Luo, Wong, Zhao, Yan, & Xiao, 2015; Othman et al., 2010).

La mayoría de estudios han sido realizados a nivel del mar o en localidades de baja altitud, con terrenos planos. Sin embargo, el área de estudio para la presente investigación se encuentra dentro de los Andes Neotropicales, en una ciudad de altura como es la ciudad de Cuenca a 2.550 m.s.n.m. con una topografía compleja. Los Andes Neotropicales incluyen Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela entre otros países, los cuales se caracterizan por ser sitios de alta biodiversidad atravesados por la Cordillera de los Andes (Bird Life International & Conservation International, 2005); cadena montañosa que contribuye a la diversidad climática y biótica dentro de la región (Kricher, 2010). El área de estudio presenta importantes propiedades topográficas a analizarse, ya que el cálculo de material particulado estimado a partir de información satelital puede verse influenciado por nubes convectivas o por sombras inducidas por el terreno (Emili, Popp, Riffler, & Bern, 2016). Por tanto, el objetivo de esta investigación es determinar valores de PM_{10} en el área urbana de la ciudad de altura de Cuenca a partir de valores de reflectancia y niveles digitales recuperados de imágenes satelitales Landsat 8.

II. MÉTODO

A. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprendió la zona urbana de la ciudad de Cuenca, perteneciente al cantón Cuenca, provincia del Azuay, ubicada en la región seis de la República del Ecuador. La ciudad cuenta con una superficie de 70,59 km² y una población de 331.888 habitantes (INEC, 2010). Se localiza en la zona centro sur del país, a 2.550 m.s.n.m. en un valle del callejón interandino de la parte meridional de la Cordillera de los Andes. Se encuentra atravesada por cuatro ríos: Tomebamba, Yanuncay, Tarqui y Machángara. Su clima es templado con una temperatura promedio de 15 °C, sin embargo, puede presentar cambios bruscos de clima en el transcurso del día.

De acuerdo al Reporte de Calidad del Aire del 2011, la ciudad de Cuenca presenta una deterioración de la calidad del aire, y, por tanto, en la calidad de vida de sus ciudadanos debido al

tráfico vehicular, actividad industrial y expansión urbana. El reporte concluye que ciertas áreas de la ciudad no cumplen con los parámetros establecidos por las normativas nacionales e internacionales, destacando que el material particulado (PM_{2.5}) - obtenido a partir de correlaciones empíricas con PM₁₀ - presenta concentraciones de contaminantes preocupantes y nocivas para la calidad del aire de la ciudad (Alcaldía de Cuenca & Red de Monitoreo EMOV EP., 2012).

B. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para la presente investigación se obtuvieron tanto, datos in situ de calidad del aire del área de estudio, así como imágenes satelitales que cubrieron la misma.

Los datos in situ incluyeron básicamente mediciones de material particulado menor a 10 micras, los cuales provienen de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca de la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte, EMOV-EP, activa desde el año 2010. Esta red está provista de una subred activa de PM₁₀, que cuenta con tres equipos semiautomáticos de alto volumen para la obtención de muestras durante 24 horas consecutivas de exposición, con un intervalo de frecuencia de toma de muestras de 6 días y un porcentaje de error del 8% (Dávila, 2016). Estos equipos cuentan con una escala urbana/vecinal y se encuentran distribuidos (Figura 1) en tres estaciones de monitoreo a lo largo de la ciudad (Alcaldía de Cuenca & Red de Monitoreo EMOV EP., 2012), cuyas coordenadas se detallan en la Tabla I. La base de datos se evaluó en el programa Excel del paquete Microsoft Office Professional Plus 2013 en busca de vacíos de información e incongruencias, y en los softwares R versión 3.2.2 y RStudio versión 0.99.484 donde se obtuvo estadística descriptiva, para finalmente resumir la información en una matriz con datos promedio y máximos mensuales.

Las imágenes satelitales utilizadas correspondieron al satélite Landsat 8. Su órbita se encuentra a 705 km de altura y tiene una resolución espacial de 30 metros para el sensor Operational Land Imager (OLI) y 100 metros para el Thermal Infrared Sensor (TIRS); y una resolución temporal de 16 días (Knight & Kvaran, 2014; Reuter et al., 2015). Las imágenes se obtuvieron de la base de datos de la USGS [http://earthexplorer.usgs.gov]. Se buscaron imágenes de los años 2013 y 2014 de los cuales se contó con una base de datos in situ completa, recuperando aquellas en path: 10 y row: 62. Para su selección se analizó que las imágenes cuenten con una cobertura de nubes menor al 60%, procurando que el área de estudio se encuentre despejada. Las imágenes elegidas para el estudio se encuentran enlistadas en la Tabla II, trabajando con un total de siete imágenes para el periodo de estudio mencionado.

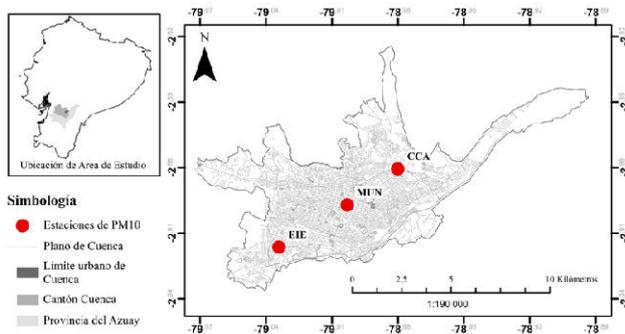


Figura. 1. Mapa de ubicación de estaciones de PM₁₀ de la Red de Monitoreo EMOV-EP.

TABLA I

COORDENADAS DE UBICACIÓN DE ESTACIONES DE PM₁₀ DE LA RED DE MONITOREO EMOV-EP (FUENTE DE DATOS: EMOV-EP, 2013)

CÓDIGO	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD
CCA	Colegio Carlos Arizaga Vega	-2,880532°	-78,980024°
MUN	Municipio	-2,897001°	-79,003000°
EIE	Escuela Ignacio Escandón	-2,916303°	-79,034047°

TABLA II

IMÁGENES UTILIZADAS PARA LA OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN SATELITAL (FUENTE DE DATOS: USGS, 2013 - 2014)

CÓDIGO	FECHA	NUBOSIDAD	NUBOSIDAD ÁREA DE ESTUDIO
LC80100622013124LGN01	04/05/2013	59,86%	20%
LC80100622013220LGN00	08/08/2013	37,39%	15%
LC80100622013332LGN00	28/11/2013	36,91%	0%
LC80100622014063LGN00	04/03/2014	58,61%	10%
LC80100622014159LGN00	08/06/2014	56,76%	10%
LC80100622014207LGN00	26/07/2014	42,77%	5%
LC80100622014303LGN00	30/10/2014	37,52%	10%

Adicionalmente se utilizó una base de datos meteorológica, que se obtuvo de estaciones manejadas por la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana, ubicadas en diferentes puntos del cantón Cuenca. Información de temperatura y humedad relativa se utilizó en la fase de validación del modelo, a más de un mapa térmico generado con las imágenes satelitales Landsat 8 seleccionadas. Se analizará a profundidad el objetivo de uso y proceso aplicado a estos datos en la sección pertinente.

C. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes Landsat 8 contienen esencialmente Números Digitales (DN) cuantificados y calibrados a escala tanto en las imágenes del sensor OLI y del sensor TIRS. Los datos de DN pueden ser transformados a valores de radiancia y posteriormente de reflectancia. La primera consiste en convertir la información a valores de radiancia del sensor con información de calibración del mismo. La segunda transformación convierte los valores de radiancia del sensor a valores de radiancia en la superficie de la tierra o reflectancia (Hameed & Hasan, 2014). Para el caso de productos Landsat 8, específicamente del sensor OLI, los metadatos contienen factores que convierten directamente los DN a valores de reflectancia, sin realizar la conversión de radiancia. Para este proceso se aplicaron los algoritmos presentados en la Ecuación 1 y la Ecuación 2 (USGS, 2015).

$$\rho\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p \tag{1}$$

donde $\rho\lambda'$ es la Reflectancia planetaria en el tope de la atmósfera (TOA), sin corrección para el ángulo solar, M_p es el Factor de escala multiplicativa específico para cada banda obtenido de los metadatos (REFLECTANCE_MULT_BAND_X, donde x es la banda), A_p es el Factor de escala aditiva específico para cada banda obtenido de los metadatos (REFLECTANCE_ADD_BAND_X, donde x es la banda), Q_{cal} es el Valor de pixel standard cuantificado y calibrado (DN).

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos \theta_{SZ}} = \frac{\rho\lambda'}{\sin \theta_{SE}} \tag{2}$$

donde $\rho\lambda$ es la Reflectancia planetaria en el tope de la atmósfera (TOA), $\rho\lambda'$ es la Reflectancia planetaria en el tope de la

atmósfera (TOA) sin corrección para el ángulo solar, θ_{SE} es el ángulo de elevación local del sol, proporcionado en los metadatos (SUN_ELEVATION), θ_{SZ} es el ángulo cenital del sol y θ_{SZ} es el resultado de $90^\circ - \theta_{SE}$.

Los algoritmos presentados se aplicaron en las bandas del sensor OLI, desde la Banda 1 a la Banda 7, excluyendo la banda pancromática (Banda 8) y cirros (Banda 9) debido a que su resolución espacial es diferente y sus aplicaciones son distintas a los propósitos de la investigación. Para tal propósito se utilizó el software QGIS versión 2.10.1 - Pisa, con ayuda de Semi-Automatic Classification Plugin versión 4.9.3 - Frascati, desarrollado por Lucas Congedo que permite realizar la clasificación semi-automática y supervisada de imágenes satelitales, pre-procesamiento de imágenes, post-procesamiento de clasificaciones y cálculos ráster (Congedo & Munafò, 2012).

En una primera instancia del estudio, se pretendía utilizar como variables la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD, por sus siglas en inglés Aerosol Optical Depth) que no es más que la diferencia entre la reflectancia TOA y la reflectancia en la superficie terrestre (DOS1, por el método aplicado para su cálculo), según indica la Ecuación 3. Se realizó el cálculo de esta variable en las imágenes seleccionadas, sin embargo, no se obtuvieron los resultados esperados, por lo cual el método no se analizó a profundidad, pero será discutido posteriormente.

$$OD = TOA - DOS1 \quad (3)$$

D. CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS

Una vez aplicados los algoritmos a las bandas seleccionadas de las imágenes del área de estudio, se procedió a armar la base de datos que sirvió para la generación del modelo de regresión lineal múltiple. Para esto se tomó el valor de reflectancia TOA del píxel correspondiente a la ubicación de las estaciones de PM₁₀ in situ, para cada una de las bandas del sensor OLI y adicionalmente el valor de DN de las bandas 10 y 11 del sensor TIRS.

Estas últimas bandas se adicionaron ya que probaron tener éxito al momento de estimar material particulado, donde el coeficiente de determinación de Pearson aumenta notablemente al incluir la banda térmica del satélite Landsat en el modelo de regresión (Lim et al., 2004), lo cual se planteó comprobar en este estudio también.

Los datos de PM₁₀, por su parte, se obtuvieron de cada estación considerando la fecha de toma de muestra posterior más cercana a la fecha de la imagen satelital, considerando que la toma de muestras se realiza cada seis días, por tanto, asumiendo que el dato posterior más próximo representó la concentración de PM₁₀ para el día de toma de cada imagen.

De esta recuperación de información se obtuvo una matriz de datos con 21 observaciones, pues existen tres estaciones y siete imágenes a analizar; con nueve variables a correlacionarse con la concentración de PM₁₀ in situ, considerando los valores de reflectancia TOA de la banda 1 a la 7 y los DN de las bandas 10 y 11.

E. OBTENCIÓN, APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Se utilizó el software R para la generación de los modelos de regresión lineal múltiple. De manera inicial, se realizaron combinaciones de cuatro, tres, dos y una de las nueve variables utilizadas debido al número limitado de datos, para determinar la mejor combinación de las mismas. El modelo de regresión corresponde a un modelo lineal y con múltiples

variables que ayudan a estimar o predecir la variable independiente que en este caso es el PM₁₀. Para aplicar el modelo se siguió la Ecuación 4, la cual permitió encontrar la mejor combinación de variables entre sí.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (4)$$

donde y es la variable independiente, x_i son las variables dependientes o regresores y b_i son las constantes determinadas empíricamente.

A partir del coeficiente de determinación R^2 (el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson) se evalúa la variabilidad de los datos explicados por el modelo, siendo valores cercanos a 1 equivalentes a una relación perfecta. En la investigación se obtuvieron aquellos modelos con un coeficiente de determinación que explique una variabilidad mayor al 50% ($R^2 > 0.5$) y con un nivel de significancia menor al cinco por ciento (valor- $p < 0.05$), para analizar las variables que componen cada uno, de manera que pudieron eliminarse aquellos con variables que tengan coeficientes de determinación altos entre sí (covariables). Posteriormente, se seleccionaron los mejores modelos que cumplieran con las condiciones establecidas y se realizó un análisis de los residuales de los mismos para determinar el de mejor comportamiento estadístico, hasta obtener un modelo final que sirvió para la estimación de PM₁₀ en el área de estudio.

Adicionalmente, se realizó una validación cruzada de los modelos preliminares, aplicando el método que deja un valor fuera. Esta validación se realizó con el objetivo de medir el comportamiento predictivo del modelo estadístico y determinar si existe un sobreajuste del modelo seleccionado (Hyndman, 2010).

La ecuación generada a partir del modelo se aplicó a las imágenes que presenten el área de estudio completamente despejada. Por lo tanto, se utilizó la imagen del 4 de marzo, 26 de julio y 30 de octubre de 2014, las cuales no presentaron nubosidad sobre la ciudad de Cuenca.

Por último, se realizaron correlaciones de los resultados de las concentraciones de PM₁₀ obtenidos con información de temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del suelo. Se obtuvieron datos de temperatura y humedad relativa de los días y horas correspondientes a las imágenes satelitales previamente mencionadas que fueron interpolados con el método de CoKriging utilizando la altura de cada punto como variable de correlación. Posteriormente se realizó un promedio de los rústers de temperatura ambiente y humedad relativa generados. Para el caso de la temperatura del suelo, se generaron mapas térmicos con las imágenes mencionadas haciendo uso de las bandas térmicas y del índice de vegetación normalizado dentro de su algoritmo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. ANÁLISIS DEL MODELO GENERADO

Los resultados preliminares obtenidos de las combinaciones utilizadas para generar los distintos modelos y que cumplen con los criterios establecidos se resumen en la Tabla III. Se incluyó junto a ellos los valores de coeficiente de determinación R^2 , a más de esto el R^2 ajustado y el valor- p con el cual se puede comprobar que se cumplen los criterios previamente establecidos.

TABLA III
MODELOS PRELIMINARES RESULTANTES DE LAS REGRESIONES LINEALES MÚLTIPLES

MODELO	ECUACIÓN	R ²	R ² AJ.	VALOR-P
A	PM ₁₀ = -130 + 0,005*DN_B11 + 616*TOA_B2 - 45,6*TOA_B4 - 193*TOA_B5	0,5571	0,4464	0,0081
B	PM ₁₀ = -127 + 0,004*DN_B11 + 592*TOA_B2 - 223*TOA_B5 + 13,3*TOA_B6	0,5557	0,4446	0,0083
C	PM ₁₀ = -126,9 + 0,005*DN_B11 + 582,7*TOA_B2 - 207,1*TOA_B5	0,5548	0,4763	0,0027

A partir del análisis de los modelos obtenidos, se eligió el modelo C que cumplió con los criterios establecidos y que además tuvo las mejores características estadísticas para representar el comportamiento del material particulado menor a diez micras en el área de estudio. El modelo final es el que se presenta en la Ecuación 5.

$$PM_{10}(\mu/m^3) = -126,9 + 582,7 * TOA_{Banda 2} - 207,1 * TOA_{Banda 5} + 0,005039 * DN_{Banda 11} \quad (5)$$

donde PM₁₀ (μg/m³) es la Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras en microgramos por metro cúbico en función de parámetros multiespectrales del satélite Landsat 8, TOA Banda 2 es la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 2, TOA Banda 5 es la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 5 y DN Banda 11 es el número digital de la banda 11.

El análisis estadístico del modelo se encuentra resumido en la Tabla IV donde se indica un error residual estándar de 7,589 μg/m³ con 17 grados de libertad, ya que se trabajó con 21 observaciones y 4 variables dentro del modelo. Conociendo que los valores de PM₁₀ que se presentaron en el área de estudio se encontraron entre 12 y 110 μg/m³ aproximadamente, se considera un valor aceptable de error de estimación de las concentraciones.

El coeficiente de determinación (R²) es de 0,5548; a pesar de ser un valor aparentemente bajo, estudios previos en esta área presentan valores de R² entre 0,6 y 0,8 (Amanollahi, Abdullah, Farzanmanesh, Ramli, & Pirasteh, 2011; Grosso et al., 2007; Gupta et al., 2006; Othman et al., 2010; Wang & Christopher, 2003). Tomando en cuenta la gran cantidad de limitantes al momento de realizar el modelo de regresión, principalmente el número de observaciones, se puede decir que el valor del coeficiente de determinación es aceptable para la estimación de concentraciones de PM₁₀ en el área de estudio, aunque podría mejorarse tomando en cuenta un mayor número de observaciones en investigaciones futuras.

El coeficiente de determinación ajustado fue de 0,4763, siendo este el mayor coeficiente de los tres modelos preliminares analizados. Este valor fue positivo y relativamente alto por lo que se acepta para el modelo final. El valor-p por su parte es de 0,002738, un nivel de significancia aceptable considerando que es menor a 0,05, siendo estadísticamente significativo.

TABLA IV
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO SELECCIONADO

Residuales:					
	Mínimo	Cuartil 1	Mediana	Cuartil 3	Máximo
	-10,827	-4,745	-2,078	6,020	13,262
Coeficientes:					
	Estimado	Error Estándar	Valor-t	Pr(> t)	
(Intercepción)	-126,9	36,28	-3,499	0,00275	**
DN_B11	0,005039	0,001423	3,541	0,00251	**
TOA_B2	582,7	168,4	3,461	0,00299	**
TOA_B5	-207,1	84,29	-2,457	0,02506	*

Código de significancia: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1					
Error residual estándar: 7,589 en 17 grados de libertad					
R-cuadrado múltiple: 0,5548, R-cuadrado ajustado: 0,4763					
Estadística-F: 7,063 en 3 y 17 GL, valor-p: 0,002738					

Del modelo seleccionado se pudo observar que la combinación de información que presentó el coeficiente de determinación más alto y que además cumplió con los criterios, incluyó bandas con resoluciones espectrales distintas. Se cuenta con la reflectancia TOA de la banda 2 o banda azul, que cubre longitudes de onda entre 0,45 y 0,51 μm dentro del espectro visible; reflectancia TOA de la banda 5 o banda del infrarrojo cercano, con longitudes de onda entre 0,85 y 0,88 μm, ambas con una resolución espacial de 30 metros; y DN de la banda 11 o banda del térmico infrarrojo 2, con longitudes de onda entre 11,50 y 12,51 μm y con una resolución espacial de 100 metros.

A diferencia de otros estudios, el presente se ha visto limitado por la cantidad de observaciones con las que se trabaja, únicamente 21, por lo que se han visto necesarias las técnicas para la limitación del número de variables utilizadas, de manera que estadísticamente los resultados puedan considerarse representativos. Sin embargo, se ha observado en otros estudios (Gupta et al., 2006; King, Kaufman, Tanré, & Nakajima, 1999; Li & Hou, 2015; Lim et al., 2004; Othman et al., 2010; Wong, Matjafri, Abdullah, & Lim, 2009) que utilizan una mayor cantidad de variables que las bandas generalmente utilizadas son aquellas que corresponden al espectro visible, es decir, las bandas 2, 3 y 4 para el caso del satélite Landsat 8. Estos estudios presentan buenos resultados al momento de estimar las concentraciones de PM₁₀, pero, vale la pena señalar que las bandas citadas tienen alta correlación entre sí (Tabla V con valores subrayados), lo cual podría estar introduciendo un ruido o un error en los modelos generados en estos estudios.

TABLA V
MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES MULTIESPECTRALES Y TÉRMICAS

	TOA_B1	TOA_B2	TOA_B3	TOA_B4	TOA_B5	TOA_B6	TOA_B7	DN_B10	DN_B11
TOA_B1	1,000								
TOA_B2	0,974	1,000							
TOA_B3	0,944	0,922	1,000						
TOA_B4	0,821	0,820	0,891	1,000					
TOA_B5	0,714	0,761	0,848	0,840	1,000				
TOA_B6	0,461	0,455	0,644	0,840	0,785	1,000			
TOA_B7	0,398	0,419	0,539	0,813	0,699	0,965	1,000		
DN_B10	0,122	0,170	0,304	0,426	0,455	0,540	0,518	1,000	
DN_B11	0,034	0,083	0,190	0,310	0,320	0,420	0,417	0,971	1,000

Las bandas del infrarrojo cercano han formado parte de los modelos para la estimación de la concentración de material particulado (Li & Hou, 2015; Wald & Baleynaud, 1999), con resultados positivos como en el modelo generado en el presente estudio. Además, la incorporación de las bandas térmicas tuvo un resultado favorable pues presentaron una buena

correlación para los modelos preliminares, comprobando, así como en el estudio de Lim et al. (2004), que estas bandas permiten mejorar la estimación de las concentraciones de PM₁₀.

Las longitudes de onda encontradas en el modelo resultante siguen además conceptos lógicos, ya que el material particulado esencialmente será percibido dentro del espectro visible, al ser un contaminante que se dispersa en el aire ambiente, generando problemas de visibilidad. Asimismo, para el caso de bandas dentro del espectro térmico como son las bandas 5 y 11, ya que el material particulado se relaciona a periodos de mayor temperatura por ser épocas secas que no permitan que los contaminantes se asienten en la superficie y se propicie su dispersión.

B. VALIDACIÓN DEL MODELO GENERADO

Para seleccionar el modelo final se hizo un análisis de los residuales, donde finalmente se seleccionó el modelo C, el cual presentó las gráficas estadísticamente más aceptables que permiten tomar el modelo como válido.

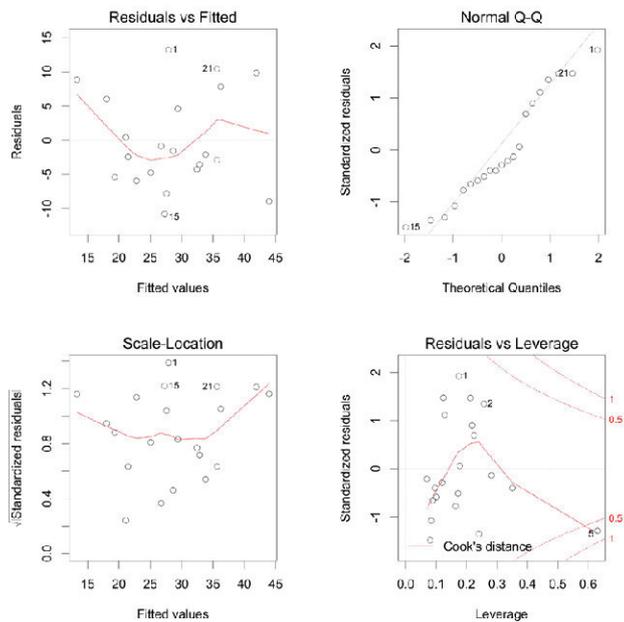


Figura 2. Gráficas de diagnóstico de residuales del modelo de regresión seleccionado.

En la Figura 2 se pueden observar cuatro gráficas para el análisis de residuales. La gráfica 1: Residuals vs. Fitted muestra que, para el caso del modelo seleccionado, considerando la baja cantidad de observaciones con las que se trabaja, se pudo considerar que los datos se encuentran dispersos y no presentan un patrón definido, por lo que no puede asegurarse una relación lineal de los datos debido a la falta de información.

La gráfica 2: Normal Q-Q muestra que los residuales si se encuentran aproximadamente dentro del patrón aceptable, tocando nuevamente en cuenta que la cantidad de observaciones es baja por lo que lo que pueden parecer patrones en realidad podría explicarse por una falta de datos suficientes para la interpretación de la gráfica de diagnóstico.

La gráfica 3: Scale-Location indica una dispersión de los datos alrededor de una línea curva; a pesar de que se pudo suponer cierto patrón para las variancias de los residuales se consideró aceptable dadas las condiciones limitantes previamente mencionadas.

La gráfica 4: Residuals vs. Leverage permite ver que uno de los datos se encuentra por encima de la distancia Cook, el dato #5, sin embargo, su distancia no es significativa. Para asegurar que este dato no tiene una influencia ni un apalancamiento importante, se volvió a correr el modelo sin este dato, dando resultados similares, sin afectar en gran medida al modelo de regresión, por lo que se decidió mantener el dato dentro del análisis.

Para complementar la validación del modelo a partir del análisis de residuales, se realizó una validación cruzada que comprende en dejar un valor fuera de los modelos preliminarmente seleccionados de manera que se puede identificar el modelo con el mejor ajuste de los datos. Tras la validación se identificó el modelo C como aquel con menor error cuadrático medio (77,7) y mejor comportamiento estadístico como se puede observar en la Tabla VI. A más de esto, se observan las gráficas resultantes de la validación cruzada para los modelos preliminares (Figura 3).

TABLA VI
ANÁLISIS DE VARIANZA MODELO A, B Y C.

ANÁLISIS DE VARIANZA: MODELO A						
	GL	Suma Cuad.	Media Cuad.	Valor F	Pr(>F)	
DN_B11	1	522	522	8,58	0,0098	**
TOA_B2	1	350	350	5,75	0,0290	*
TOA_B4	1	126	126	2,06	0,1700	
TOA_B5	1	227	227	3,73	0,0714	.
Residuales	16	974	61			

Error Cuadrático Medio: 97,5						

ANÁLISIS DE VARIANZA: MODELO B						
	GL	Suma Cuad.	Media Cuad.	Valor F	Pr(>F)	
DN_B11	1	522	522	8,55	0,0099	**
TOA_B2	1	350	350	5,74	0,292	*
TOA_B5	1	348	348	5,69	0,0297	*
TOA_B6	1	2	2	0,03	0,8612	
Residuales	16	977	61			

Error Cuadrático Medio: 99						

ANÁLISIS DE VARIANZA: MODELO C						
	GL	Suma Cuad.	Media Cuad.	Valor F	Pr(>F)	
TOA_B2	1	422	422	7,33	0,0149	*
TOA_B5	1	76	76	1,31	0,2676	
DN_B11	1	722	722	12,54	0,0025	**
Residuales	17	979	58			
Residuales	16	977	61			

Error Cuadrático Medio: 77,7						
Códigos Sign.: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

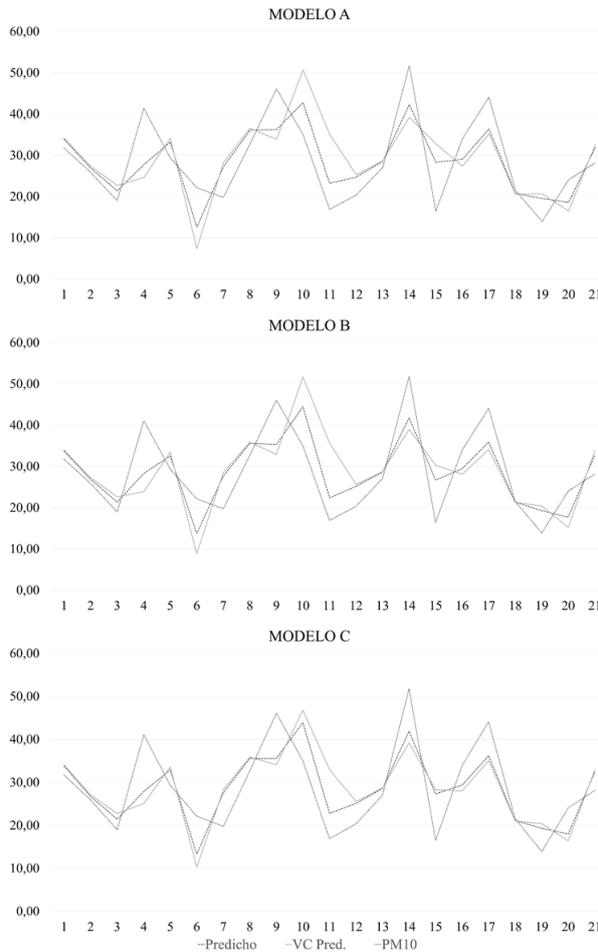


Figura 3. Gráficas comparativas de errores cuadráticos medios de validación cruzada para los modelos preseleccionados.

C. APLICACIÓN DE ECUACIÓN

Al momento de aplicar la ecuación al área de estudio se observaron valores elevados al estimar las concentraciones de PM₁₀ en zonas específicas de la ciudad. Por ende, se vio necesario comprobar si estos valores extremos se debían a la influencia de variables meteorológicas. Para esto se utilizaron mapas interpolados de temperatura y humedad relativa además de un mapa térmico, correspondientes a la hora y día de cada una de las imágenes satelitales utilizadas para representar el comportamiento de la concentración estimada de PM₁₀. Se realizó una correlación entre un promedio de los mapas de material particulado, y un promedio de los mapas de temperatura, humedad relativa y temperatura del suelo, obteniendo como resultado valores sin una relación directa entre ellos, los cuales se observa en la Tabla VII.

En la tabla se observa que ninguna de las variables meteorológicas analizadas presentó correlaciones significativas con respecto a la concentración estimada de PM₁₀, por lo que se requiere de un análisis más profundo y de validación in situ de estos valores extremos para encontrar la causa de estos errores dentro del modelo, a realizarse en investigaciones futuras.

TABLA VII
MATRIZ DE CORRELACIÓN DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA CON LA CONCENTRACIÓN ESTIMADA DE PM₁₀.

	Estimación PM ₁₀	Humedad Relativa	Temperatura	Temperatura Suelo
Estimación PM ₁₀	1,000			
Humedad Relativa	-0,110	1,000		
Temperatura	0,087	-0,710	1,000	
Temperatura Suelo	0,135	-0,495	0,446	1,000

D. MAPA DE ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE PM₁₀

Una vez seleccionado el modelo final y validado de manera estadística, se aplicó la ecuación encontrada a imágenes satelitales que presentaron el área de estudio completamente despejada; obteniendo así un mapa para cada una de estas imágenes en los que se pudo visualizar el comportamiento del PM₁₀ estimado en la ciudad de Cuenca, como se observa en la Figura 4.

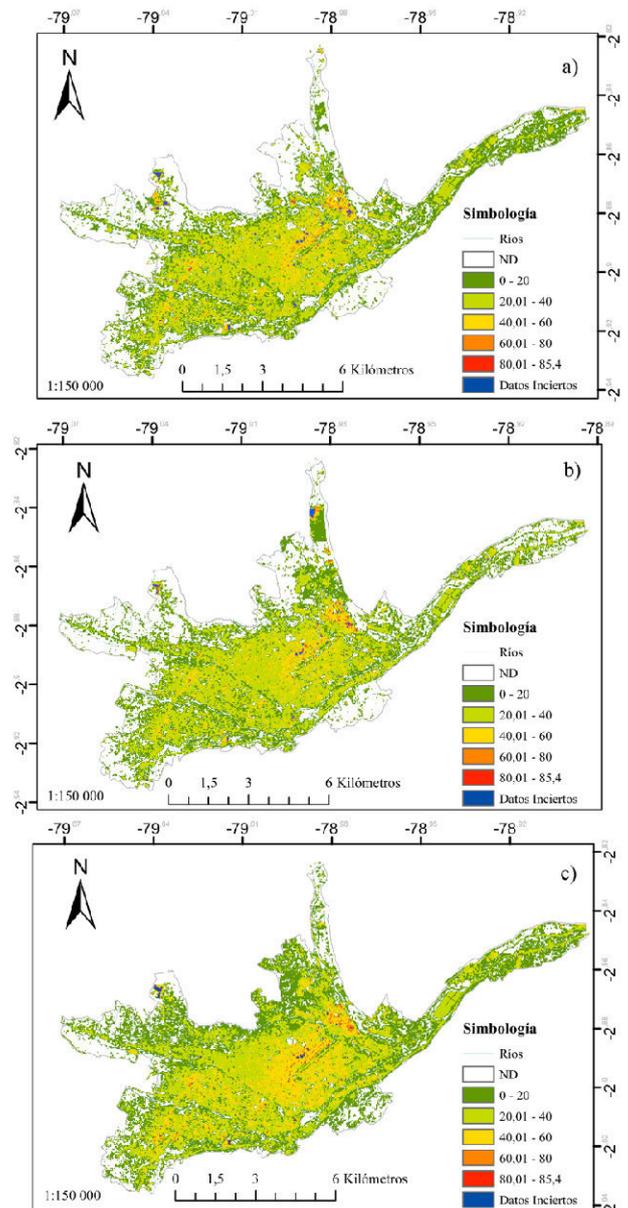


Figura 4. Mapa de estimación de la concentración de PM₁₀ en la ciudad de Cuenca. a) Mapa para el 4 de marzo de 2014. b) Mapa para el 26 de julio de 2014. c) Mapa para el 30 de octubre de 2014.

En los mapas resultantes se mostraron valores estimados de PM₁₀ que alcanzaron concentraciones altas que sobrepasan los 50 µg/m³, valor límite para la concentración promedio en 24 horas según la OMS, e inclusive una gran cantidad de píxeles que presentan valores mayores a 100 µg/m³, valor límite según la normativa ecuatoriana. Sin embargo, se observaron píxeles con valores extremos los cuales se encuentran en distintos lugares del área de estudio. Las correlaciones realizadas con las variables temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del suelo no proporcionaron una explicación para la causa de estos valores, razón por la cual se decidió tomarlos como valores inciertos para su posterior validación en futuras investigaciones. Para determinar el límite sobre el cual los datos se consideran como inciertos, se tomó el valor máximo de concentración de PM₁₀ en el área de estudio para el periodo de datos utilizado en el modelo de regresión, es decir 2013 - 2014, fijando este valor en 85,4 µg/m³.

IV. CONCLUSIONES

Una característica importante de las redes de monitoreo es su alcance espacial, con un radio de monitoreo corto y limitado, existiendo la necesidad de contar con un número mínimo de estaciones, el cual según la OMS es de dos para ciudades con poblaciones menores a un millón de habitantes (Martinez & Romieu, 2003). Sin embargo, se ve necesario un mayor alcance, por lo cual en este caso de estudio se aplica una técnica alternativa, como es la teledetección, para estimar las concentraciones de este contaminante.

El modelo generado para la estimación de este contaminante aplica valores multispectrales y térmicos de las imágenes satelitales Landsat 8 trabajadas. Se puede destacar de la investigación realizada que el uso de la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) no presentó resultados demasiado significativos como en otros estudios previamente mencionados, sino que el uso de la reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) tuvo mejores resultados por lo cual fue aplicada para la generación de los modelos de regresión lineal múltiple, arrojando resultados que representaron de mejor manera la realidad de la calidad del aire en el área de estudio. A más de esto, se incluyeron los números digitales (DN) de las bandas térmicas en el modelo, con un buen resultado, incluyendo la banda 11 en el modelo final.

Los resultados de la regresión lineal múltiple fueron aceptables, generando una ecuación empírica que permitió estimar los valores de las concentraciones de PM₁₀ y representar de manera visual el comportamiento de este contaminante en la ciudad. Con un coeficiente de determinación de 0,55, considerado admisible según la revisión del estado del arte y tomando en cuenta la cantidad limitada de información con la que se cuenta para realizar el análisis pertinente. Además de esto, el coeficiente de determinación R² ajustado de 0,47 y un valor-p de 0,002 permiten reconocer la ecuación encontrada como estadísticamente aplicable, habiendo realizado además un análisis de los residuales siendo este de entre los modelos preliminares el de mejor comportamiento. A más de esto, la validación cruzada dejando uno afuera realizada para los modelos preliminares indica que el modelo C presenta el menor error cuadrático medio (77,7) a partir del cual se puede reconocer que el modelo no se encuentra sobreestimado y permite predecir, aunque con cierta incertidumbre el comportamiento del PM₁₀ en el área de estudio.

Los mapas generados se ajustaron al comportamiento observado en el área de estudio, pues las zonas con mayor con-

centración de contaminantes vienen a estar representadas por aquellos lugares donde la actividad industrial y el tráfico vehicular son elevados, así como otras circunstancias que pueden contribuir a la propagación del PM₁₀ en la ciudad. No obstante, existen píxeles en los cuales la estimación de contaminante sobrepasó los rangos que se manejan en el periodo de análisis de los datos del modelo (2013 - 2014), por lo que se marcaron como datos inciertos (datos mayores a 85,4 µg/m³).

Durante la investigación se intentó encontrar una correlación de estos datos y variables como temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del suelo, de manera que puedan explicarse estos valores sobrestimados, sin embargo, no se tuvo un resultado positivo, viéndose necesaria una validación in situ en los puntos en cuestión la cual requiere de tiempo y necesidad de días con poca nubosidad para poder realizar las mediciones y obtener las imágenes despejadas; razón por la cual no se realiza los monitoreos en esta ocasión, sino que se mantiene pendiente para la validación de resultados en futuras investigaciones.

El modelo generado para la estimación de PM₁₀ es una primera aproximación al comportamiento de este contaminante en la ciudad, considerando que la cantidad de equipos de muestreo (tres) existentes por parte de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de la EMOV-EP es insuficiente para realizar una interpolación de los datos generados, razón por la cual no existen mapas de distribución del mismo en los informes de calidad del aire anuales presentados por esta entidad.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Químicas, Carrea de Ingeniería Ambiental y al Centro de Estudios Ambientales (CEA) por continuar apoyando la investigación de la Química Atmosférica en los Andes del Ecuador, un agradecimiento especial a Galo Carrillo por su magnífico respaldo en el estudio de los Sensores Remotos.

REFERENCIAS

- Alcaldía de Cuenca, & Red de Monitoreo EMOV EP. (2012). Informe de Calidad del Aire, año 2011. Cuenca, Ecuador.
- Amanollahi, J., Abdullah, M. M., Farzanmanesh, R., Ramli, M., & Pirasteh, S. (2011). PM₁₀ distribution using remotely sensed data and GIS techniques; Klang Valley, Malaysia. *EnvironmentAsia*, 7, 104-111.
- Bird Life International, & Conservation International. (2005). Áreas Importantes para la Conservación de las Aves en los Andes Tropicales: sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad. Quito: BirdLife International.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., ... Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American heart association. *Circulation*, 121(21), 2331-2378. <http://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8e1>
- Christopher, S. A., & Gupta, P. (2010). Satellite Remote Sensing of Particulate Matter Air Quality: The Cloud-Cover Problem. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(5), 596-602. <http://doi.org/10.3155/1047-3289.60.5.596>
- Congedo, L., & Munafò, M. (2012). Development of a Methodology for Land Cover Classification in Dar es Salaam using Landsat Imagery, (January 2012), 48. Retrieved from <http://www.planning4adaptation.eu/>
- Dávila, M. (2016). Visita Técnica a la Estación de Monitoreo Activa de Calidad de Aire de la EMOV-EP.
- Emili, E., Popp, C., Riffler, M., & Bern, U. (2016). PM₁₀ remote sensing from geostationary SEVIRI and polar-orbiting MODIS sensors over the complex terrain of the European Alpine region. *Remote Sensing of Environment*, 114(September), 2485-2499. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.024>
- Grantz, D. ., Garner, J. H. ., & Johnson, D. . (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29(2-3), 213-239. [http://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](http://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- Grosso, N., Ferreira, F., & Mesquita, S. (2007). Improvement in particles (PM₁₀) urban air quality mapping interpolation using remote sensing data. *Air Pollution Modeling and Its Application XVIII, Volume 6(07)*, 265-274. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1474-8177\(07\)06031-7](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1474-8177(07)06031-7)
- Guo, Y., Feng, N., Christopher, S. a., Kang, P., Zhan, F. B., & Hong, S. (2014). Satellite remote sensing of fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality over Beijing using MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 35(17), 6522-6544. <http://doi.org/10.1080/01431161.2014.958245>
- Gupta, P., Christopher, S. a., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y., & Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40(30), 5880-5892. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.016>
- Hadjimitsis, D. G. (2009). Aerosol optical thickness (AOT) retrieval over land using satellite image-based algorithm. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2, 89-97. <http://doi.org/10.1007/s11869-009-0036-0>
- Hameed, S., & Hasan, G. (2014). Estimation of PM₁₀ Concentration using Ground Measurements and Landsat 8 OLI Satellite Image. *Journal of Geophysics & Remote Sensing*, 3(2), 1-6. <http://doi.org/10.4172/2169-0049.1000120>
- Hyndman, R. J. (2010). Why every statistician should know about cross-validation. Retrieved from <http://robjhyndman.com/hyndsight/crossvalidation/>
- INEC. (2010). Información Censal.
- Jung, Y., Park, W., & Park, O. (2003). Pollution dispersion analysis using the puff model with numerical flow field data, 30, 277-286. [http://doi.org/10.1016/S0093-6413\(03\)00024-7](http://doi.org/10.1016/S0093-6413(03)00024-7)
- King, M. D., Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Nakajima, T. (1999). Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from Space: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11), 2229-2259. [http://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<2229:RSOTAF>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<2229:RSOTAF>2.0.CO;2)
- Knight, E., & Kvaran, G. (2014). Landsat-8 Operational Land Imager Design, Characterization and Performance. *Remote Sensing*, 6(11), 10286-10305. <http://doi.org/10.3390/rs61110286>
- Kricher, J. (2010). *Un Compañero Neotropical* (3rd ed.). American Birding Association, Inc.
- Li, B., & Hou, L. (2015). Discuss on Satellite-Based Particulate Matter Monitoring Technique. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3(May), 219-223. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-219-2015>
- Lim, H. S., Matjafri, M. Z., Abdullah, K., Saleh, N. M., & Alsultan, S. (2004). Remote sensing of PM₁₀ from LANDSAT TM imagery. *Acrcs 2004*, 739-744.
- Luo, N., Wong, M. S., Zhao, W., Yan, X., & Xiao, F. (2015). Improved aerosol retrieval algorithm using Landsat images and its application for PM₁₀ monitoring over urban areas. *Atmospheric Research*, 153(0), 264-275. [http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.08.012](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.08.012)
- Martin, R. V. (2008). Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, 42(34), 7823-7843. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.018>
- Martinez, A. P., & Romieu, I. (2003). Estrategia De Monitoreo. In Comunidad Europea (Ed.), *Introducción al monitoreo atmosférico*. (pp. 7-37). Bruselas: Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Retrieved from <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/intromon/cap2.pdf>
- Meena, G. S., Londhe, A. L., Bhosale, C. S., & Jadhav, D. B. (2009). Remote sensing " ground-based automatic UV / visible spectrometer " for the study of atmospheric trace gases. *International Journal of Remote Sensing*, 30(21), 5633-5653. <http://doi.org/10.1080/01431160802698901>

- Ministerio del Ambiente. (2010). Plan Nacional de la Calidad de Aire (Vol. 46). Ecuador.
- Othman, N., Jafri, M. Z. M., & Lim, H. S. (2010). Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing : A Case Study in Makkah, Saudi Arabia. *Modern Applied Science*, 4(11), 131-142.
- Reuter, D., Richardson, C., Pellerano, F., Irons, J., Allen, R. G., Anderson, M., ... Thome, K. (2015). The Thermal Infrared Sensor (TIRS) on Landsat 8: Design Overview and Pre-Launch Characterization. *Remote Sensing*, 7(1), 1135-1153. <http://doi.org/10.3390/rs70101135>
- USGS. (2015). Using the USGS Landsat 8 Product. Retrieved June 22, 2016, from http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php
- Wald, L., & Baleynaud, J. . (1999). Observing air quality over the city of Nantes by means of Landsat thermal infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(5), 947-959. <http://doi.org/10.1080/014311699213019>
- Wang, J., & Christopher, S. A. (2003). Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 2095. <http://doi.org/10.1029/2003GL018174>
- Wong, C. J., Matjafri, M. Z., Abdullah, K., & Lim, H. S. (2009). Temporal and Spatial Air Quality Monitoring using Internet Surveillance Camera and ALOS Satellite Image. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 185-191.

Calibración de un Modelo Basado en Agentes para el estudio del peligro de inundación en el río Santa Bárbara

Orellana Daniel^{1,2}, Timbe Luis², Pinos Juan²

1 Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Cuenca
Av. 12 de Octubre, Cuenca / Azuay / Ecuador
daniel.orellana@ucuenca.edu.ec

2 Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca
Av. 12 de Abril, Cuenca / Azuay / Ecuador
luis.timbe@ucuenca.edu.ec, juan.pinosf@ucuenca.edu.ec

RESUMEN

Las inundaciones por desborde de ríos representan uno de los riesgos naturales más importantes en las ciudades andinas. Una gestión efectiva del riesgo de inundación requiere información espacio-temporal sobre las zonas afectadas y la profundidad del agua para eventos de crecida en diferentes períodos de recurrencia. El objetivo de este artículo es comparar los resultados de un modelo conceptual de inundaciones basado en agentes (ABM) con los de un modelo hidráulico (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System HEC-RAS) para el estudio de riesgos de inundación en el Río Santa Bárbara (Gualaceo, Provincia del Azuay, Ecuador). La metodología empleada consiste en los siguientes pasos: A. Conceptualización del comportamiento del agua con respecto a la topografía, B. Implementación del modelo conceptual utilizando un modelo basado en agentes, C. Aplicación del modelo en un caso piloto, y finalmente D. Calibración de resultados con un modelo hidráulico bi-dimensional. Los resultados indican que los mapas de superficie inundada obtenidos por el modelo ABM son comparables a los del modelo hidráulico HEC-RAS. En cuanto a la profundidad del agua, el modelo ABM produce valores similares a los de HEC-RAS para la zona central del área de estudio mientras que las zonas altas y bajas presentan diferencias importantes. Por otro lado, el modelo ABM automatizado permite cuantificar fácilmente la probabilidad de inundación. Los ABM constituyen una alternativa viable a los modelos hidráulicos bi-dimensionales para estudiar cómo los errores altitudinales de los modelos digitales de elevaciones se propagan hacia los mapas de peligro de inundación. A su vez estos modelos constituyen herramientas clave para representar y comunicar la incertidumbre asociada a dichos modelos.

Palabras clave: **Modelos basados en agentes, simulación de inundaciones, gestión de riesgos, modelos digitales de elevaciones.**

ABSTRACT

Floods due to overflowing rivers represent one of the most important natural hazards in Andean cities. Effective flood risk management requires spatio-temporal information on affected areas and water depth for flood events at different recurrence periods. The aim of this paper is to compare the results of a conceptual agent-based model with a two-dimensional hydraulic model (HEC-RAS) for the study of flood risks in the Santa Bárbara River

(Gualaceo, Azuay Province, Ecuador). The methodology consists of the following steps: A. Conceptualization of water behavior related to topography. B. Implementation of the agent-based model. C. Pilot application for the case of the Santa Barbara River. D. Model calibration using a two-dimensional hydraulic model. The results indicate that the flooded surface maps obtained by the ABM model are comparable to those of the HEC-RAS hydraulic model. As for water depth, the ABM model produces values similar to those of HEC-RAS for the central section of the study area, while the high and low zones present important differences. On the other hand, the automated ABM model allows to easily quantify the probability of flooding. ABM is a viable alternative to two-dimensional hydraulic models to study how altitudinal errors on digital elevation models propagate to flood hazard maps. In turn, these models are key tools for representing and communicating the uncertainty associated with these models.

Keywords: Agent Based Models, Flood simulation, Risk management, Digital Elevation Models.

I. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones fluviales representan uno de los riesgos naturales más importantes en las ciudades andinas debido a su frecuencia y altos impactos económicos. A pesar de los esfuerzos cada vez mayores de los organismos de planificación y gestión, los daños por inundaciones siguen en aumento en todo el mundo (Milly, Wetherald, Dunne, & Delworth, 2002). Una gestión efectiva del riesgo de inundación requiere información espacio-temporal sobre los eventos de crecida de los ríos, las zonas aluviales potencialmente afectadas y la profundidad del agua para eventos de crecida con diferentes períodos de recurrencia. Esta información es generalmente presentada en “mapas de inundación”.

Frente a la carencia parcial o total de información histórica de áreas inundadas, es posible analizar el peligro de inundación a través de modelos hidráulicos. Estos modelos implican al menos tres componentes: estimación de caudales de crecida (mediante modelización hidrológica o análisis de valores extremos de caudales observados), modelización hidráulica para estimar la profundidad del agua, y análisis de elevaciones del terreno para estimar las áreas de inundación (Whiteaker, Robayo, Maidment, & Obenour, 2006). Comúnmente, el resultado de estos modelos de inundación consiste en un mapa determinístico que representa el área inundada y la profundidad del agua para un flujo de caudal determinado. Por ejemplo, en la zona de influencia del río Burgay se ha utilizado un modelo hidráulico unidimensional para estimar las zonas inundables (Timbe & Timbe, 2012). Sin embargo, los valores estimados del caudal y de las elevaciones del terreno no están exentos de errores e incertidumbres, las cuales se propagan a través de los modelos afectando el resultado final (Merwade, Olivera, Arabi, & Edleman, 2008). Como consecuencia, los mapas determinísticos de inundación no suelen incluir información relacionada a los errores asociados a los datos de entrada y menos aún al grado de incertidumbre del resultado final. Esto puede tener implicaciones complejas en la toma de decisiones de planificación, prevención y respuesta a los riesgos de inundaciones.

Entre las diferentes fuentes de incertidumbre en los modelos de inundaciones, la topografía es una de las variables que más influye en la precisión de los resultados finales (Cook & Merwade, 2009; Saksena & Merwade, 2015). La topografía es usualmente representada en un modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés). Wechsler (2007) reporta varios aspectos de los DEMs que pueden afectar los modelos hidráulicos, entre ellos: los errores de medición, la escala impuesta, los métodos de interpolación utilizados, y los algoritmos de procesamiento empleados para generar DEMs hidrológicamente viables. Es imprescindible, por lo tanto, estudiar y cuantificar los efectos que tienen los errores altitudinales en los modelos de inundaciones y valorar la incertidumbre de los mapas producidos.

El estudio de la propagación de errores puede ser implementado utilizando diferentes enfoques, entre los cuales están aquellos basados en simulaciones de Monte Carlo. Este tipo de enfoques se basan en realizar cientos o miles de repeticiones de un modelo variando uno o más parámetros de entrada y analizar las características estadísticas de los resultados de salida. De esta manera, conociendo la distribución de probabilidad de la incertidumbre de las variables de entrada, es posible conocer la distribución de probabilidad del resultado.

En la práctica, el principal inconveniente de la utilización de simulaciones de Monte Carlo para el estudio de propagación de errores en los modelos hidráulicos de crecidas es la limitada capacidad de automatización de los paquetes informáticos utilizados, dificultando así el análisis y la cuantificación de la incertidumbre de los resultados del modelo. Por ejemplo, HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), uno de los paquetes informáticos más utilizados para simulación de inundaciones, permite automatizar el componente unidimensional, pero no tiene capacidades de automatización para los DEMs de entrada del componente bidimensional (Brunner, 2016).

Una posible solución frente esta limitación es implementar un modelo de inundaciones conceptual utilizando un enfoque de Modelos Basados en Agentes (ABM, por sus siglas en inglés). Los ABMs son una familia de modelos de sistemas complejos en los cuales los elementos del mundo real se modelan como agentes individuales relativamente autónomos, cada uno con un comportamiento potencialmente heterogéneo e independiente, que es capaz de interactuar con otros agentes y con su entorno. Dos características clave de los ABMs los hacen interesantes para la modelación de inundaciones. Por un lado, la relación espacial entre los agentes es modelada de forma explícita, pues el entorno de los agentes (llamado “mundo” en los lenguajes ABM) es definido con sus fronteras y propiedades. Por otro lado, las características globales del sistema no se modelan directamente (top-down), sino que aparecen como resultado de las interacciones individuales, como un fenómeno emergente (bottom-up) (Holland, 2000). Los ABM facilitan, por lo tanto, el estudio de sistemas complejos a partir de las unidades que los componen, permitiendo explorar escenarios experimentales de la realidad desde lo más simple hacia lo más complejo (Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008).

Los modelos de crecidas basados en agentes constituyen una prometedora aproximación al estudio de inundaciones, ya que permiten gran flexibilidad y excelentes posibilidades de automatización. Sin embargo, se conoce poco si los resultados de la simulación de inundaciones con ABMs son comparables a aquellos producidos por los modelos hidráulicos clásicos (basados en las propiedades físicas) aplicados en cuencas andinas.

El objetivo de éste artículo, por lo tanto, es comparar el mapa de inundaciones resultante de un modelo conceptual basado

en agentes con el mapa producido por un modelo hidráulico bidimensional (HEC-RAS) para el estudio de la gestión de riesgo de inundación en el Río Santa Bárbara (Gualaceo, Provincia del Azuay, Ecuador) tomando en cuenta solamente la topografía. Adicionalmente, busca demostrar la viabilidad de los ABMs para generar mapas que permitan cuantificar y comunicar la incertidumbre de los resultados producidos por los errores en dichos modelos.

Las restantes secciones de este artículo se estructuran como sigue: La sección II presenta detalles sobre la implementación de un modelo conceptual de inundaciones basado en agentes y su aplicación para analizar el riesgo de inundaciones en la ciudad de Gualaceo, Ecuador. La sección III presenta mapas de inundación del modelo conceptual y los compara con mapas obtenidos a través de un modelo hidráulico implementado en HEC-RAS. Finalmente, la sección IV expone las principales conclusiones de los autores sobre la viabilidad del uso de ABM para la modelación de inundaciones por desborde de ríos.

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente estudio comprende de las siguientes fases: A) Conceptualización del comportamiento del agua, B) Implementación del modelo conceptual utilizando un modelo basado en agentes, C) Aplicación del modelo en un caso piloto, y finalmente D) Calibración de resultados con un modelo hidráulico bi-dimensional.

A. MODELO CONCEPTUAL DE COMPORTAMIENTO DEL AGUA

El comportamiento del agua durante un evento de inundación es un fenómeno altamente complejo, pues está influenciado por factores como el caudal de ingreso, la topografía y la rugosidad del terreno. Todos estos factores suelen ser considerados en las ecuaciones de flujo de los modelos hidráulicos. Para ésta investigación se ha optado por el principio de parsimonia con el fin de producir un modelo lo suficientemente sencillo como para poder ser implementado con un método basado en agentes que sea automatizable, pero que a su vez represente adecuadamente las interacciones entre el agua y la topografía. Aunque la intención del presente artículo no es presentar el modelo basado en agentes (el cual se detalla en otra publicación en elaboración), en los siguientes párrafos se presenta una breve descripción del mismo.

El modelo conceptual se basa en la analogía de la bañera: El comportamiento del agua en el terreno es modelado como un conjunto de bañeras comunicadas por tuberías y localizadas en cada celda del DEM. El flujo desde una celda se modelada a partir de la diferencia entre la altura absoluta del agua en una celda y cada una de las celdas vecinas. Si la altura del agua en la celda central es mayor, el agua fluye hacia las celdas vecinas; si es menor, el agua fluye de las celdas vecinas hacia la celda central; si la altura es igual, el flujo es cero (Figura 1).

B. IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO BASADO EN AGENTES

La implementación de ésta analogía en un modelo basado en agentes es relativamente directa. Se modelan dos tipos de agentes: "celda" y "agua"; los agentes "celda" representan las localizaciones con sus respectivos valores de elevación del terreno (th), mientras que los agentes "agua" representan las bañeras. Con el fin de optimizar el modelo, los agentes "agua" se crean progresivamente según fluye el agua dentro del modelo. El lugar por donde el agua entra al "mundo" es modelado asignando a una o varias celdas la propiedad "origen". Durante la ejecución del modelo, cada agente "agua" escanea su entorno y compara la altura absoluta de agua con la de

sus celdas vecinas. Si la altura es mayor, se crea un agente "agua" en la celda correspondiente y se determina la cantidad de agua a fluir en función de la diferencia de altura. Este proceso se repite en cada paso del tiempo. Cuando el agua llega al "borde del mundo" fluye hacia fuera y se elimina del modelo. El "origen y borde del mundo" equivale a las condiciones de contorno de un modelo hidráulico tradicional.

Este comportamiento relativamente sencillo a nivel individual da lugar a un comportamiento complejo a nivel global, y permite recrear diversos escenarios tales como el desborde de un río o las inundaciones por lluvia. Es importante notar que el modelo no incluye otros factores que afectan el comportamiento del agua, tales como la velocidad de flujo la infiltración o los coeficientes de fricción de Manning.

El modelo se implementó en lenguaje NetLogo 6.0 utilizando como base un modelo desarrollado por Ligtenberg y de Bruin en el Laboratory of Geo-information Science and Remote Sensing de Wageningen University (Países Bajos). Los detalles del modelo, así como el código completo serán publicados como material adicional de un artículo de próxima publicación dedicado al tema.

La implementación del modelo permite parametrizar todas las variables de un evento de inundación. Entre ellas, las más importantes para simular un evento de caudal pico son: Flujo base, que representa el caudal en m^3/s del río en condiciones normales y que es utilizado para estabilizar el modelo como condición inicial antes del evento de inundación. Tiempo de estabilización, es el tiempo necesario para estabilizar el modelo, y representa el tiempo en minutos del mundo real que tarda el agua en recorrer el cauce del río desde el inicio hasta el fin de la zona de estudio. Flujo pico, es el caudal máximo que se alcanza durante un evento de crecida. Tiempo pico, es el tiempo en minutos del mundo real en el que se alcanza el flujo pico. Tiempo Final, es el tiempo que dura la simulación en minutos del mundo real. Este conjunto de parámetros forma el "hidrograma" del evento de inundación. Por lo tanto, cada simulación está definida por su correspondiente hidrograma de caudal.

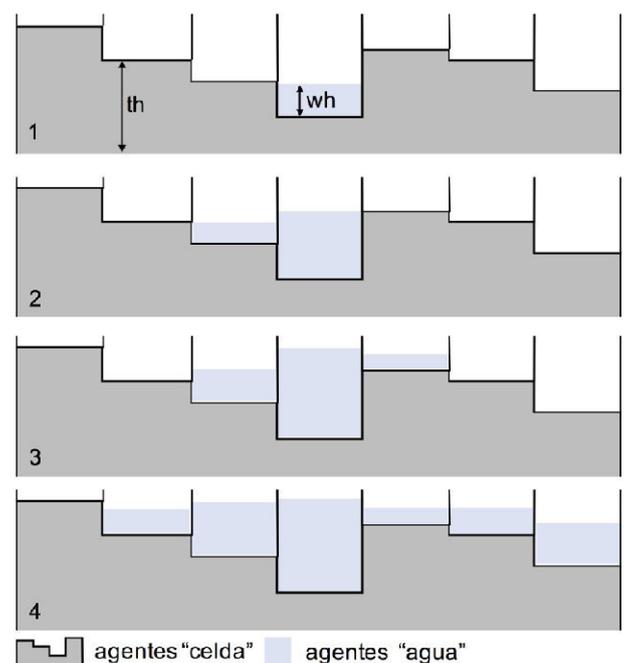


Figura 1. Modelo conceptual de la bañera para representar la interacción del flujo de agua con la topografía. DOI: 10.6084/m9.figshare.5047057.

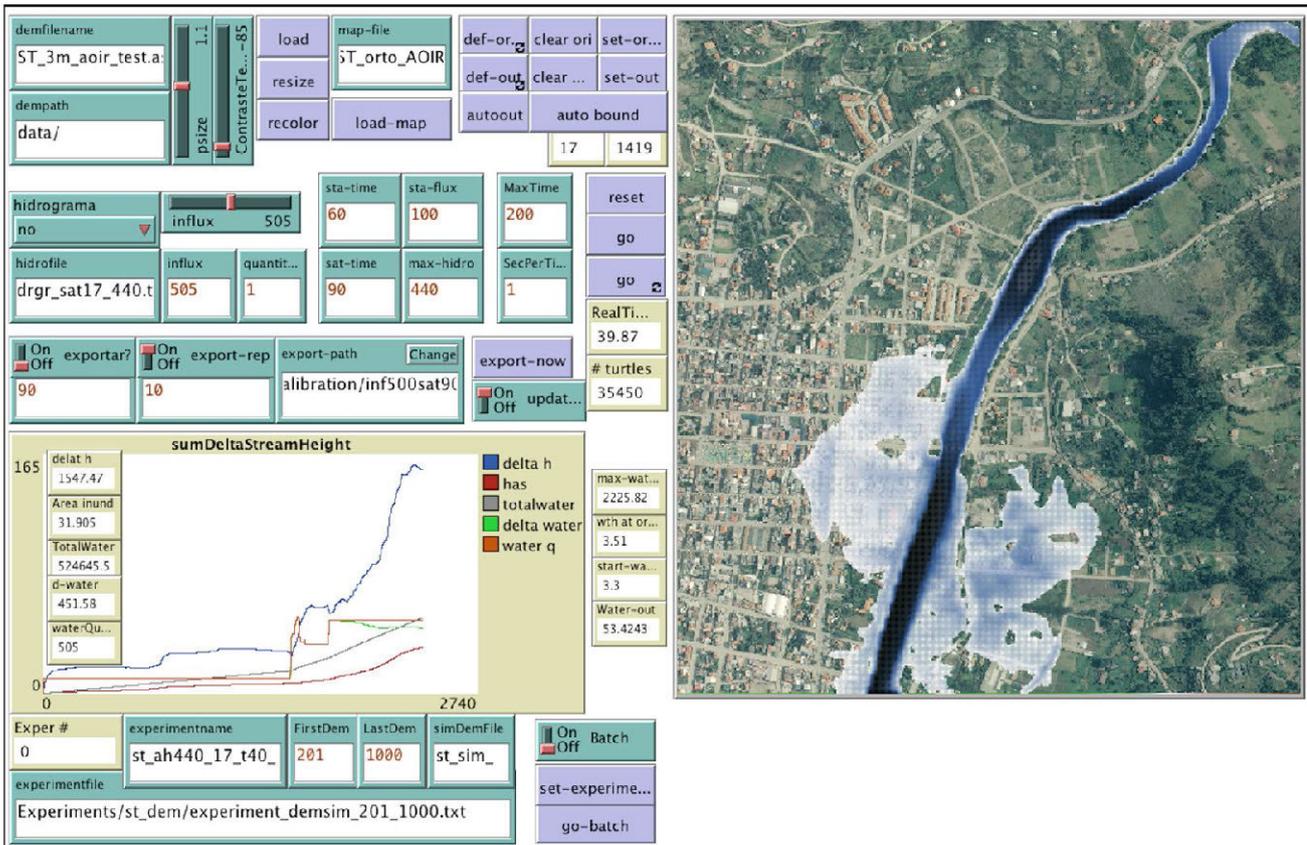


Figura 2: Interfaz de usuario del modelo implementado en NetLogo 6.0. DOI: 10.6084/m9.figshare.5047057.

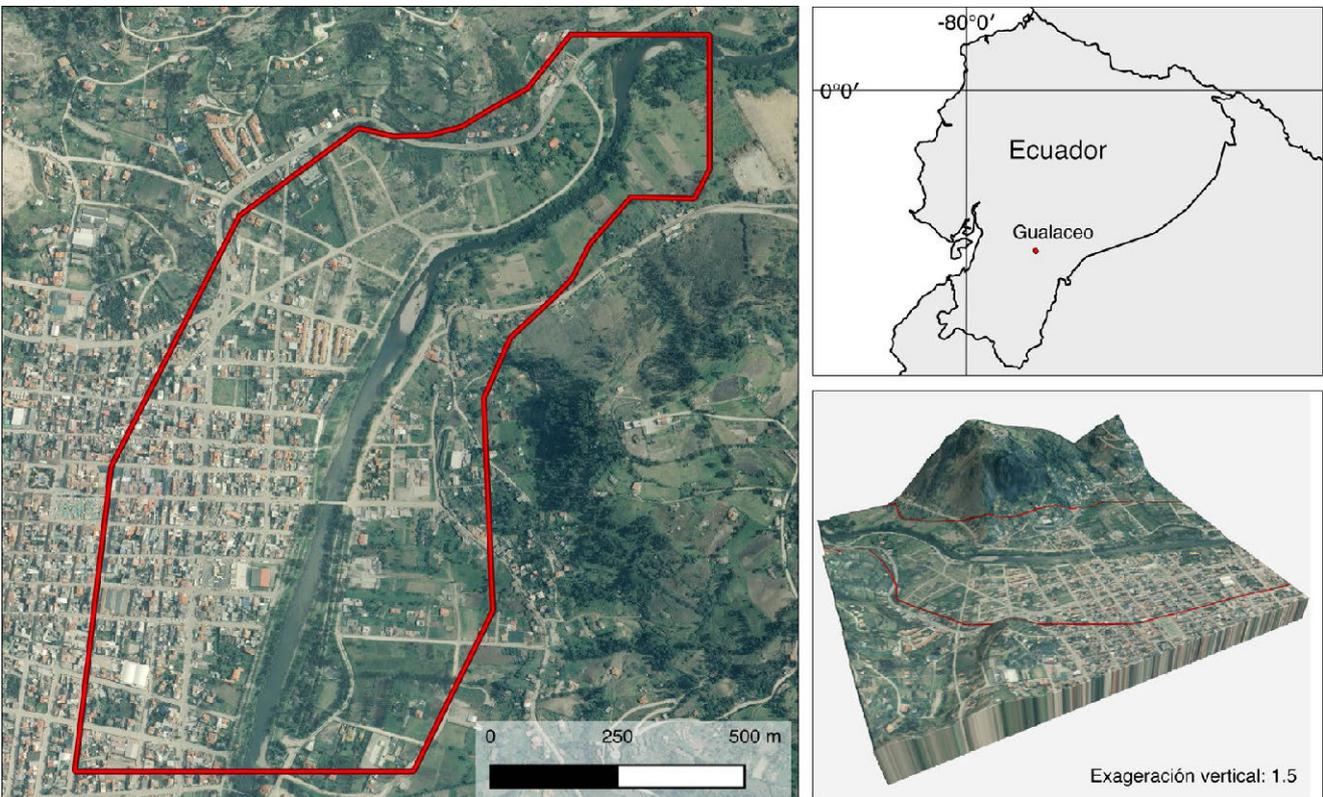


Figura 3. El área de estudio está constituida por la zona de influencia del río Santa Bárbara a su paso por la ciudad de Gualaceo (Azuay, Ecuador). El recuadro inferior derecho es una representación tridimensional de la zona

Adicionalmente, se definen las condiciones de borde, es decir el comportamiento del agua al ingresar y al salir del modelo. Estas condiciones incluyen: Origen, es el conjunto de celdas que definen el lugar por donde el agua entra al modelo, es decir la parte más alta del cauce del río. Salida, es el conjunto de celdas que definen los sitios por los que el agua puede salir del modelo. La figura 2 muestra la interfaz del modelo implementado.

C. APLICACIÓN PILOTO

El modelo implementado fue puesto a prueba para estudiar el comportamiento del agua en un evento de inundación del río Santa Bárbara. El área de estudio comprende la zona de influencia del río Santa Bárbara en la zona norte de la ciudad de Gualaceo (Azuay, Ecuador), ubicada en un valle interandino con un rango altitudinal entre los 2200 y 2500 m s.n.m. La zona oeste del río está ocupada principalmente por el área urbana de Gualaceo y la zona este presenta un mosaico de parcelas agrícolas y construcciones dispersas (Figura 3).

Los datos utilizados incluyen un Modelo Digital de Elevaciones con una resolución espacial de 3m proveniente del proyecto SIGTIERRAS (MAGAP, 2012) y datos de caudal obtenidos por SENAGUA (2014).

D. CALIBRACIÓN CON UN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL

Con la finalidad de explorar la viabilidad del ABM implementado para producir mapas de inundación, el modelo fue comparado con una simulación equivalente implementada en el modelo hidráulico bidimensional HEC-RAS. Este es uno de los modelos más utilizados en estudios de inundaciones y ampliamente aceptado por investigadores y técnicos, por lo que seleccionado como modelo de referencia.

El proceso de calibración inició ejecutando una primera vez el ABM con el mismo hidrograma de la simulación de referencia en HEC-RAS. A continuación, se repitió secuencialmente la simulación ABM usando diferentes combinaciones de valores para los parámetros de entrada del hidrograma Tiempo de Estabilización, Flujo Pico, Tiempo Pico y Tiempo Final, y explorando el mapa de inundación resultante hasta obtener valores similares al mapa de referencia.

Los parámetros de evaluación incluyeron: límites del área inundada, superficie total inundada y profundidad de inundación. Adicionalmente se calculó el valor medio cuadrático (RMS, por sus siglas en inglés) de las diferencias entre los valores de profundidad de inundación de los resultados del ABM y los valores correspondientes del modelo HEC-RAS. Esto permitió obtener un único valor estadístico (función objetivo) que puede ser utilizado para evaluar de forma general el ajuste del modelo. Si los resultados de los dos modelos son muy diferentes, el RMS tiende a ser mayor, y viceversa. Un RMS = 0 implica que los resultados de las dos simulaciones son iguales.

Debido a que el número de combinaciones posibles de valores de los parámetros de entrada puede llegar a ser demasiado grande para ser implementado en la práctica, se realizó un análisis exploratorio preliminar para reducir estos valores a unos rangos mínimos y máximos fuera de los cuales los resultados serían demasiado diferentes a la simulación de referencia.

Todos los cálculos estadísticos se realizaron en lenguaje R (R Core Team, 2016) y los resultados fueron representados geográficamente en el sistema de información geográfica QGIS 2.18 (QGIS Developing Team, 2016).

III. RESULTADOS

Al ejecutar cada simulación, el modelo inicia ingresando 100 m³/s de agua en el Origen y permitiendo que circule por el cauce del río durante el Tiempo de Estabilización. Una vez que el cauce se ha estabilizado (el agua ha alcanzado el borde final del área de estudio), la cantidad de agua en el Origen aumenta de forma progresiva hasta alcanzar el Flujo Pico en el Tiempo Pico. A partir de entonces, el modelo genera un mapa de inundación cada 10 minutos hasta alcanzar el Tiempo Final.

El análisis exploratorio preliminar produjo los rangos de valores de los parámetros de entrada reportados en la Tabla I. El Modelo Basado en Agentes fue programado para realizar simulaciones explorando este rango de datos.

El modelo produjo un conjunto de 178 simulaciones de inundaciones potencialmente comparables a la del modelo HEC-RAS para un evento con un período de recurrencia de 50 años con un caudal máximo de 880 m³/s. La media de RMS de los mapas resultantes fue de 0.5224m con una desviación estándar de 0.15m (mín = 0.2835m, máx = 1.21m). La Figura 4 presenta la frecuencia de los valores de RMS para todas las simulaciones.

La simulación que presentó un mejor ajuste estuvo definida por un caudal de estabilización de 100m³/s, durante un tiempo de estabilización de 40 min, un flujo pico de 480 m³/s alcanzado a los 100 minutos y un tiempo final de simulación de 130 minutos. La Figura 5 muestra el mapa de inundación producido con el modelo basado en agentes luego de la calibración, así como el mapa de inundaciones producido con el modelo hidráulico HEC-RAS y la diferencia entre ambos.

La superficie total inundada de la simulación del ABM fue 41.1ha, mientras que la del modelo HEC-RAS fue de 49.8ha. Las diferencias entre las profundidades simuladas por el ABM con respecto a las de HEC-RAS se encuentran en un rango entre -1.3m y 2.1m. (media=-0.126, SD=0.326). Es importante notar que las diferencias mayores se dan en los bordes del modelo, mientras que en la zona central las diferencias son cercanas a cero.

TABLA I
PARÁMETROS Y VALORES PARA LAS SIMULACIONES ABM

PARÁMETRO	MIN.	MÁX.	INTERVALO
Tiempo de Estabilización	30	90	10
Flujo Pico	380	880	20
Tiempo Pico	60	120	10
Tiempo Final	90	150	10

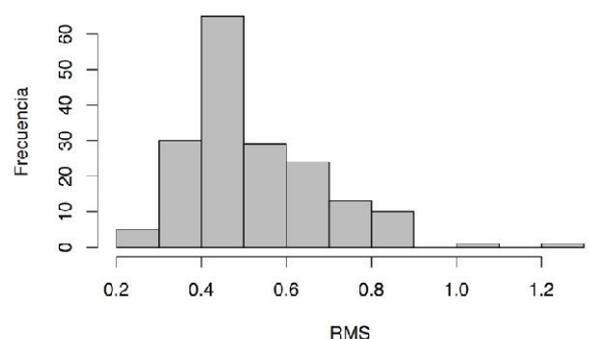


Figura 4. Frecuencia de los valores de RMS de las diferencias en metros entre las simulaciones y los resultados del Modelo Basado en Agentes y el modelo de referencia.



Figura 5. Izquierda: Mapa de inundaciones producido con el ABM calibrado. Centro: Mapa de inundaciones producido con el modelo hidráulico HEC-RAS. Derecha: Diferencia de las profundidades de inundación entre los dos modelos.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado el proceso de calibración de un modelo basado en agentes (ABM) para la simulación de inundaciones por desborde de ríos comparándolo con un modelo hidráulico de referencia. Los resultados de una prueba piloto de calibración en el río Santa Bárbara (Gualaceo, Ecuador) indican que la simulación de inundaciones basada en el ABM es capaz de reproducir de manera general el resultado de la simulación de un modelo hidráulico de referencia implementado en HEC-RAS. Sin embargo, existen diferencias importantes entre ambas simulaciones, principalmente en los extremos geográficos del modelo, pues cerca del origen, el ABM tiende a subestimar la profundidad del agua, mientras que cerca de la salida, tiende a sobre-estimar. Este efecto podría deberse a que, a diferencia del modelo hidráulico basado en métodos numéricos de ecuaciones diferenciales, el ABM implementado es un modelo conceptual que no incorpora la fricción de los diferentes tipos de cobertura del suelo, haciendo que el agua fluya a una mayor velocidad, causando acumulación en las zonas de salida. Sin embargo, estas variables pueden ser incorporadas en el modelo y está planificado implementarlo en futuras versiones del mismo. La zona central del área de estudio es la que presenta las menores diferencias (aproximadamente ± 0.1 m) lo cual implica que en la práctica se podría ampliar el área de modelización más allá del área de estudio, logrando así que la zona central del modelo que presenta mayor estabilidad coincida con el área de interés. Esta recomendación, también es válida en los modelos hidráulicos:

tener una distancia adecuada al inicio y fin del tramo, de tal forma que la zona de interés no sea afectada por las condiciones de contorno.

A pesar de carecer de las características físicas de un modelo hidráulico bidimensional, la modelización de inundaciones basada en agentes representa una alternativa útil para la delimitación del área inundada y cuando no se requiera gran precisión de los resultados hidráulicos (p.e. profundidad, velocidad flujo, etc). Los ABM permiten implementar modelos conceptuales de comportamiento del agua con respecto a la topografía de manera directa y sencilla, logrando reproducir de manera relativamente adecuada los fenómenos de inundación por desborde de ríos. Además, la gran flexibilidad y posibilidades de automatización de los lenguajes ABM abren grandes posibilidades para estos modelos, por ejemplo, para realizar análisis de sensibilidad e incertidumbre. Es posible, por ejemplo, utilizar estos modelos para estudiar el efecto que tienen los errores de los datos de entrada (caudal y topografía) en los mapas de inundación utilizando métodos de Monte Carlo. Bajo la misma lógica, es posible utilizar los modelos ABM para producir mapas que no se limiten a reportar de forma binaria el riesgo de inundación (inundado/ no inundado), sino de forma probabilística (probabilidad de ser inundado), lo cual permite ampliar la comprensión sobre el riesgo y evaluar de forma más adecuada las prácticas de prevención y mitigación. El estudio de la propagación de errores y la creación de mapas de probabilidad de riesgo constituyen precisamente los próximos pasos de nuestra investigación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca a través del proyecto "Evaluación del riesgo de inundación en el Río Santa Bárbara". También agradecemos a la SENAGUA – Demarcación Hidrográfica del Santiago y al Municipio de Gualaceo por su valioso aporte con información de la zona de estudio. Finalmente agradecemos a Arend Ligtenberg y Sytze de Bruin del Laboratory for Geo-information and Remote Sensing de Wageningen University (Países Bajos), por el código base en NetLogo con el cual se desarrolló el modelo.

REFERENCIAS

- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual. Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS 5.0 2D Modeling Users Manual.pdf>
- Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377(1), 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>
- Holland, J. H. (John H. (2000). *Emergence : from chaos to order*. Oxford University Press.
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, (16), 85. <https://doi.org/10.5944/empiria.16.2008.1391>
- MAGAP. (2012). SIGTIERRAS.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., & Edleman, S. (2008). Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), 608-620. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:7\(608\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:7(608))
- Milly, P., Wetherald, R., Dunne, K., & Delworth, T. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*. Retrieved from <http://www.nature.com/nature/journal/v415/n6871/abs/415514a.html>
- QGIS Developing Team. (2016). QGIS. Open Source Geospatial Foundation. Retrieved from <http://qgis.osgeo.org>
- R Core Team. (2016). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.r-project.org/>
- Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180-194. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.069>
- SENAGUA. (2014). Análisis de la vulnerabilidad a eventos de crecida y diseño de obras físicas para la protección de márgenes e infraestructura del río Santa Bárbara, Tomo 2: Estudio hidráulico, Demarcación Hidrográfica del Santiago.
- Timbe, L. M., & Timbe, E. P. (2012). Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña , caso de estudio del río Burgay. *Maskana*, 3(1), 87-96.
- Wechsler, S. P. (2007). Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4), 1481-1500. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007>
- Whiteaker, T. L., Robayo, O., Maidment, D. R., & Obenour, D. (2006). From a NEXRAD Rainfall Map to a Flood Inundation Map. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(1), 37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:1\(37\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:1(37))

Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador

Sellers Chester¹, Buján Sandra², Corbelle Eduardo³, Miranda David⁴

1 Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador/Universidad del Azuay
Av. 24 de mayo 7-77/Azuay/Ecuador
csellers@uazuay.edu.ec

2, 3, 4 Laboratorio do Territorio/Universidad Santiago de Compostela
27002 Lugo/Galicia/España
laborate@usc.es

RESUMEN

Este estudio aborda el análisis morfológico de la cuenca del río Cutilcay (provincia del Azuay, Ecuador), a partir de datos LiDAR y su integración en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la cuantificación de sus variables morfológicas. El análisis de los datos LiDAR, el estudio y la definición de los parámetros morfológicos útiles han permitido generar índices y parámetros que permiten caracterizar la cuenca. El estudio demuestra que los datos LiDAR permiten alcanzar resultados con alta precisión, asociada también a la obtención de modelos de terreno más precisos y visualmente más estilizados de los disponibles hasta el momento. Así, también se muestra la importancia de integrar esta tecnología para la generación de información que permita comprender la dinámica territorial de las cuencas hidrográficas en Ecuador.

Palabras clave: **Lidar, morfología, régimen hídrico, cuenca hidrográfica.**

ABSTRACT

This study addresses the morphological analysis of the Cutilcay river basin (Azuay province, Ecuador), based on LiDAR data and its integration into a Geographic Information System (GIS) for the quantification of its morphological variables. Analysis of the LiDAR data, the study and the definition of the useful morphological parameters have allowed the generation of indicator's and parameters that allow us to characterize the basin. This study demonstrates that the LiDAR data allows to achieve results with a high precision, also associated with the obtaining of more accurate and visually more stylized terrain models available to date. Thus, it is also shown the importance of integrating this technology for the generation of information to understand the territorial dynamics of watersheds in Ecuador.

Keywords: **Lidar, morphology, water regime, hydrographic basin.**

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en Ecuador, la mayoría de instituciones, organizaciones sociales y productivas, así como la sociedad civil en general, han empezado a ver con mucha preocupación cómo avanza sin control la degradación de las cuencas hidrográficas en los diferentes contextos, sean estos locales, regionales, nacionales e internacionales, cuyos efectos inmediatos se visibilizan en la erosión acelerada de los suelos, la disminución de la producción y la vulnerabilidad hídrica.

De ahí que es fundamental realizar estudios de régimen hídrico, morfología general e inventario hídrico, entendidos como las herramientas para determinar las características de las fuentes, su extensión y calidad del agua para su utilización y control; pero a su vez, la disponibilidad en cantidad y calidad en determinado lugar y en un período de tiempo para satisfacer las demandas identificables (consumo multifinanciado, humano, agrícola, energético, etc.). Por tanto, un inventario debe ir más allá de la sola dimensión técnica, es decir, debe considerarse como el inicio de un proceso que impulsa la gestión integrada del agua. Por ello no se debe perder de vista, las estrategias de concertación y decisión política que deben llevarse a cabo por todos los actores de un espacio socio territorial.

Los mapas morfológicos difieren de los topográficos en que contienen un elemento de interpretación genética (Jones et al., 2007). Por ejemplo, a diferencia de lo que ocurre en los mapas topográficos, una rotura en pendiente no se muestra por un conjunto de contornos muy próximos entre sí, sino por una línea codificada que indica un cambio en el gradiente, en particular, en la forma de relieve.

Tradicionalmente, la obtención de cartografía geomorfológica implicaba salidas de campo buscando características de interés con el soporte de mapas a gran escala o fotografías aéreas (Jones et al., 2007; Metternicht et al., 2005) Además, la morfología de cuencas siempre ha contado con cartografía de baja resolución espacial, por ejemplo mapas topográficos escala 1:200.000, por lo que los datos derivados no son de gran precisión. A todo esto hay que añadirle los problemas inherentes a accesibilidad, tiempo y logística. Todas estas circunstancias dificultan el registro y actualización de la información.

La tecnología LiDAR (Ligth Detection and Ranging) permite obviar muchos de estos limitantes. Los datos LiDAR proporcionan una alta resolución espacial gracias a la densidad de puntos obtenida durante el levantamiento (considerándose alta resolución aquellos datos con 5 - 10 puntos por metro cuadrado, donde resoluciones más altas pueden obtenerse con vuelos comisionados) unida a una elevada precisión altitudinal; (considerada como alta precisión vertical aquella entre 10 cm \pm 25 cm). El ratio de levantamiento (área / tiempo) versus métodos tradicionales, son una de las ventajas más importantes que presentan los levantamientos LiDAR, llegando a levantar hasta 90 km² en una hora (Suárez et al., 2005). Estas ventajas a su vez están reforzadas en la actualidad por los SIG, que permiten que los datos LiDAR sean procesados y visualizados de forma rápida y eficiente.

En la actualidad, se trata de una de las tecnologías más empleadas para la adquisición de datos terreno. Esto a su vez repercute en la aparición de nuevas aplicaciones para esta información, entre las que se encuentran la generación de Modelos Digitales de Terreno (MDT), Modelos Digitales de Superficie (MDS), caracterización morfométrica de cuencas, entre muchas otras.

Este estudio pretende ser la base de partida de una investigación doctoral para la modelización predictiva e investigación

del riesgo de inundación en cuencas, sub-cuencas y micro cuencas andinas, específicamente la cuenca del río Paute en Ecuador (Figura 1). Los datos de base LiDAR para la modelización fueron obtenidos por medio de la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), organismo estatal que tiene la competencia del manejo de cuencas hidrográficas en Ecuador. Los datos corresponden al Proyecto para el Uso Multifinanciado del Agua (PUMA), el cual incluye la micro-cuenca del río Cutilcay. Esta es una de las micro-cuencas más importantes dentro del sistema, y además reúne todas las características representativas de la típica micro-cuenca dentro del subsistema de la cuenca del río Paute.

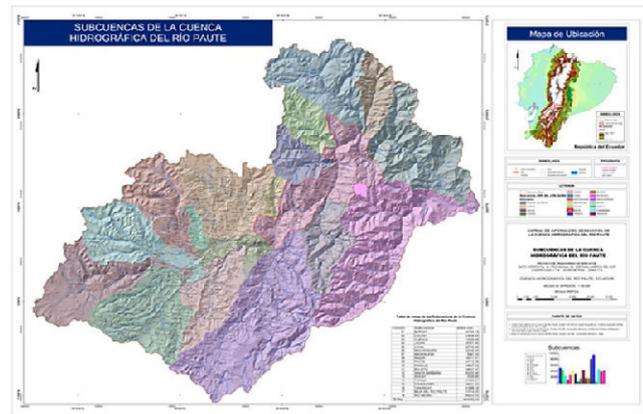


Figura 1.- Ubicación general sub cuenca río Paute

El elemento básico de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). Constituyen la base de muchas aplicaciones en ciencias de la tierra, ambientales y las ingenierías. Un MDE es un modelo digital de una superficie topográfica representada por puntos regulares o irregulares con valores de elevación (Moreno Brotóns et al., 2010; Höhle y Potuckova, 2011). Dentro de este tipo de modelos se encuentran los Modelos Digitales del Terreno (MDT, los cuales representan la superficie topográfica libre de objetos, es decir, representan al terreno (suelo) (Höhle y Potuckova, 2011).

Por otro lado, un Modelo Digital de Superficie (MDS) es la presentación digital topográfica de puntos regulares o irregulares representando los objetos sobre el terreno, por ejemplo vegetación o edificaciones (Höhle y Potuckova, 2011).

Los métodos para generar un MDT pueden clasificarse en dos grupos (Moreno Brotóns et al., 2010; Nelson et al., 2009):

- Métodos directos, topografía tradicional o con GPS.
- Métodos basados en sensores remotos, fotogrametría o más recientemente radar y LiDAR.

Los métodos directos son más exactos y precisos, pero caros y limitados a poca superficie. Los métodos basados en sensores remotos permiten abarcar mayor extensión, aunque con una exactitud menor. Tradicionalmente, el método más habitual para generar un MDT ha sido la interpolación a partir de curvas de nivel digitalizadas de mapas topográficos. Para la micro-cuenca del Cutilcay, la información de mejor escala disponible corresponde a 1:25 000.

TECNOLOGÍA LIDAR

LiDAR es un sistema láser activo, montado generalmente sobre una aeronave, capaz de emitir pulsos de luz láser en la banda del espectro electromagnético entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano (500 - 1500 nm). Posteriormente la señal

reflejada por la superficie barrida es capturada y se calcula el tiempo empleado por cada una de las señales emitidas (pulsos) en recorrer el espacio que separa al transmisor de la superficie del terreno. El tiempo medido junto con la velocidad de la luz permiten calcular la distancia entre el sensor y la superficie terrestre. Un receptor GPS proporciona la posición y la altura del avión en cada momento, y un sistema inercial (INS) informa de los giros del avión y su trayectoria. Se obtiene así de forma casi instantánea una nube muy densa de puntos georreferenciada cuyas coordenadas (x, y, z) quedan registradas con gran precisión (Baltsavias, 1999; Hodgson et al., 2005). Los errores de medición están en torno a 15 y 25 cm en altimetría y 50-100 cm en planimetría, siendo estos muy dependientes del relieve del terreno y el equipo utilizado (Nelson et al., 2009).

Adicionalmente al registro de coordenadas, los sensores LiDAR registran valores de intensidad. La intensidad es el cociente entre la cantidad de energía retro-dispersada procedente de los objetos, captada por el sensor, y la cantidad de energía total emitida (Song, Han, Yu, & Kim, 2002).

Los productos fundamentales generados a partir de datos LiDAR según algunos autores (Liu et al., 2007; Baltsavias, 1999) son:

- Modelo Digital del Terreno: obtenido de la interpolación de puntos identificados como pertenecientes al terreno (base de la modelización hidrológica/hidráulica).
- Modelo Digital de Alturas de Objetos: obtenido de la diferencia del modelo digital de superficies y el MDT. Este modelo proporciona la altura de los objetos sobre el terreno.
- Imagen de intensidades: A partir de valores de intensidad asociados a cada punto y mediante un proceso de interpolación se obtiene una imagen de intensidades semejante a la banda del infrarrojo de las ortoimágenes o imágenes de satélite.

CARACTERIZACIÓN DE ERRORES EN UN MDT

Un MDT es la representación visual y matemática de valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve. En los MDT existen dos cualidades esenciales: la precisión vertical/horizontal, y la resolución espacial. Ambas cualidades varían dependiendo del método usado para generar el MDT. Como cualquier otro conjunto de datos espaciales, tiene errores, afectando también sus aplicaciones y usos.

Estos errores en el MDT pueden estimarse comparando un conjunto de valores conocidos de altitudes versus los correspondientes valores en el modelo (Höhle y Höhle, 2009). Según Höhle y Höhle (2009), si se asume una distribución normal de datos y no hay valores atípicos (outliers), se puede aplicar un conjunto de estadísticos para evaluar este error. Habitualmente el error medio cuadrático, media del error y la desviación típica. De lo contrario, si los datos no siguen una distribución normal se deberían usar estadísticos robustos, menos sensibles a los efectos generados por outliers; por ejemplo cuantiles muestrales de la distribución del error (Höhle y Höhle, 2009). Los cuantiles muestrales son estimadores no paramétricos de la distribución basados en muestras de observaciones independientes (x_1, x_2, \dots, x_n) de la distribución.

Por tanto, si los datos siguen una distribución normal, el error medio cuadrático es el descriptor tradicional más utilizado para cuantificar los errores en un MDT. Este estadístico tiene como principales inconvenientes que requiere valores de elevación real (puntos de control campo) y que no informa

acerca de la distribución espacial de los errores y su posible autocorrelación (Moreno Brotóns et al., 2010; Meng et al., 2010; Felicísimo, 1994). La directiva INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) menciona que cuando se conoce a priori el valor terreno de referencia (Z_t) se puede utilizar el método del error medio cuadrático, que se define en la fórmula 1.

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{mi} - Z_t)^2}$$

Formula 1.- Error Medio Cuadrático

Dónde:

- N Tamaño de la muestra
- Z_{mi} El valor obtenido de la muestra en un punto.
- Z_t El valor terreno de referencia.

MORFOMETRÍA DE CUENCAS

El estudio de las características morfométricas se inició con el padre de la hidrología moderna en los Estados Unidos de Norte América, Robert Hermer Horton a través de dos artículos de referencia internacional, Drainage basin Characteristics (Horton, 1932) y Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology (Horton, 1932). Estos estudios fueron transformados de diferentes análisis puramente cualitativos y deductivos, a estudios científicos, cuantitativos y rigurosos capaces de suministrar datos hidrológicos fáciles de estimar (Strahler, 1957).

En 1952, Arthur Newell Strahler, modificó y mejoró el sistema para el análisis de red propuesto originalmente por Horton, donde se clasifican los órdenes de los cauces de acuerdo a su jerarquía y a la potencia de sus afluentes. Convirtiéndose en uno de los sistemas de clasificación más utilizados mundialmente.

Es fundamental la comprensión de parámetros y coeficientes en el concepto de cuenca hidrográfica: Entendiéndose por cuenca hidrográfica el área o superficie del terreno que aporta sus aguas de escorrentía a un mismo punto de desagüe (Wani y Garg, 2009). Esta transformación depende de las condiciones climáticas y características físicas de la cuenca (Horton, 1945; Horton, 1932).

La morfometría de cuencas se considera una de las herramientas más importantes en el análisis hídrico (Patton y Baker, 1976). El propósito es determinar índices y parámetros que permiten conocer la respuesta hidrológica y el comportamiento en esta unidad de análisis. Se trata por tanto del estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica, y es de gran importancia en el análisis de la red de drenaje. También resulta de gran utilidad ya que permite el estudio de la semejanza de los flujos de diferentes tamaños (García Ruiz et al., 1987) con el propósito de aplicar los resultados de los modelos elaborados a pequeña escala a prototipos de gran escala (Splinter et al., 2011).

Otro aspecto interesante reside en los objetivos fundamentales de estos estudios, dirigidos a inferir posibles picos de crecidas o avenidas en caso de tormentas, cuyas repercusiones de tipo socio-económico motivan especial atención a la hora de utilizar y ocupar el territorio, o en el momento de definir medidas de tipo estructural para el control de crecidas.

La influencia de estos factores sobre la transformación de la precipitación en escorrentía es deducible cuantitativamente. Es posible definir cierto número de índices, susceptibles de

servir, al menos de referencia, en la clasificación de cuencas y facilitar los estudios de semejanza (Strahler, 1957; Strahler, 1952). Las propiedades morfométricas de una cuenca proporcionan una descripción física espacial permitiendo realizar comparaciones entre distintas cuencas. Además proporcionan conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio. La morfometría particular de cada cuenca hidrográfica es proporcional a la posibilidad de cosecha hídrica; ante eventos climáticos, posibles respuestas a los mismos, escorrentía superficial, expresada en términos de caudales, incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que la integran. Actualmente, herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), procesos de interpretación de imágenes satelitales, permiten realizar la caracterización espacio temporal de las propiedades morfométricas de las cuencas hídricas y de las redes de drenaje.

El análisis de características morfométricas funcionales de una cuenca por parámetros de forma, relieve y red de drenaje es básico en la modelación hidrológica (Strager et al., 2010; Montgomery et al., 1998). Estos parámetros son muy importantes en el estudio y comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico.

II. MÉTODO

ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

La micro-cuenca Cutilcay (Figura 2) localizada en el cantón Paute provincia de Azuay, Ecuador, tiene un área de 485,6 ha, abastece a 8 sistemas de agua potable, 6 corresponden a las comunidades de la micro-cuenca con una población de 662 familias (un sistema abastece a la comunidad de Plaza Pamba que está fuera del perímetro de la micro cuenca, 80 familias, el sistema de agua potable del centro urbano de Paute con 1 253 familias). La micro cuenca en total provee de agua para consumo humano a 1 995 familias.

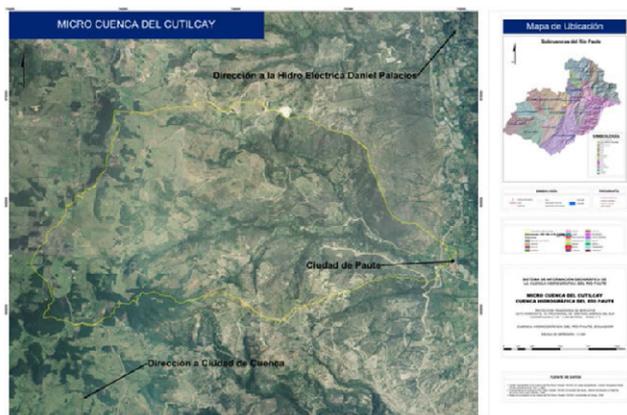


Figura 2.- Micro cuenca río Cutilcay

DATOS LIDAR

Los datos LiDAR empleados en este proyecto fueron capturados con un sensor Leica ALS50 II en el mes de Agosto del 2012 (Tabla I).

TABLA I
CARACTERÍSTICAS SENSOR LIDAR

Sensor de Captura de Datos LiDAR	
Sensor	ALS50 II
Número de serie	SN 48
Altura de vuelo	200m - 6 000m
Frecuencia de pulsación	Hasta 150 000 Hz (150 000 pulsos/seg)
Precisión a priori	Hasta 10cm en altimetría
Número de retornos	4
Campo de visión (FOV)	10°- 75°
Captura de intensidades	Una por pulso
Tecnología MPiA (Multiple Pulses in Air)	Si
Densidad de puntos (puntos / m ²)	Hasta 12

ORTO-IMÁGENES

Las imágenes empleadas corresponden a ortofotografía escala 1:5000 generada a partir de la toma de fotografía aérea 1:20000 con un GSD (Ground Sample Distance) de 30 cm, para la zona sierra de Ecuador.

En la Figura 3 se presenta el flujo de trabajo para el procesamiento de los datos.

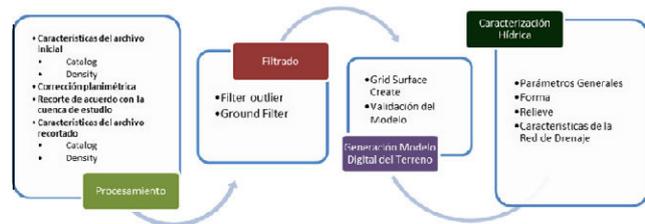


Figura 3.- Orden metodológico de actividades

PROCESAMIENTO DATOS LIDAR

Características archivos LiDAR iniciales

El primer paso para trabajar con datos LiDAR es conocer las características de éstos. En este estudio se han realizado dos análisis empleando el software libre FUSION: caracterización general de datos (Catalog), y un análisis de la distribución de puntos (Switch de la herramienta Catalog-Density).

Catalog.- Utilizando el comando Catalog de FUSION producimos un conjunto de informes que describen varias e importantes características de los datos LiDAR: valores de coordenadas máximas y mínimas, elevación máxima registrada, número de puntos registrados, densidad nominal de retornos en cada pasada, etc.

Switch: density.- Asimismo tiene una opción adicional denominada Density, la cual permite crear una imagen donde cada pixel almacena el número de retornos LiDAR en esa localización. Conjuntamente con la imagen se presenta una tabla resumen de densidades codificada por colores.

Corrección Planimétrica

El correcto acoplamiento entre diferentes pasadas es de suma importancia en fotogrametría y en el empleo de datos procedentes de sensores remotos en general, y más aún en el campo de los levantamientos mediante sensores LiDAR. Existen métodos para acometer este propósito, por ejemplo procedimientos de filtrado y suavizado, segmentación y clustering (Bakula et al., 2014; Höhle y Øster Pedersen, 2010; Wu et al., 2008).

Para llevar a cabo la corrección se establecieron una serie de polígonos representativos, claramente identificables en zonas de solapamiento entre pasadas. El primer grupo de polígonos, considerados “verdad terreno”, se obtuvo digitalizando sobre la ortoimagen en verdadera proyección (“true orto”) (Figura 4a). Posteriormente, los polígonos fueron digitalizados sobre cada MDS derivados de las pasadas (Figura 4b). Seguido, se estableció el centroide de cada polígono para los dos grupos, calculándose las diferencias entre centroides “verdad terreno” y los derivados de los MDS (Ilustraciones 4c y 4d), corrigiendo el desplazamiento en base a los valores obtenidos. Para realizar este proceso se utilizó el software propietario ESRI® ArcMap™ 9.3.

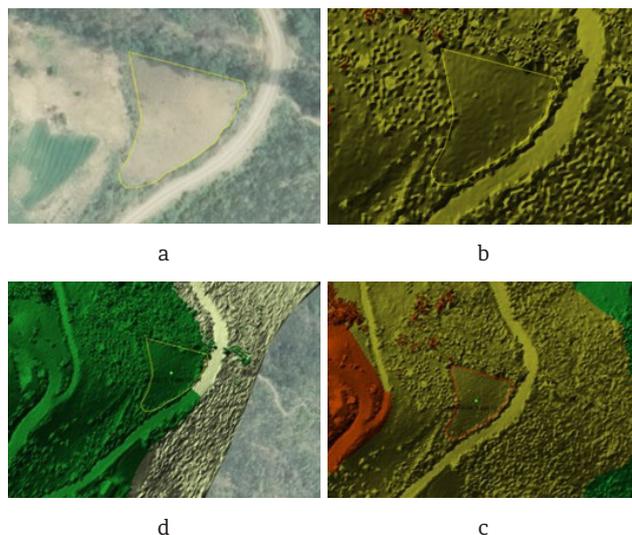


Figura 4.- Identificación y digitalización de áreas comunes entre las pasadas 38 y 41: a) Digitalización true orto; b) Comparación con MDT; c) Área y centroide pasada 41; d) Área y centroide pasada 38

Corrección Altimétrica

Para la corrección altimétrica se realizó un ajuste fino por mínimos cuadrados. Este procedimiento parte de la selección de varios polígonos semejantes en los TIN´s generados para cada pasada que se solapa. Usando los polígonos creados para el proceso de rectificación planimétrica se extraen los puntos LiDAR y se obtienen a partir de los valores de sus coordenadas (x, y, z) la media, mediana, desviación típica y el error medio cuadrático. De los resultados de cada pasada se determinan sus diferencias y se realiza el ajuste altimétrico (Bakula et al., 2014; Wu et al., 2008; Kraus y Pfeifer, 2001).

Recorte Información

Utilizando el software FUSION se procede con el corte de datos en el contorno aproximado de la cuenca, y un archivo de tipo shape correspondiente a la delimitación a nivel 6 pfafstetter¹ perteneciente a la delimitación hidrográfica de Santiago (SENAGUA).

GENERACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MDT

Los datos resultantes del recorte son sometidos a dos tipos de filtros: el primero, FilterData, para eliminar valores anómalos (outliers), mientras que el segundo

Groundfilter se emplea para seleccionar puntos terreno. Seguidamente se genera el MDT utilizando el comando de FUSION GridSurfaceCreate, mediante el cual se obtiene una superficie continua a partir de un conjunto discreto de puntos mediante un proceso de interpolación. Los comandos mencionados se detallan a continuación:

FilterData. Genera un nuevo archivo de datos con los retornos que cumplan los requisitos establecidos por el filtro. El uso más común es eliminar outliers de los archivos LiDAR. Tiene tres parámetros principales: tipo de filtro a usar (FilterType), en este caso outlier; FilterParms, para el caso particular del filtro outlier corresponde con el multiplicador aplicado a la desviación estándar, de tal forma que se eliminarán aquellos retornos cuya elevación supere el umbral derivado de: elevación media ± FilterParms * desviación estándar de las elevaciones; y WindowSize, tamaño de la ventana usado para calcular la media y desviación estándar de las elevaciones.

GroundFilter. Esta herramienta permite filtrar la nube de datos e identificar puntos terreno. Emplea el algoritmo de predicción lineal, adaptación del desarrollado por (Kraus y Pfeifer, 1998). En este estudio se utilizaron los parámetros por defecto, con una ventana de filtrado de 5 metros y 8 iteraciones.

GridSurfaceCreate. Crea un modelo de superficie regular usando colecciones de puntos aleatorios. El modelo de superficie se almacena en formato DTM (Data Terrain Model).

Validación modelo.

Para cuantificar el error introducido en la generación del MDT se han utilizado las zonas de muestreo DGPS, y datos obtenidos mediante selección de puntos terreno LiDAR en la ortofotografía. La cuantificación del error se obtuvo comparando el conjunto real de valores elevación con los obtenidos del modelo generado. El error en elevación en un punto i está definido como la diferencia entre la elevación del punto en el modelo zi y su valor real z(i), calculando el Error Medio Cuadrático (EMC).

CARACTERIZACIÓN RÉGIMEN HÍDRICO (MORFOMETRÍA)

Descripción general de la cuenca

La micro-cuenca de Cutilcay, situada en el término provincial del Azuay, parroquia Paute pertenece a la cuenca del rio Paute inmersa en la demarcación hidrográfica de Santiago zonal 6 (Tabla II).

TABLA II
DATOS GENERALES MICRO-CUENCA

Nombre de la cuenca	Termino municipal	Codificación UH Pfafstetter						Punto desagüe	
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Coor UTM X	Coor UTM Y
Cutilcay	Paute	4	49	9	8	2	5	747709,9	9693410,79

Parámetros generales

Recogen los aspectos básicos que representan la cuenca, constituyen la información mínima básica necesaria para conocer la naturaleza, características y comportamiento de la micro-cuenca. A continuación se especifican los parámetros generales tenidos en cuenta en este estudio:

Área de la cuenca. La micro-cuenca está definida por el espacio delimitado por la curva del perímetro. La divisoria de aguas de naturaleza topográfica representa una línea imagi-

¹ Proceso consistente en delimitar unidades hidrográficas dividiendo y codificando jerárquicamente las unidades por tipología: cuenca, sub-cuenca y micro-cuenca interna, desde el ámbito continental (Nivel 1), hasta los niveles 2, 3, 4, 5 y 6 en todo el territorio de la Cuenca Amazónica (SENAGUA).

naría que separa laderas opuestas de un punto de elevación, en donde las aguas de escorrentía de cada ladera fluyen a cauces diferentes (Beven y Kirkby, 1979).

Se representa por:

Área (A) (Km²): Superficie encerrada por la divisoria de aguas.

Perímetro de la cuenca. Informa sucintamente sobre la forma de la cuenca. Para una misma superficie, los perímetros de mayor valor, se corresponden con cuencas alargadas, mientras que los de menor valor se corresponden con cuencas redondeadas. Se considera como la longitud de los contornos de la cuenca y está ligada a la irregularidad del lugar a estudiar (Beven y Kirkby, 1979; Strahler, 1957; Horton, 1945).

Se representa por:

Perímetro (P) (km): Medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas topográficas.

Longitud Axial. Viene definida por la longitud del cauce principal, siendo equivalente a la distancia recorrida entre el de desagüe de la cuenca y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba (Tarolli y Dalla Fontana, 2007; Strahler, 1957; Horton, 1945).

Se representa por:

Longitud Axial (La) (km): Distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el eje de la cuenca.

Ancho de la cuenca. Se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca.

Se representa por:

Ancho promedio (Ap) (km): Relación entre la superficie de la cuenca y la La .

Ancho nominal. Generado a partir de la identificación del punto donde el ancho de la cuenca obtiene el valor más elevado.

Se representa por:

Ancho nominal (An) (km): Selección del punto donde la cuenca alcanza el ancho máximo.

Cota máxima y mínima. Selección de las cotas máxima y mínima dentro del contorno de la cuenca.

Desnivel de altitudinal. Se define por el valor obtenido de la diferencia entre la cota máxima y mínima del área de estudio.

Se representa por:

Desnivel Altitudinal (DA) (msnm): Valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja.

$$DA=HM-Hm$$

Formula 2.- Densivel Altitudinal

Altitud media. Valor muy importante para los estudios de análisis hídricos, siendo la altura de carga hipotética potencial que influye sobre los volúmenes de exceso de lluvia, considerándose como si estuvieran uniformemente distribuidas sobre la superficie.

Parámetros de forma

La forma de la cuenca es determinante para entender su comportamiento hidrológico. Cuencas con la misma área pero de diferentes formas presentan respuestas hidrológicas e hidrogramas diferentes. Los parámetros de forma tomados en cuenta son:

Factor forma. El factor o relación de forma de Horton indica cómo se regula la concentración de escorrentía superficial. (Jardí, 1985; Strahler, 1957; Strahler, 1952). Este factor manifiesta la tendencia de la cuenca a crecidas: cuando el factor forma (Rf) es similar a 1, representa una cuenca de forma redondeada (Tabla III); la cuenca con Rf bajo, se caracteriza por ser una cuenca alargada, con un colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, sujeta a crecientes de menor magnitud; o una cuenca de forma triangular, con dos vértices en las cabeceras, afluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada, provocará crecidas más significativas.

Se representa por:

Factor de forma (Rf): Relación entre el ancho promedio de la cuenca y la La. Es un factor adimensional.

$$Rf = \frac{A}{La^2}$$

Formula 3.- Relación de Forma Horton

Los valores interpretativos del factor de forma de Horton, Tabla III:

TABLA III
RELACIÓN FORMA HORTON (STRAHLER, 1957).

Rango de Valores	Forma de la cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22 - 0,30	Alargada
0,3 - 0,37	Ligeramente alargada
0,37 - 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 - 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 - 0,80	Ensanchada
0,80 - 1,12	Muy Ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc). Define la forma y la superficie que abarca la cuenca, teniendo influencia sobre la escorrentía y la marcha del hidrograma resultante de una precipitación (de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957). El Kc es adimensional y permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esta característica (Gaspari et al., 2009; Strahler, 1957). Para explicar el Kc de una cuenca, se ha propuesto su comparación con una cuenca ideal de forma circular (Tabla IV), con sus tributarios dispuestos radialmente y que desembocan en el punto central (Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957).

Se representa por:

Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc): Relación entre perímetro (km) y la superficie (km²).

$$Kc = \frac{P}{(2\sqrt{\pi A})}$$

Formula 4.- Coeficiente de compacidad Gravelius.

El Kc está relacionado con el tiempo de concentración, tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. En este momento ocurre la máxima concentración de agua, puesto que están llegando gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca. Según el valor que tome este coeficiente, la cuenca tendrá diferente forma.

TABLA IV
TABLA ÍNDICE COMPACIDAD GRAVELIUS.

Índice Kc	Descripción
1 - 1,25	Redonda - ovalo redonda
1,25 - 1,5	Ovalo redonda - ovalo oblonga
1,5 - 1,75	Ovalo oblonga - rectangular oblonga
> 1,75	Rectangular Oblonga - Muy lobuladas

A medida que su Kc tiende a 1, es decir cuando tiende a ser redonda, la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor, las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presenta diferencias mayores y el tiempo de concentración es menor, por lo tanto mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas (Strahler, 1957; Horton, 1932).

Parámetros de relieve. Los parámetros de relieve son de gran importancia, presentando más influencia sobre el comportamiento hidrológico que los parámetros de forma, y de forma general, de tal manera a mayor relieve o pendiente, los procesos de escorrentía se producen en tiempos menores.

Pendiente media de cuenca (PM). El proceso de degradación al que se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo, muy influenciado por la configuración topográfica, debido a que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo a los distintos grados de pendiente (Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957).

Pendiente media del cauce (j). La velocidad de escorrentía de las corrientes de agua en una cuenca hidrográfica depende de la pendiente de los canales fluviales. Cuanto mayor pendiente, mayor velocidad de flujo, por tanto, se convertirá en un factor característico del tiempo de respuesta de la cuenca ante determinada precipitación. (Gaspari et al., 2009; Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957). Tabla V rangos de pendiente por Strahler (1957a).

Se representa por:

Pendiente media del cauce (j): Relación entre desnivel altitudinal de la cuenca (DA) en Km y la longitud del cauce principal (Ln) en Km.

$$j = \frac{DA}{Ln}$$

Formula 5.- Pendiente media del cauce.

TABLA V
VALORES COMPARATIVOS PENDIENTE MEDIA.

Pendiente media %	Tipología del terreno
<0,5	Muy Plano
0,5 - 1	Plano
1 - 3	Suave
3 - 12	Accidentado medio
12 - 20	Accidentado
20 - 50	Fuertemente accidentado
50 - 75	Escarpado
> 75	Muy escarpado

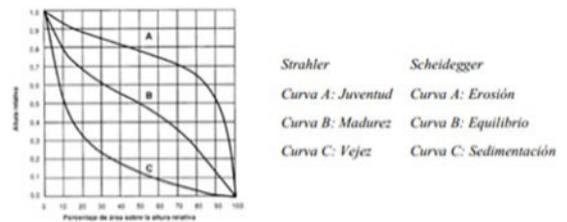
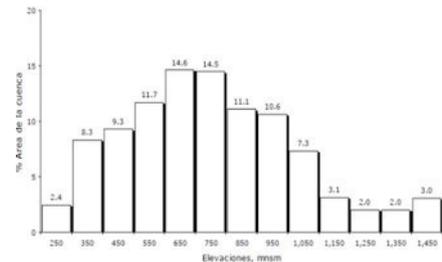


Figura 5.- Descripción forma de curva (Scheidegger, 1991; Strahler, 1957; Strahler, 1952).

Histograma frecuencias altimétricas. Es la representación de la superficie en km² (o en porcentaje), comprendida entre dos cotas. La representación de varios de estos niveles da lugar al histograma de frecuencias altimétricas (Figura 6).



Características de la red de drenaje

Longitud del cauce principal (Ln). Definida por la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan la cuenca expresada en Km.

Densidad de drenaje (Dd). Definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma. Caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca, por el grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante (Gaspari et al., 2009; Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957). En general, una mayor densidad de escorrentía indica mayor estructuración de la red o bien mayor potencial erosivo.

Se representa por:

Densidad de drenaje (Dd) establecida por Horton: cociente entre el sumatorio de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan la cuenca (Ln) y el área total de la cuenca (A).

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Formula 6.- Densidad de drenaje.

En la Tabla VI se establecen factores de densidad drenaje de cuencas según Strahler / Horton.

TABLA VI
DENSIDAD DE DRENAJE

Densidad de Drenaje (Km/Km ²)	Categoría
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy Alta

Sin tener en cuenta otros factores del medio físico, cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo.

Tiempo de concentración (Tc). Tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca y depende de la forma de la cuenca. A partir de información antecedente de siete cuencas rurales estadounidenses, con canales bien definidos y pendientes pronunciadas, se desarrolló una ecuación empírica (Chow et al., 1994; Kirpich, 1940) (Formula 7).

Se representa por:

$$T_c = 0.01947 L^{0.11} S^{-0.385}$$

Formula 7.- Tiempo de concentración.

Donde: TC es el tiempo de concentración en minutos; L la longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida en metros y S la pendiente promedio de la cuenca en metros.

Relación de bifurcación (Rb). Permite inferir sobre posibles crecidas en el sistema. Valores bajos de esta relación se asocian con cuencas muy bien drenadas que a su vez pueden generar crecidas más violentas (Strahler, 1957; Horton, 1945). El valor típico, se establece entre 3 y 5 en cuencas donde la estructura geológica no distorsione el patrón de drenaje natural (Strahler, 1957).

$$R_b = \frac{Nu}{Nu + 1}$$

Formula 8.- Relación de bifurcación.

Donde Nu es la cantidad (sumatorio de ocurrencias) de una clase u orden.

Perfil longitudinal. El perfil longitudinal de un río es la línea obtenida a partir de la representación gráfica de las diferentes alturas desde su nacimiento hasta su desembocadura.

Jerarquización red fluvial. Permite obtener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden de los cauces se relaciona con el caudal relativo a un segmento de un canal. En el método Strahler/

Horton, la codificación de cada segmento va en función del número de afluentes. Cada canal tiene un único orden que se corresponde con el mayor que puede tener al final de su recorrido (Strahler, 1957; Horton, 1945).

Orden de la cuenca. Refleja el grado de ramificación del sistema. Un cauce se une con otro de orden mayor; el canal resultante aguas abajo retiene el mayor de los órdenes. El orden de la cuenca es el mismo que el de su cauce principal a la salida (Figura 7).



Figura 7.- Orden de cauces (Strahler, 1957)

III. RESULTADOS

RESULTADOS PROCESAMIENTO PREVIO DATOS LIDAR

Un primer resultado fueron las estadísticas de los archivos LiDAR originales, que presentan una densidad nominal media de 1,74 puntos/m² tomando en cuenta todos los archivos (Figura 8). Los 12 archivos LiDAR que representan la cuenca contienen 19.387.313 puntos en total.

Filename	Minimum X	Minimum Y	Minimum Elevation	Maximum X	Maximum Y	Maximum Elevation	Total Returns	Nominal Return Density
CATFM\cutilcay\cutilcay16.las	746684,23	9692709,36	2226,47	748243,49	9693714,89	2710,16	1,039,338	0,66
CATFM\cutilcay\cutilcay14.las	744143,97	9693805,19	2254,7	748274,22	9694735,84	31133,44	3,771,084	0,98
CATFM\cutilcay\cutilcay17.las	744293,31	9694332,51	2314,2	747819,19	9695170,24	3368,43	2,458,098	0,83
CATFM\cutilcay\cutilcay18.las	744688,75	9695005,13	2666,19	746694,91	9695184,2	3088,27	495,004	1,38
CATFM\cutilcay\cutilcay22.las	744109,81	9693521,55	2254,13	748274,07	9694491,93	3130,76	3,812,674	0,94
CATFM\cutilcay\cutilcay29.las	748185,07	9692507,45	2228,44	748215,43	9692582,89	2242,79	7,079	3,09
CATFM\cutilcay\cutilcay30.las	747826,22	9692507,4	2221,56	748227,73	9693522,48	2300,76	281,072	0,69
CATFM\cutilcay\cutilcay31.las	747472,8	9692507,63	2220,4	748274,2	9694055,93	2415,02	723,513	0,58
CATFM\cutilcay\cutilcay32.las	747187,36	9692512,8	2223,78	748273,84	9694263,95	2556,44	1,200,982	0,63
CATFM\cutilcay\cutilcay33.las	746935,67	9692534,47	2234,47	748273,77	9694452,94	2660,08	1,670,039	0,65
CATFM\cutilcay\cutilcay35.las	746340,54	9692512,99	2278,83	747851,98	9694437,35	2809,55	1,760,929	0,61
CATFM\cutilcay\cutilcay39.las	744193,41	9692650,87	2870,05	745777,09	9695178,81	3167,54	2,167,501	0,54
Overall (12 files)	744109,81	96922507,4	2220,4	748274,22	9695184,2	3368,43	19,387,313	1,74

Class value	# returns	Interpretation
0	0	Created, never classified
1	19,387,313	Unclassified
2	0	Ground
3	0	Low Vegetation
4	0	Medium Vegetation
5	0	High Vegetation
6	0	Building
7	0	Low Point (noise)

Figura 8.- Resultado comando Catalog.

El Switch Density devolvió la densidad de puntos/m² en formato ráster. La Figura 9 muestra el resultado de la pasada número 14. Las celdas con densidades de puntos dentro del rango mínimo-máximo además de los lugares donde no existe información (Figura 10).

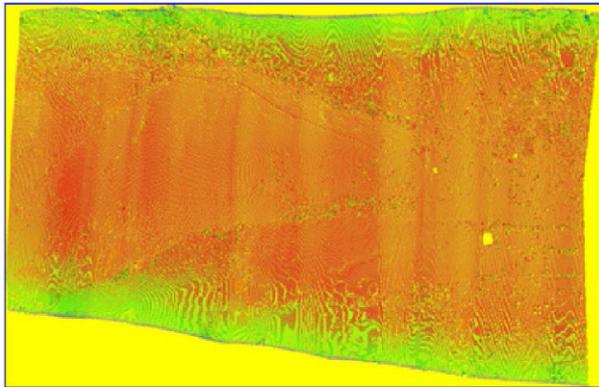


Figura 9.- Resultado Catalog/Density pasada 14.

Return Density			
Density computed using a cell that is 1.00m by 1.00m units (1.00 square units)			
Density range is 226696.0 to 1150 columns. Catalog_name: density.jpg			
Minimum return density (returns per square unit)	1.00		
Maximum return density (returns per square unit)	1150		
Average return density (returns per square unit)	1.72		
Standard deviation of return density (returns per square unit)	1.90		
Factor	Overlapping	Percentage of Area with Data	Percentage of Total
Cells with no points (could be outside coverage area)	NA	5.4	56.17
Density less than minimum specification (less than 2.00 points per square unit)	70.57	30.81	32.17
Density more than maximum specification (more than 11.00 points per square unit)	39.81	1.74	0.18
Density exceeds specification (more than 1.00 points per square unit)	1.74	1.74	0.41

Figura 10.- Resultado Catalog/Density pasada 14.

Para la rectificación del desplazamiento entre pasadas, se realizó un proceso de corrección planimétrica. En un primer paso y mediante los resultados de las diferencias entre centroides de polígonos identificados como comunes entre pasadas, se establecieron los valores de los vectores de cambio. Un ejemplo se presenta en la Tabla VII. En este caso, el desplazamiento registrado de la pasada 41 en la coordenada x es de 8,12 m mientras que en la coordenada y es de 15,46 m.

TABLA VII
CORRECCIÓN PASADA 41



	Centroide X	Centroide Y
Ortoimagen	746404,05	9694111,45
Vuelo 41	746412,17	9694126,91
Diferencias	8,12	15,46

También se realizó un proceso de corrección planimétrica fina en base a la función de mínimos cuadrados. Los vectores se obtienen de la resta de los errores medios cuadráticos obtenidos de todos los puntos extraídos de los polígonos comunes de cada pasada con respecto a los valores que se consideran verdad terreno (Tablas VIII a X).

TABLA VIII
DATOS PASADA N° 38

Vuelo	Parámetro	X(m)	Y(m)
38	Media	746410,45	9694126,05
	Mediana	746409,36	9694126,82
	S	8,63	9,75
	EMC	8,63	9,75

TABLA IX
DATOS PASADA N° 41

Vuelo	Parámetro	X(m)	Y(m)
41	Media	746412,87	9694126,66
	Mediana	746411,97	9694127,48
	S	8,73	9,29
	EMC	8,72	9,29

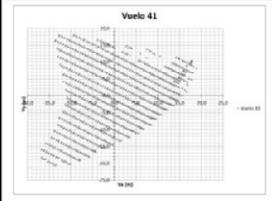
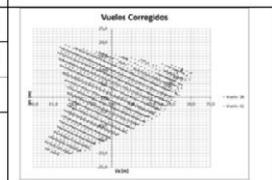


TABLA X
DATOS CONJUNTOS CORREGIDOS

Vuelo	Parámetro	X(m)	Y(m)
Corregidos	Media	746412,17	9694126,91
	Mediana	746411,86	9694127,87
	S	8,73	9,3
	EMC	8,72	9,29



Con la información corregida, se recortaron los datos con el contorno de la micro-cuenca correspondiente a la división pfafetter a nivel 6 con el área basal de la cuenca hidrográfica.

A continuación, se calcularon las estadísticas generales del archivo resultante del proceso de recorte, obteniendo las características básicas de los datos LiDAR en la micro-cuenca. A partir de este proceso se obtuvo que los datos LiDAR tienen una densidad media por m² de aproximadamente 2 puntos/m² y un total de 14.901.490 de puntos en la cuenca de estudio. (Figura 11). El 23,13% de la superficie del área de estudio tiene una densidad menor de 2 puntos/m² mientras que 70,49% de la superficie presenta una densidad entre 2 y 8 puntos/m² y únicamente el 6,38% registra una densidad superior a 8 puntos/m² (Figura 12). Este resultado indica que la nube de puntos LiDAR presenta alta densidad.

File Summary

Filename	Minimum X	Minimum Y	Minimum Elevation	Maximum X	Maximum Y	Maximum Elevation	Total Returns	Normalized Density
C:\TEM\Gdal\LAS\cuckoo.las	742349.20	9692874.59	221.27	747946.60	9694937.75	3121.54	14,901,490	1.90

Classification Summary (valid for LAS format files only)

Class value	#Returns	Interpretation
0	0	Class never classified
1	14,901,490	Unclassified

Figura 11.- Resultado Catalog archivo recortado

Return Density

Return Density			
Density computed using a cell that is 1.00m by 1.00m units (1.00 square units)			
Density range is 2084 returns by 3188 columns. Catalog_name: density.jpg			
Minimum return density (returns per square unit)	1.00		
Maximum return density (returns per square unit)	100.00		
Average return density (returns per square unit)	1.76		
Standard deviation of return density (returns per square unit)	3.94		
Factor	Overlapping	Percentage of Area with Data	Percentage of Total
Cells with no points (could be outside coverage area)	NA	4.14	41.14
Density less than minimum specification (less than 2.00 points per square unit)	20.53	12.23	12.23
Density more than maximum specification (more than 11.00 points per square unit)	70.49	21.24	21.24
Density exceeds specification (more than 1.00 points per square unit)	6.38	6.38	2.37

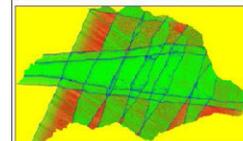


Figura 12.- Resultado Catalog/Density archivo recortado

MODELO DIGITAL DEL TERRENO

El archivo resultante es sometido a un filtrado (filterdata) para eliminar posibles outliers, estableciendo como FilterParms el valor 3. De tal forma que cualquier valor fuera del rango establecido por la media ± 3 desviaciones estándar es eliminado. Luego se aplica el filtro groundfilter para la selección

de los datos que son considerados terreno. Paso seguido se transforman estos datos discretos en una superficie continua utilizando el comando GridSurfaceCreate, y se obtiene el MDT en formato ráster (Figura 13).

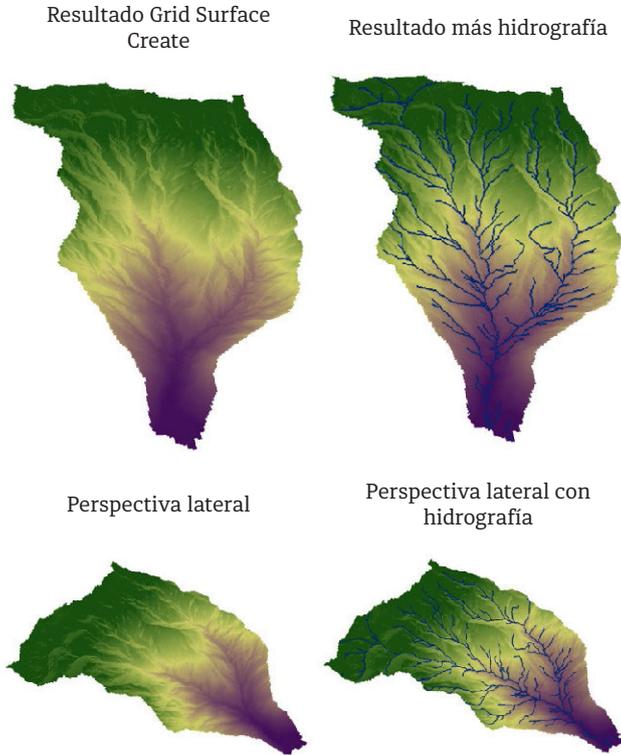


Figura 13.- Modelo Digital del Terreno micro-cuenca de Cutilcay

Para la validación del modelo se realizó un análisis básico en R estadístico para comprobar si la distribución de residuales tiene una distribución normal. Para ello se usa el test de Shapiro-Wilk (Shapiro et al., 1968), conjuntamente con un análisis gráfico usando un diagrama de cuantiles (Figura 14). De los resultados obtenidos se asume que los datos siguen una distribución normal.

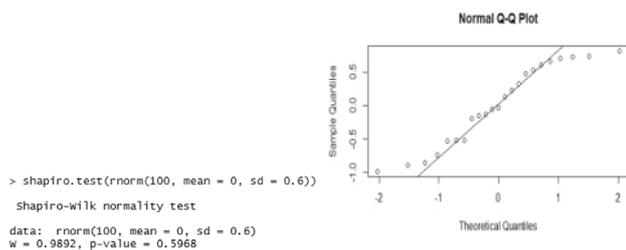


Figura 14.- Análisis R estadístico “distribución residuales”

En la Tabla XI se incluyen los datos recopilados para la validación del MDT. El campo “P_Z Original” representa los valores originales de los datos LiDAR obtenidos directamente del archivo .LAS; “P_Z_MDT” representa los datos recolectados del MDT; y el campo “Diferencia” es el resultado de restar los campos anteriores. El campo más relevante en este caso es el del error medio cuadrático (EMC). El valor máximo es de 0,30 m, que está dentro de los márgenes aceptables de precisión. Calculando el error medio cuadrático global se obtuvo un valor de 0,22 m, donde se deduce que los filtros y el algoritmo de generación del MDT fueron efectivos.

TABLA XI
Resultados EMC Modelo Digital del Terreno

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
4917	2897,27	4917,00	2897,79	0,52	0,30
4949	2897,29	4949,00	2898,15	0,85	
4981	2897,25	4981,00	2897,40	0,15	
4996	2897,46	4996,00	2897,48	0,03	
5017	2897,28	5017,00	2897,48	0,20	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
1000	3026,04	1000,00	3025,51	0,53	0,18
1001	3026,03	1001,00	3026,56	0,53	
1002	3026,03	1002,00	3025,30	0,73	
1003	3026,04	1003,00	3027,04	1,00	
1004	3026,05	1004,00	3025,22	0,83	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
8963	2660,30	8963,00	2679,81	0,49	0,28
8967	2660,41	8967,00	2661,15	0,75	
8970	2659,90	8970,00	2659,18	0,72	
8974	2660,44	8974,00	2660,57	0,13	
8976	2660,45	8976,00	2660,11	0,34	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
67	2238,73	67,00	2238,11	0,62	0,25
68	2237,00	68,00	2236,25	0,74	
73	2238,80	73,00	2238,85	0,05	
74	2237,23	74,00	2236,99	0,24	
82	2237,05	82,00	2237,58	0,53	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
7	2265,02	7,00	2264,89	0,13	0,06
8	2264,89	8,00	2265,78	0,89	
12	2264,59	12,00	2263,91	0,68	

La distribución de errores parece seguir patrones espaciales debido a la mayor o menor habilidad de los algoritmos para producir los modelos digitales.

RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN RÉGIMEN HÍDRICO

Parámetros generales.

TABLA XII
Parámetros morfométricos generales micro-cuenca de Cutilcay

Parámetros Morfométricos generales micro-cuenca del <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Área	km ²	4,86
Perímetro de cuenca	km	9,89
Largo de cuenca	km	3,37
Ancho de cuenca	km	1,97
Cotas		
Cota máxima	msnm	3166
Cota mínima	msnm	2272,33
Desnivel altitudinal	m	893,67
Centroide (PSC: WGS 1984, UTM, Zona 17S)		
X centroide	m	745904,54
Y centroide	m	9693847,54
Z centroide	msnm	2653,03
Altitud		
Altitud media	msnm	2653,03
Altitud más frecuente	msnm	3063,11
Altitud de frecuencia media	msnm	2820,93

El régimen hídrico resultante de la micro-cuenca, en cuanto al tamaño (área/perímetro) corresponde a una micro-cuenca pequeña. En función a su longitud axial de 3,37 km y al ancho de la micro-cuenca de 1,97km, se deduce se trata de una cuen-

ca semi-alargada. Las cotas registradas para la cuenca son: cota mínima 2272,33 msnm y cota máxima 3166 msnm, obteniendo un desnivel altitudinal de 893,67 m, presentando una altura media de 2653,03 msnm establecida a partir del MDT. El resumen de estos resultados se presenta en la Tabla XII.

Parámetros de forma

Desde el punto de vista hídrico, la forma de una cuenca influye en la escorrentía superficial de un cauce, especialmente cuando presenta precipitaciones elevadas. El factor forma en este caso es de 0,23 lo cual indica y reafirma de que se trata de una cuenca alargada (Tabla XIII). Este factor está relacionado al coeficiente de Gravelius, cuyo valor es de 1,27, que indica una cuenca de forma redonda -- ovalo redonda.

TABLA XIII

Resultados parámetros de forma micro-cuenca Cutilcay

Parámetros Morfométricos de forma micro-cuenca <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Forma	factor	0,23
Coefficiente de <u>Gravelius</u>	km	1,27

Parámetros de relieve

Los valores de forma, asociados a parámetros de relieve (Tabla XIV) presentan una pendiente promedio de 50,12%, de lo que se deduce que se trata de una micro-cuenca con potencial de crecidas rápidas e intempestivas. Esto conjuntamente con una pendiente media del cauce principal de 19,42% y un relieve montañoso, no permiten una evacuación rápida del caudal del agua, existiendo riesgo de inundaciones ante precipitaciones fuertes.

TABLA XIV

Resultados parámetros relieve

Parámetros Morfométricos de relieve micro-cuenca <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Pendiente promedio de la cuenca	%	50,12
Pendiente media del cauce	%	19,41

El análisis de la curva hipsométrica (Figura 15) es una forma de evaluar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en que se encuentra la cuenca. La gráfica resultante de la curva indica que se trata de una micro-cuenca joven en transición a madura (entre una etapa de equilibrio y una cuenca erosionada de valle), sujeta a procesos erosivos constantes, característico de zonas geológicamente antiguas localizadas principalmente en lugares próximos a las desembocaduras de los ríos.

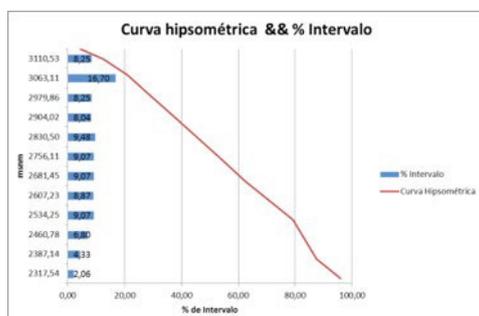


Figura 15.- Curva hipsométrica

Caracterización red hídrica

Los tiempos de concentración muy bajos en torno a 0,01 minutos, refuerzan las hipótesis anteriores e indican que la cuenca

está sujeta a fuertes procesos erosivos en los primeros tramos hídricos, pero con tendencia a la estabilización en las partes bajas (Tabla XV). Esto se puede apreciar gráficamente con la modelización del perfil longitudinal de la cuenca, la curva hipsométrica y la relación por densidad de bifurcación, que según (Strahler, 1957), los valores típicos de relación de bifurcación están entre 3 y 5 para cuencas con variaciones considerables en sus características geo-ecológicas. Índices bajos suelen relacionarse con redes fuertemente ramificadas, que repercuten directamente ante fuertes precipitaciones en ondas de crecidas rápidas.

TABLA XV

Resultados de orden hídrico según Strahler

Parámetros Morfométricos de la red hídrica micro-cuenca <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Longitud Cauce principal	km	4,60
Densidad del drenaje	factor	5,49
Tiempo de concentración	minutos	0,01

La red hídrica tiene un orden de 4 en la escala de niveles de Strahler/ Horton (Tablas XV, XVI), que corresponde a la mayoría de las cuencas alto andinas, deduciéndose que geomorfológicamente se trata de una cuenca relativamente joven en transición a madura, y dinámica en cuanto a sus procesos hidrológicos.

TABLA XVI

Resultado índice de bifurcación

Parámetros Morfométricos cuenca <u>Cutilcay</u>		
Orden	#	Índice Bifurcación
1	99	2,15
2	46	1,53
3	30	1,36
4	22	22

Una densidad de drenaje de 5,49 muestra que es una cuenca bien drenada, hecho directamente relacionado con la alta ramificación de la red de drenaje (Tabla XV). También está asociada con los materiales componentes de la micro-cuenca, materiales erosionables, suelos impermeables con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal.

Finalmente, a medida que los parámetros asociados al sistema de drenaje de la micro-cuenca son de mayor magnitud, es de esperar que el tiempo de concentración (Tabla XV) tienda a ser menor con la consiguiente mayor capacidad de producción de caudal superficial.

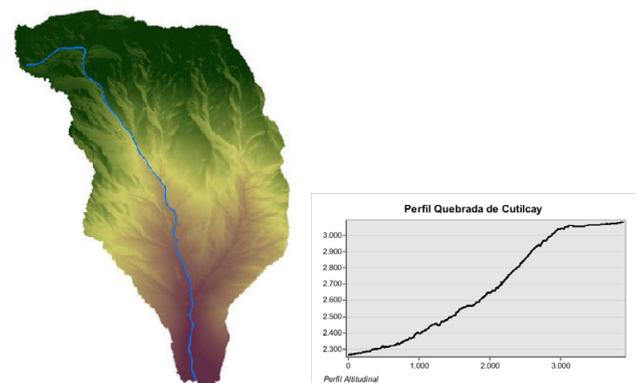


Figura 16.- Perfil y vista frontal del cauce principal

En la Figura 16, el perfil refleja gráficamente la capacidad erosiva del río en sus partes principales (superior y media), mientras que la estructura de red y orden obtenido (Figura 17), muestran una red de tipo dendrítica, con muchas ramificaciones.

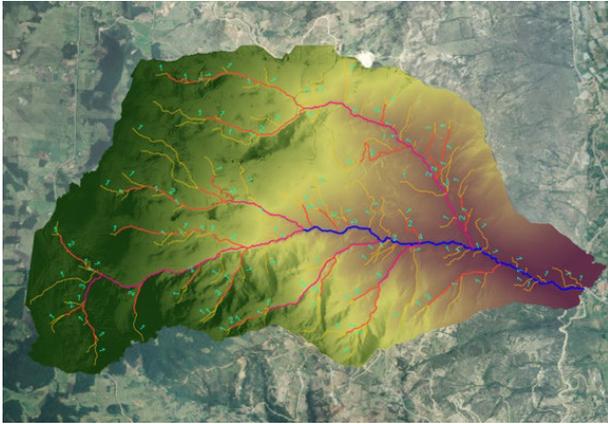


Figura 17.- Gráfica orden hídrico de la cuenca.

IV. CONCLUSIONES

La información básica del relieve de una cuenca, sub-cuenca o micro-cuenca hidrográfica, obtenida mediante metodologías analítico-descriptivas permite a quienes trabajan en proyectos relacionados con el uso de los recursos naturales el manejo integrado de cuencas; estudios sobre impacto ambiental; degradación de suelos; deforestación; conservación de los recursos hídricos etc., y contar con los insumos necesarios para el análisis y generación de los parámetros necesarios para determinar el comportamiento dentro de estas unidades hidrográficas. Estos procesos tienen un fuerte componente espacial y el empleo de los SIG es de mucha utilidad, siendo los MDT y sus derivados componentes principales para el análisis.

Destaca la importancia de contar con una descripción cuantitativa precisa de las geo-formas para realizar los análisis que permiten expresar en forma numérica las propiedades geométricas de la micro-cuenca y además de elementos que sirven de base para comprender su evolución y dinámica basal, además de evaluar su funcionamiento y tendencias en cuanto de su régimen hidrológico. En este aspecto, la tecnología LiDAR permite obtener más y mejores detalles para la representación a gran escala de la información geográfica. Sin embargo, se trata de un proceso más laborioso desde el punto de vista de procesado en gabinete y demanda recursos computacio-

nales que justifican la obtención de resultados cualitativos y cuantitativos con mayor precisión y mayor nivel de detalle.

A partir de este trabajo surge por primera vez en el área un análisis morfológico de micro-cuencas que servirá para futuros estudios hidrológicos y para planes de manejo del agua usando datos LiDAR. Los resultados se asumen más precisos que los existentes hasta el momento, aunque se requieren estudios con mayor detalle junto con una validación de campo exhaustiva. Adicionalmente, los resultados demostraron que la escorrentía sigue el comportamiento de la topografía, mientras que el análisis morfométrico advierte que es una zona compleja, con dificultades de evacuar volúmenes importantes de agua debido a su topografía. También presenta una gradiente general pronunciada, que asociada a los parámetros obtenidos, denotan un alto grado de erodabilidad.

Los parámetros generados proporcionaron información sobre la dinámica espacio temporal del caudal hídrico en la cuenca. Así, la densidad de la red de drenaje manifiesta la capacidad de entalle de los cauces fluviales y el equilibrio dinámico del sistema acorde a sus condicionantes hidrológicas, geomorfológicas y topográficas.

Las propiedades morfométricas generadas, apoyadas con datos LiDAR, aportan un marco referencial a efectos de definir la escala espacial de las investigaciones en ecología fluvial. Definiendo la cuenca hidrográfica como unidad de investigación y las propiedades morfométricas de los sistemas fluviales, como marco de referencia para un proceso de ordenación territorial, en donde la política nacional para el ordenamiento territorial, ya menciona como lineamiento principal el enfoque eco-sistémico de cuencas en el Ecuador.

El análisis geoespacial logrado con SIG, como herramienta de apoyo, constituyó un aporte esencial para ilustrar las variables que actúan a una misma escala espacial y altitudinal sobre la extensión de la red de drenaje y dinámica hídrica. Por último, la integración de los parámetros morfométricos en cuencas hidrográficas se considera un aporte significativo y relevante para la consolidación y desarrollo de planes de ordenación territorial.

Se presentará la discusión de los resultados expuestos, relacionándolos con el estado actual u otros estudios, mostrando las ventajas e inconvenientes de cada uno.

Es indispensable que en este apartado se haga referencia a los objetivos concretos y/o aportaciones, así como a su eventual aplicación. La interpretación de los resultados debe estar argumentada y mencionada con sustentos teóricos sólidos.

REFERENCIAS

- Bakula, K., Dominika, W. y Ostrowski, W. 2014. Verification and improving planimetric accuracy of airborne laser scanning data with using photogrammetric data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W1: 21 - 26.
- Baltsavias, E.P. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2): 83 - 94.
- Beven, K.J. y Kirkby, M.J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24 (1): 43 - 69.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. 1994. *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Felicísimo, A.M. 1994. *Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo: Pentalfa.
- García Ruiz, J.M., Gómez Villar, A. y Ortigosa Izquierdo, L.M. 1987. Aspectos dinámicos de un cauce fluvial en el contexto de su cuenca: el ejemplo del río Oja. *Monografías del Instituto Pirenaico de Ecología*. Zaragoza: Consejo Superior de Investigaciones Científicas - CSIC Press.
- Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A.M. y Besteiro, S.I. 2009. *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Gaspari. La Plata: 321.
- Höhle, J. y Höhle, M. 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (4): 398 - 406.
- Höhle, J. y Øster Pedersen, C. 2010. A new method for checking the planimetric accuracy of Digital Elevation Models data derived by Airborne Laser Scanning. En N.J. Tate y P.F. Fisher, eds., *Accuracy 2010. Proceedings of the Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Leicester, Uk: University of Leicester, 253 - 256.
- Höhle, J. y Potuckova, M. 2011. *Assessment of the quality of digital terrain models*. Official Publication. Amsterdam, The Netherlands: European Spatial Data Research.
- Horton, R.E. 1932. Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13: 350 - 361.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56 (3): 275 - 370.
- Jardí, M. 1985. Forma de una cuenca de drenaje. Analisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19: 41 - 68.
- Jones, A.F., Brewer, P.A., Johnstone, E. y Macklin, M.G. 2007. High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (10): 1574 - 1592.
- Kirpich, Z.P. 1940. Time of concentration for small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10 (6): 362.
- Kraus, K. y Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with Airborne Laser Scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53 (4): 193 - 203.
- Kraus, K. y Pfeifer, N. 2001. Advanced DTM generation from LiDAR data. *International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, 34 (3/W4): 23 - 30.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J. y Chandra, S. 2007. LiDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *Geoinformatica*, 11 (1): 37 - 53.
- De Llano, F. y Mintegui Aguirre, J.A. 1986. *Hidrología de la superficie-TI*.
- Meng, X., Currit, N. y Zhao, K. 2010. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, 2 (3): 833 - 860.
- Metternicht, G., Humi, L. y Gogu, R. 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98 (2): 284-303.
- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E. y Sullivan, K. 1998. The role of GIS in watershed analysis. En S.N. Lane, K.S. Richards y J.H. Chandler, eds., *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*. 1st (eds.). Wiley, 466.
- Moreno Brotóns, J., Alonso Sarría, F., Gomariz Castillo, F. y Alonso Bernardo, D. 2010. Análisis y validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos LiDAR. En J. Ojeda, M.F. Pita y I. Vallejo, eds., *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 254 - 271.
- Nelson, A., Reuter, H.I. y Gessler, P. 2009. DEM production methods and sources. *Developments in Soil Science*, 33: 65 - 85.
- Patton, P.C. y Baker, V.R. 1976. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12 (5): 941 - 952.
- Schneider, A.E. 1991. *Theoretical Geomorphology*. Berlín: Springer.
- Shapiro, S.S., Wilk, M.B. y Chen, H.J. 1968. A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American Statistical Association*, 63 (324): 1343 - 1372.
- Splinter, D.K., Dauwalter, D.C., Marston, R.A. y Fisher, W.L. 2011. Watershed morphology of highland and mountain ecoregions in eastern Oklahoma. *Professional Geographer*, 63 (1): 131 - 143.
- Strager, M.P., Fletcher, J.J., Strager, J.M., Yuill, C.B., Eli, R.N., Todd Petty, J. y Lamont, S.J. 2010. Watershed analysis with GIS: The watershed characterization and modeling system software application. *Computers & Geosciences*, 36 (7): 970 - 976.
- Strahler, A.N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63 (11): 1117 - 1142.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Civil Engineering*, 101: 1258 - 1262.
- Suárez, J., Ontiveros, C., Smith, S. y Snape, S. 2005. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computers & Geosciences*, 31 (2): 253-262.

- Tarolli, P. y Dalla Fontana, G. 2007. Analysis of the headwater basins' morphology by high resolution LiDAR-derived DTM. Proceedings of the 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology. Padova, Italy, 2007: .
- Wani, S.P. y Garg, K.K. 2009. Watershed management concept and principles. Best-bet Options for Integrated Watershed Management. ICRISAT Patancheru, Andhra Pradesh, India, 2009: 1 - 11.
- Wu, J., Ma, H. y Li, Q. 2008. Least squares matching with airborne LiDAR data for strip adjustment. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37 (Part B3b): 167 - 172.
- on and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2416-2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>
- Zhang, X., & Srinivasan, R. (2009). GIS-Based Spatial Precipitation Estimation: A comparison of Geostatistical approaches, 45(4), 894-906.

Sistemas de seguridad ciudadana por georeferenciación y geolocalización para zonas rurales del cantón Cuenca incorporados al SIS ECU 9-1-1 del Ecuador

Icaza Álvarez Daniel¹

¹ Unidad Académica de Ingeniería de Industria y Construcción, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca Ecuador
Dirección de Carrera de Ingeniería Eléctrica
Área de Redes y Telecomunicaciones

*Autor corresponsal: Av. Las Américas y General Torres Esq. Dirección de Carrera.
dicazaa@ucacue.edu.ec

RESUMEN

En el presente artículo se diseña un sistema de Seguridad apoyados en los modernos sistemas de georeferenciación y geolocalización que dispone el Centro Integrado ECU 9-1-1. El sistema se amplía a las zonas rurales del cantón Cuenca diseñado en función de la experiencia exitosa en la ciudad de Cuenca, además se considera el sistema del botón de auxilio para las camionetas que están legalmente facultadas para prestar los servicios en las zonas rurales. Al sistema GIS se lo incorporan cámaras de monitoreo en las principales arterias viales y espacios públicos para continuamente realizar el monitoreo desde el Centro integrado ECU 9-1-1, al igual que receptor llamadas de auxilio y accionamiento de botones de pánico desde sitios estratégicos. En el Centro de monitoreo se tendrán alarmas de emergencia con la georeferenciación de donde provienen los llamados de auxilio rurales para luego de un rápido análisis interno y apoyados en los sistemas de telecomunicaciones se puedan despachar los recursos policiales, bomberos, cruz roja, entre otros.

Palabras clave: **Redes de Telecomunicaciones, Georeferenciación, ECU-911, Zonas Rurales, Seguridad.**

ABSTRACT

In this article, a Security system is designed based on the modern georeferencing and geolocation systems provided by the Integrated Center ECU 9-1-1. The system is extended to the rural areas of the canton Cuenca designed based on the successful experience in the city of Cuenca, in addition is considered the aid button system for trucks that are legally empowered to provide services in rural areas. The GIS system incorporates monitoring cameras in major road arteries and public spaces to continuously monitor from the integrated ECU 9-1-1 Center, as well as receiving distress calls and triggering panic buttons from strategic locations. In the Monitoring Center will have emergency alarms with the georeferencing of where the rural calls for help come after a rapid internal analysis and supported in the telecommunications systems can dispatch the police resources, firemen, red cross, among others.

Keywords: Telecommunications Networks, Georeferencing, ECU-911, Rural Areas, Security.

I. INTRODUCCIÓN.

Desde la creación del Sistema Integrado Ecu 911, se ha visto los logros alcanzados en cada uno de los centros de atención, hasta la presente fecha ha cumplido 5 años el Ecu 911. Gracias a este sistema se ha podido tener información de varios de los sectores del país, ayudando a combatir la inseguridad, accidentes de tránsito, entre otros.

Si bien estos avances han sido enormes en nuestro país no es menos cierto que las zonas rurales no se han visto directamente favorecidas probablemente por los altos costos de lo que implica implementar estos sistemas pero que sin duda deben ser cubiertos en corto o mediano plazo para lo cual en este artículo lo hemos considerado y aprovechamos los recursos tecnológicos que ventajosamente existen y que pueden ser de gran valía para llevarlo a la práctica.



Fig. 1. Sistema de geolocalización en el ECU-911

VIDEOVIGILANCIA PARA ZONAS RURALES.

El servicio de videovigilancia de las zonas rurales deberá estar enlazado al ECU 911 utilizando lo más avanzado de la tecnología para monitorear las actividades que puedan generar situaciones de riesgo. En el sistema GIS de la consola para monitoreo se debe identificar el sitio exacto de donde proviene la alerta.

Al sistema de videovigilancia actual se lo deberá incorporar las cámaras que se instalen en las zonas rurales de acuerdo a un análisis de las zonas más vulnerables, índices de peligrosidad, espacios públicos de alta concurrencia y en sí realizar distintos circuitos cerrados de videovigilancia.

VINCULACIÓN COMUNITARIA

Charlas y capacitaciones a niños, jóvenes y comunidades enfocadas en el buen uso del servicio ECU 911 y la importancia de la colaboración de los Gad's Parroquiales, Tenencias Políticas, ONG's, Pastoral social y en sí de la ciudadanía en la seguridad integral.

COORDINACIÓN INSTITUCIONAL

EL trabajo en conjunto de todas las instituciones de respuesta a emergencias permite que una misma situación sea atendida desde una perspectiva completa permitiendo una respuesta eficaz e integral. Reduce los tiempos de respuesta y logra movilizar unidades especializadas para urgencias puntuales. (Pozo P. y Cherez J., 2012)

Gracias al sistema GIS es posible identificar rutas más cercanas, centros policiales, bomberos y otros los cercanos y así dar una pronta respuesta a situaciones de emergencia. (Municipalidad de Cuenca, 2014)

El Servicio Integrado de Seguridad ECU 911 para las provincias de Azuay y Cañar fue inaugurado el 30 de abril de 2012 por el Presidente de la República Ec. Rafael Correa Delgado.

El área de cobertura de este centro zonal articula la labor en torno a temas de seguridad y atención de emergencias con autoridades y ciudadanía en ámbitos provinciales, cantonales y también se debe incorporar a los parroquiales de manera directa ampliando la infraestructura.

II. MÉTODO.

El sistema SIS- ECU 911 está diseñado en tres niveles: nacional, regional y provincial (Municipalidad de Cuenca, 2014). Nuestro diseño del Sistema es para las zonas Rurales del Cantón Cuenca lo cual puede ser considerado como un plan piloto a nivel Nacional. Ver figura 2. (CEIEC, 2012)

En la provincia del Azuay tenemos un centro de Control para desde allí recibir las emergencias y despachar los distintos recursos.

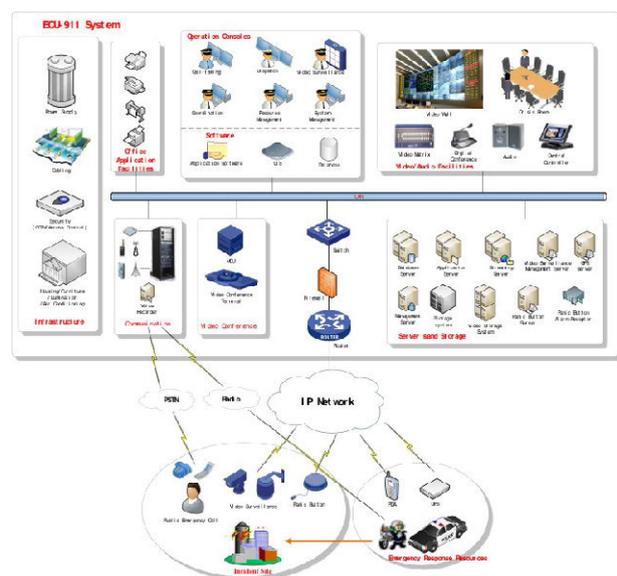


Fig. 2.- Subsistema de soporte de hardware y software que incluye soporte a zonas Rurales del Cantón Cuenca.

Para recibir y despachar alarmas, administrar recursos para el respectivo análisis preventivo y alerta temprana, para la gestión de datos. Dentro de los subsistemas citamos los más generales. (CEIEC, 2012)

- Subsistema de recepción de alarmas
- Subsistema de administración de recursos
- Subsistema de administración de incidentes
- Subsistema de pronóstico y alerta temprana
- Subsistema de análisis y evaluaciones
- Subsistema de informaciones geográficas
- Subsistema de base de datos
- Software de soporte básico

RELACIONES INTERSERVICIOS DEL SISTEMA

- El centro del sistema consiste en recibir y despachar las alarmas de manera integral.
- Las funciones de pronóstico y alerta temprana, análisis y evaluación, comando y despacho, gestión de recursos, consultas colectivas y decisión en sitio ofrecen apoyos técnicos y medios eficientes.
- El servicio de administración y garantía general asegura el funcionamiento fluido del sistema.
- GIS ofrece espacios para la aplicación y exposición del sistema

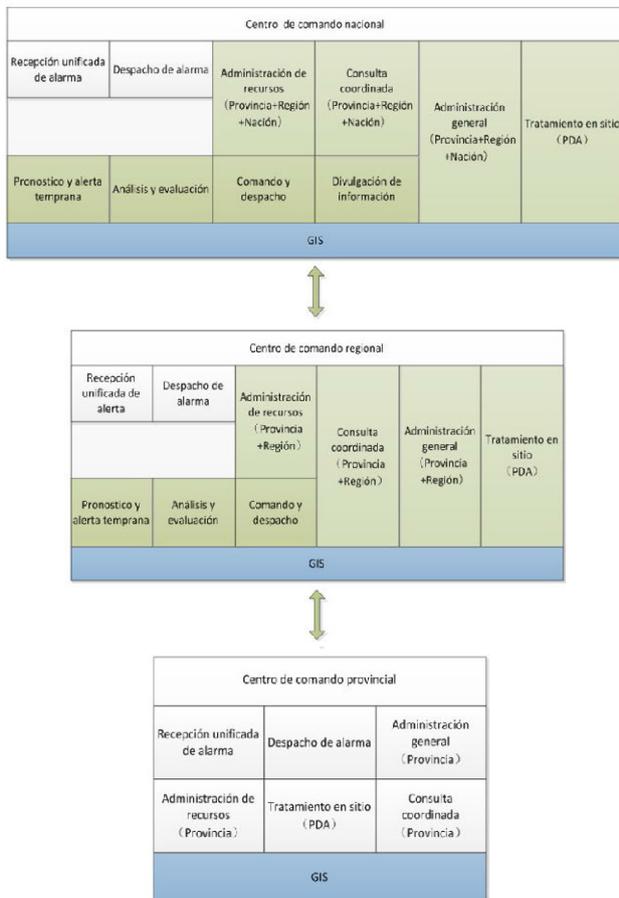


Fig.3.- Cuadro de Relaciones interservicios de Sistema soportados en el GIS (CEIEC, 2012)

PROCESO GENERAL DEL SISTEMA

- El sistema, en lugar de ser aislado, es un conjunto integral.
- El sistema GIS ofrece espacios de datos y servicio.
- El sistema de administración de recursos efectúa mantenimiento y administración de informaciones básicas y ofrece datos de base a otros servicios.
- El sistema PDA coopera con el sistema de despacho de alarmas, asegurando la comunicación entre el sitio de incidente y el centro de comando en tiempo real.
- Consultas colectivas es un medio eficaz para tratar eventos imprevistos, cuyo resultado será útil para orientar el trabajo.
- Recepción de alarma, tratamiento de alarma, administración de alarma, pronóstico y alerta de alarma, Análisis del procesamiento de alarma. (CEIEC, 2012)

SUBSISTEMA DE SOPORTE DE HARDWARE

- Subsistema de hardware abarca dispositivos de visualización, conmutadores de comunicaciones, servidores, terminal de operación, impresora, copiadora etc.
- Este sistema se dedica a soportar el funcionamiento del sistema de software y realizar varias funciones. Ver figura 4.
- Subsistemas Principales:
 - Subsistema de visualización
 - Subsistema de video vigilancial
 - Subsistema de botón de pánico
 - Subsistema de GPS
 - Subsistema de control de comunicación
 - Subsistema de almacenamiento
 - Subsistema de videoconferencia
 - Subsistema de conferencia digital
 - Subsistema de seguridad de construcción
 - Subsistema de cableado general
 - Subsistema de distribución de energía

SUBSISTEMA DE HARDWARE

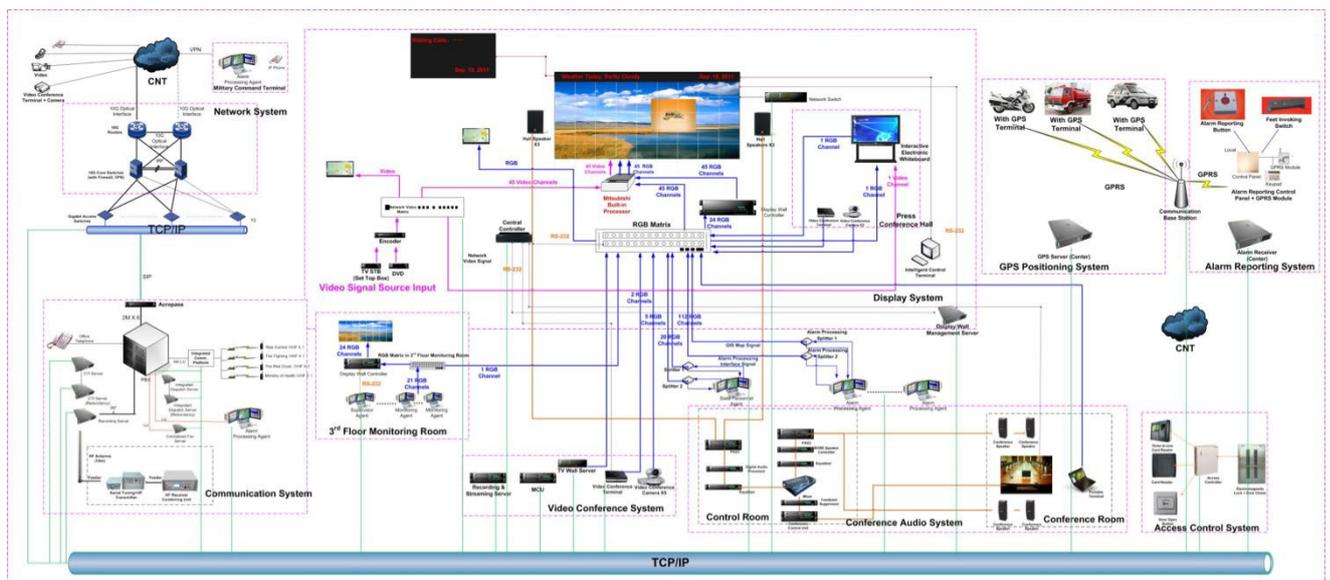


Fig. 4.- Esquema de Subsistema de Hardware (CEIEC, 2012)

SISTEMA DE VISUALIZACIÓN

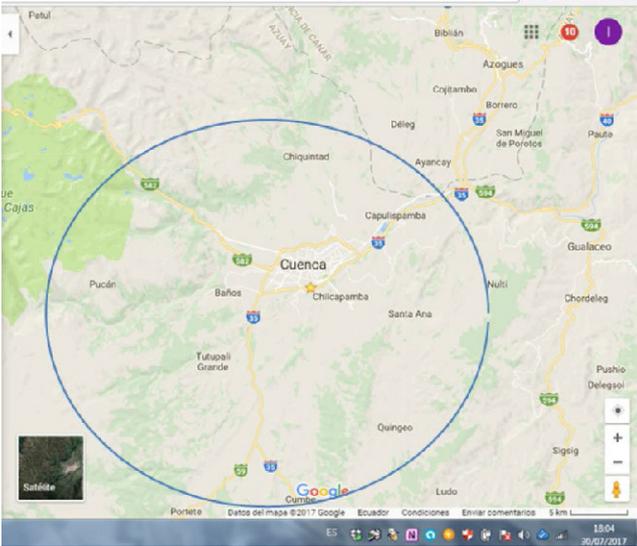


Fig. 5.- Ejemplo del Sistema de Visualización

ESTRUCTURA DE CCTV

El subsistema de CCTV forma una parte importante del sistema de seguridad, se deberán instalar cámaras CCTV en áreas vitales de las zonas rurales de las 21 Parroquias Rurales, salidas y entradas para vigilar y controlar, y los videos que transmiten a DVR que está en la sala de guardia del ECU-911 con el fin de guardar y ser revisado.

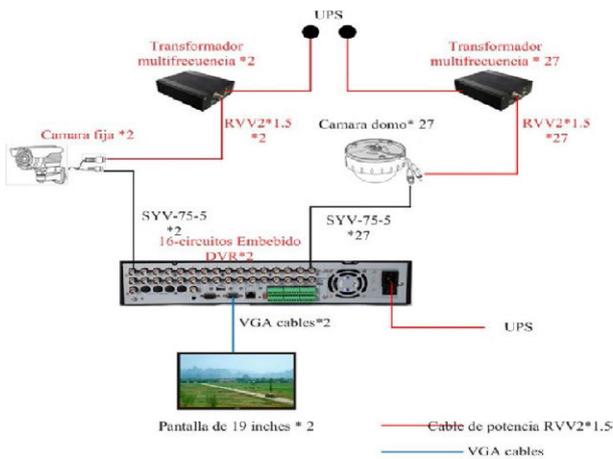


Fig. 6.- Subsistema de Seguridad en las 21 parroquias rurales.

SUBSISTEMA DE PDA

En la figura 7 se muestra la arquitectura general del subsistema de PDA. El sistema de terminal de emergencia es un programa de aplicación en PDA, comprende las funciones como la recolección y el almacenamiento de datos, también se realiza el intercambio de datos con el terminal de servicio de PDA. (CEIEC, 2012)

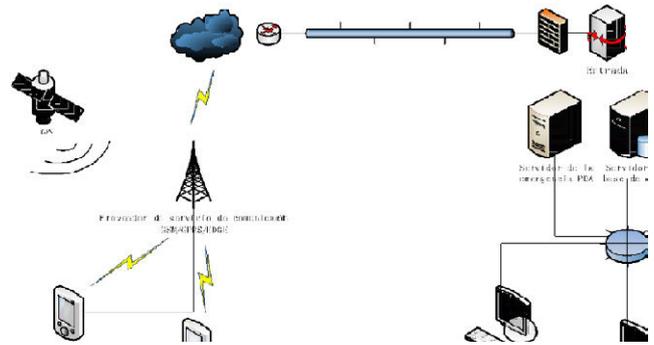


Fig. 7.- Subsistema PDA

SUBSISTEMA DE GPS

El subsistema de GPS se usa para ubicar los vehículos legalmente autorizados para transportar personas y mercadería que se encuentran identificados con la línea verde y buses de color verde autorizados, con el fin de mandar, despachar y gestionar los vehículos vigilados. El subsistema de GPS consiste en los terminales vehicular de posicionamiento y el servidor de segundo fondo de GPS en el Centro de comando. (CEIEC, 2012)

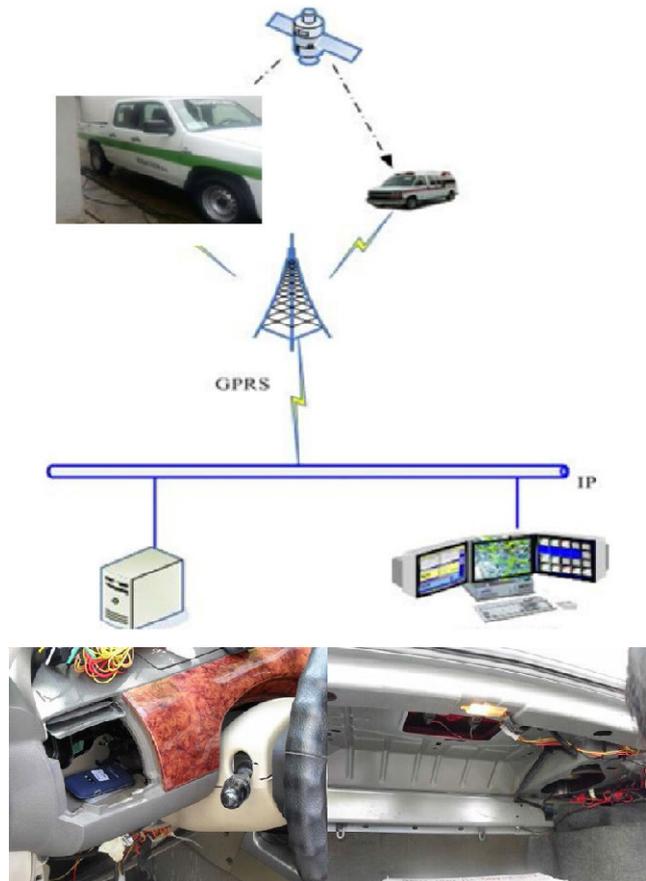


Fig.8.- Subsistema de GPS

TECNOLOGÍA DE APLICACIÓN DE GIS

- El mapa puede mostrar la ubicación de varios eventos, lo que puede ayudar a la policía a descubrir la posible relación entre los eventos.
- El mapa mostraría la distribución de los eventos para ayudar a la policía a manejar la situación general .
- Con la información profesional geográfica se puede saber los detalles del sitio.
- Se visualizaría el despliegue de la policía en el mapa y determina el centro policial más cercano.
- Se puede ayudar a determinar la ruta óptima para enviar los recursos policiales, bomberos, cruz roja, etc.
- Hacer clic en el evento en el mapa para abrir registros al respecto.
- Encontrar la unidad responsable del sitio.



Fig.9.- Aplicación del GIS

RECOMENDACIÓN AUTOMÁTICA EN EL MAPA.

- Se puede recomendar el uso de la policía, bomberos, cruz roja, etc. durante el despacho.
- Se puede desplegar la policía, bomberos, cruz roja, etc. en cierta zona con la tecnología de posicionamiento.

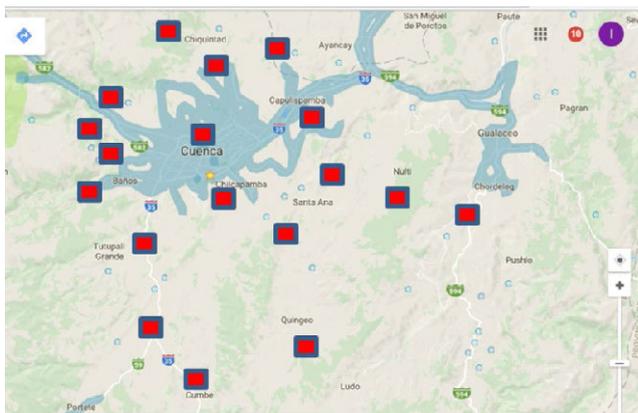


Fig.10.- Recomendaciones en el mapa para despacho de recursos.

SUBSISTEMA DE BOTÓN DE PÁNICO

El subsistema de botón de pánico puede ofrecer conveniencia para los ciudadanos al encontrar situaciones urgentes. Al presionar el botón, la información del incidente puede ser transmitida al Centro mediante la red de comunicación, y el Centro despacharía los recursos. El sistema de botón de pánico con-

tiene en el Receptor IP del Centro y los equipos periféricos de recepción de alarmas. (CEIEC, 2012)

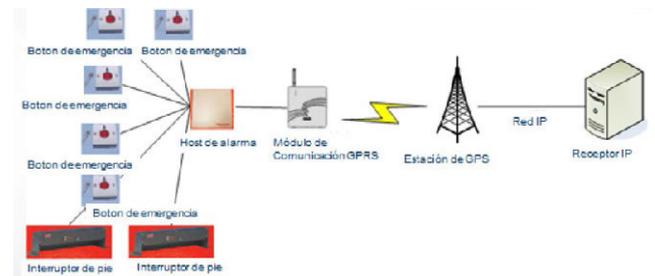


Fig.11.- Esquema Botón de Pánico

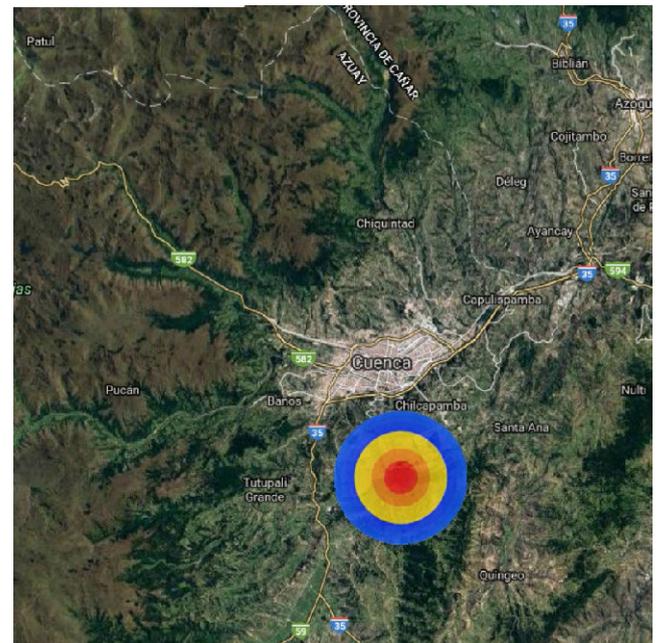


Fig.12.- Ubicación de una alerta en el Mapa por accionamiento del botón de pánico.

POLICÍAS MOVILIZADOS DURANTE EL AÑO 2016

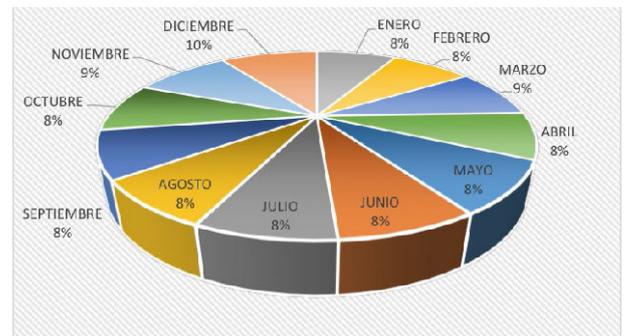


Fig.13.- Distribución porcentual de policías año 2016.

De acuerdo a la gráfica 13, se puede apreciar; que las proporciones en movilización de policías son bastante similares durante los distintos meses del año. Las variaciones no son significativas a lo largo de los meses. (Estadísticas Ecu-911, 2016) .

III. RESULTADOS.

El Sistema Integrado de seguridad ECU-911 cumple un papel significativo en respuesta a los incidentes generados en el

país y particularmente en el Azuay arrojan resultados positivos en protección. Sin embargo el despliegue tecnológico a nivel de las zonas rurales no han sido en condiciones igualitarias con el sector urbano obedece sin duda a muchos factores como es el acceso a la telefonía, acceso a la red eléctrica, seguridad de la infraestructura a instalarse, pero gracias a la interconexión de servicios se puede incorporar al sector rural a esta era tecnológica mediante el apoyo de los Sistemas GIS, GPS y otros y obtener seguramente resultados muy alentadores. Implica inversión pública y decisión política de llevar a cabo estos proyectos de gran envergadura.

Los sistemas GIS son de un apoyo bastante importante pero deben ser actualizados en las plataformas de seguridad, donde la información sea veraz para una respuesta oportuna e identificar las coordenadas exactas.

El sistema GIS se integra a todo el sistema de telecomunicaciones y forma parte importante y muy necesaria para que los sistemas funcionen de manera correcta y eficaz.

IV. CONCLUSIONES

El sistema de telecomunicaciones propuesto para las zonas rurales fácilmente se acopla al ya existente y se integra en conjunto con los sistemas GIS y GPS.

Los mapas actuales carecen de información a detalle en las zonas rurales y deberán ser actualizados completamente ya que al no hacerlo y llevar adelante la construcción de las distintas plataformas tecnológicas los resultados pueden ser errados y por ende los recursos que se destinen pueden resultar en vano o tardía.

La zona rural constituye el cordón de desarrollo y producción primaria, motor de desarrollo del país y debe ser atendida con la misma prolijidad como se lo hace a nivel urbano. Sin duda puede haber inconvenientes de acceso pero siempre se debe planificar con miras atender a esta parte de la población que en muchos de los casos carece de servicios básicos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Católica de Cuenca por el apoyo brindado para sacar adelante la presente investigación, de igual manera a varios de los funcionarios que ECU 911 que fueron guía para elaborar esta investigación pensando siempre en contribuir a la sociedad y ser parte integral de estos procesos de investigación y mejora académica.

REFERENCIAS

- CEIEC (2012), Solution & Engineering of defense and security Information Systems . Cursos profesionales. Ecuador.
- Pozo P. y Cherrez J. (2012), Sistemas de georeferenciación, México.
- Municipalidad de Cuenca (2014) , Plan de Ordenamiento territorial del Cantón Cuenca Administración 2009- 2014.
- Estadísticas Ecu-911, (2016) <http://www.ecu911.gob.ec/estadisticas/>

Valoración de la fragilidad visual del paisaje del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama mediante evaluación indirecta por componentes

Vallina Rodríguez, Alejandro¹

¹ Departamento de Geografía /
Facultad Filosofía y Letras / Univer-
sidad Autónoma de Madrid
Calle Fco. Tomás y Valiente nº 1,
CP 28049- Madrid/ Comunidad de
Madrid/ España
alejandro.vallina@predoc.uam.es

RESUMEN

El paisaje, como espacio geográfico originado tras la conjunción de rasgos tanto naturales como antrópicos, lleva aparejada una inherente relación entre los seres humanos y el medio ambiente sustentada en la percepción cognitiva del espacio a través de la vista, por lo que su estudio deberá contextualizarse dentro de un grado de subjetividad relativo. Bajo este hilo argumental el paisaje visual se ha abordado tradicionalmente desde dos concepciones complementarias, la calidad y la fragilidad visual, ambos condicionados por los componentes naturales del paisaje y los elementos antrópicos exógenos que pueden inducir connotaciones positivas y negativas. La multiplicidad de componentes del paisaje, unido a la confluencia de otros condicionantes como el campo visual, hace que la valoración de su fragilidad, entendida como el perjuicio que sufriría un determinado paisaje ante la ocurrencia de cambios o actuaciones en él, sea una tarea compleja para la que el uso combinado de las metodologías de Evaluación MultiCriterio (EMC) y los SIG se ha erigido en herramienta básica del análisis de la fragilidad visual del paisaje. La investigación que aquí se presenta nace con la intención de valorar cualitativa y sistemáticamente el paisaje del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama a través de un método indirecto de evaluación por componentes mediante la conjunción de la EMC y los SIG. El ejercicio de traducción e interpretación técnica de los diversos factores que configuran este paisaje finalizará con la consecución de una cartografía global del ámbito, que muestre detalladamente los valores de fragilidad visual de forma territorializada.

Palabras clave: Paisaje, SIG, EMC, fragilidad visual, apreciación.

ABSTRACT

The landscape, as a geographical space originated after the conjunction of both natural and anthropic traits, has an inherent relation between human beings and the environment based on the cognitive perception of space through sight, so that their study must contextualize within a relative degree of subjectivity. Under this plot line the visual landscape has traditionally been approached from the complementary conceptions, the quality and the visual fragility, both conditioned by the natural components of the landscape and the anthropic elements that can induce positive and negative connotations. The multiplicity of components of the landscape, together with the confluence of other conditions

such as the visual field, makes the assessment of its fragility, understood as the damage suffered by a given landscape before the occurrence of changes or actions in it, the sea one Complex task For the combined use of MultiCriteria (EMC) assessment methodologies and GIS, it has been established as the basic tool for the analysis of landscape visual fragility. The research presented here intends to qualitatively and systematically evaluate the landscape of the Sierra de Guadarrama National Park through an indirect method of component evaluation through the conjunction of the EMC and the GIS. The translation and technical interpretation of the various factors that shape this landscape ends with the achievement of a global cartography of the field, which show in detail the values of visual fragility in a territorialized way.

Keywords: Landscape, GIS, MCE, Visual Fragility, Appreciation.

I. INTRODUCCIÓN

El creciente interés que el paisaje ha adquirido en las últimas décadas se ha plasmado, de forma casi inevitable, en una producción científico-técnica muy extensa, que en la siguiente comunicación pone el acento en los renovadores enfoques interdisciplinarios sobre el paisaje desde una aplicación puramente práctica, integrando en la labor del paisajista el intercambio constante de métodos e ideas (Antrop, 2005), emanao todo ello de las corrientes emergentes en las ciencias que tradicionalmente se ocuparon del paisaje, tales como la ecología y la geografía. De este modo el paisaje ya no es visto y tratado como una combinación de ciencias, si no que se sitúa por encima de éstas para trocar en una forma universal de observar el medio. Es por ello que desde este trabajo el paisaje ha adoptado la concepción de paisaje realizada por (Cancer, 1994), que lo define como un conjunto de hechos visibles o invisibles, de los que el observador percibe, en un momento dado, un resultado global de un territorio. Es en este punto, donde el paisaje pasa a interpretarse desde el punto de vista perceptual, y por ello la presente investigación se inclina hacia una evaluación del grado de identificación de las personas con determinados paisajes y, derivado de ello, hacia una cuantificación de la fragilidad visual y estética de los mismos.

De este modo el paisaje ha ido percolando en el imaginario de las sociedades modernas como un bien territorial con entidad propia se ha de considerar el recurso desde el punto de vista de sus dos criterios inherentes: la capacidad del territorio que ocupa, su información ambiental; y el impacto que en la calidad ambiental tiene el uso del territorio, sus características visuales (Ormaetxea, 1997). En este viraje de la acepción del paisaje que aquí se trae a colación resulta tremendamente interesante el progresivo e imparable empoderamiento de la sociedad en las decisiones respecto a su entorno de vida, tanto privado como público. Indudablemente detrás de este proceso de toma de decisiones abierto se encuentra la relación entre el desarrollo de la sociedad moderna y su preocupación por la calidad ambiental, de forma que "las sociedades que perciben con mayor claridad el recurso paisaje dejan de residir o visitar zonas paisajísticamente degradadas" (Mérida, 1996). Dos son los componentes a los que se recurrirá generalmente en la determinación del valor global de calidad paisajística: la calidad visual y la fragilidad visual. Pudiendo ser ambas evaluadas mediante metodologías directas o indirectas. La presente investigación únicamente considerará una de las patas de la evaluación paisajística, la relacionada con la fragilidad. Asumiendo la tesis de que todo paisaje posee una serie de cualidades intrínsecas y extrínsecas residentes en sus elementos bióticos y abióticos, se puede afirmar que estos deberán ser advertidos por cada uno de los distintos observadores del territorio, esto es, el paisaje visual (y por ende su fragilidad) se valora de forma diferente según cada observador. En este sentido la valoración de la fragilidad visual de un determina-

do ámbito ha adquirido en las últimas décadas un papel trascendental de complementariedad en el estudio de los territorios, al aportar el papel de modulador de la calidad a partir de la predicción del impacto de las modificaciones planteadas sobre el carácter del paisaje analizado. Al igual que ocurre con el concepto de calidad visual, la fragilidad visual está sometida a una enorme diversidad de criterios y definiciones, aunque la bibliografía sobre la materia muestra un elevado consenso científico en torno al concepto de fragilidad visual del paisaje entendida como "la respuesta al cambio de sus propiedades paisajísticas o la susceptibilidad de un paisaje al cambio cuando se desarrolla un uso sobre él" (Cifuentes, 1979).

Ambas definiciones presentadas parecen indicar un sentido convergente en señalar que la fragilidad visual no es sino un método para valorar el perjuicio que sufriría un determinado ambiente (o paisaje) ante la ocurrencia de cambios o actuaciones en su seno.

Debido a la naturaleza y multiplicidad de los datos y los análisis necesarios, el abordaje metodológico se realizó empleando la Evaluación Multicriterio (EMC) con apoyo en Sistemas de Información Geográfica (SIG), en concreto, el software ArcGIS 10.2. La Evaluación Multicriterio (EMC) se ha convertido en las últimas décadas en unos de los procedimientos más utilizados (Galiana y Vallés, 2007). Las técnicas EMC han sido definidas como un conjunto de técnicas orientadas a asistir a los procesos de toma de decisión, investigando un número de alternativas a la luz de los múltiples criterios y objetivos que influyen en la evaluación del valor de la fragilidad paisajística, así como los aspectos ambientales de mayor relevancia espacial y las actividades humanas que afectan de un modo u otro a la visión global (Valpreda, 2007).

Las alternativas adoptadas en el proceso de toma de decisiones se configuran como las más idóneas para el decisor y el objetivo, lo cual no está exento de un grado mayor o menor de subjetividad, la cual entra a formar parte del resultado. Las técnicas EMC, y más concretamente el uso del denominado Modelo analítico Jerárquico (AHP) ha sido de utilidad en este proyecto para descomponer las relaciones complejas de los componentes del paisaje, ordenándolos en una estructura jerárquica donde se obtienen valores numéricos válidos para la valoración de la calidad visual (Santos, 1997).

Por otra parte, la integración del análisis multicriterio en los SIG permite combinar y valorar simultáneamente los criterios (las bases para la toma de decisión) con sus factores (los aspectos que los hacen fuertes o los debilitan) a través del uso de sus atributos (las variables) dentro de unas determinadas reglas de decisión y valoración. La bondad del uso combinado de EMC y SIG para el análisis de distintos fenómenos geográficos, debido a su potencial para emular la toma de decisiones a la vez que para trabajar con volúmenes importantes de

información geo-referenciada, aparece en múltiples trabajos (Santos y Cocero, 2006). Del mismo modo debe considerarse que dentro de las técnicas de Evaluación Multicriterio son diversas las combinaciones de procedimientos que pueden usarse, aunque en el caso concreto de la evaluación de los componentes del paisaje se ha estimado (Malczewski, 2004) la fusión de la llamada combinación lineal ponderada (WLC, Weighted Linear Combination) de las capas del territorio y la AHP (Analytic Hierarchy Process) como el modelo más adecuado y directo para la consecución de un modelo de gestión de la calidad visual (Pérez et al, 2015)

Esta modelización de la realidad paisajística del espacio y la cuantificación de sus características para los fines más variados en la gestión global del medio lleva desarrollándose de forma profunda más de dos décadas, por lo que se han tomado como referencia algunas investigaciones en las que se han realizado estudios de paisaje utilizando la EMC y los SIG, tales como los de (Orán et al., 2010) "Una propuesta complementaria de análisis de sensibilidad de un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio" sobre la modelización del crecimiento urbano y la localización óptima de zonas residenciales, comerciales e industriales en la Comunidad de Madrid. Por último, se tomó como referencia el trabajo "Un Modelo de Aplicación de SIG y Evaluación Multicriterio, al Análisis de las Capacidad del Territorio en Relación a Funciones Turísticas" (Ocaña y Galacho, 2002), donde se desarrollaba un modelo evaluación multicriterio de la capacidad del territorio con relación a diversas funciones turísticas y enfocada a la planificación del territorio.

OBJETIVOS

El objetivo fundamental de la investigación que aquí se presenta pasa por la consideración del paisaje desde el punto de vista exclusivamente visual, centrándose en los aspectos derivados de la percepción para concretar una valoración de la fragilidad visual del paisaje de una de las zonas más emblemáticas de la geografía del interior de la meseta Ibérica. Dicha valoración se elaboró a partir de la descomposición del paisaje según sus elementos visuales principales para la generación de un método independiente de los usuarios del paisaje, en el que la valoración de la fragilidad visual del paisaje se realizó de forma directa por expertos, por lo que la subjetividad queda implícita y puede controlarse mediante un criterio uniforme, y la evaluación emana de la contemplación del paisaje. La disgregación del paisaje en componentes persigue la elaboración de una imagen completa de los valores tanto naturales como culturales (Fuente de Val, 2004) contenidos en el paisaje propio del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (España) y su ámbito de influencia más próximo. Esta selección de componentes o factores visuales del paisaje será la base de la generación del método que aquí se propone.

ÁREA DE ESTUDIO

Por otro lado, es necesario comprender que el área de trabajo, El Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (Comunidad Autónoma de Madrid, España) y su zona de influencia más inmediata, se ha seleccionado por la presencia y calidad de sus valores naturales y socioculturales, ya que todo él es parte de la división natural entre las mesetas norte y sur en la zona centro de la Península Ibérica, convirtiéndose así en paso casi obligado entre las dos Castillas. Situada entre las sierras de Gredos y de Ayllón, este cordal se extiende como una sucesión de muros continuos de roquedos viejos en dirección suroeste-noreste por las provincias de Madrid, Segovia y Ávila, creando así un paisaje de enorme valor debido a la unión de

sus altas cumbres, sus aristas torreadas, sus circos y lagunas de origen glaciar, los amplios valles y laderas que los dominan y sus extensas arboledas y gargantas. A pesar de lo variado de sus elementos la Sierra de Guadarrama puede considerarse como una unidad homogénea desde el punto de vista orográfico, un cuerpo simple que se ha modelado a lo largo de milenios con una faceta natural y otra marcadamente humana, lo que ha imprimido en su fisonomía un fondo cultural perfectamente identificable a lo largo y ancho de sus valles, ríos y montañas. Su condición de frontera natural y estratégica ha hecho que, desde tiempos inmemoriales, sus habitantes trazaran distintas rutas para controlarla y franquearla.

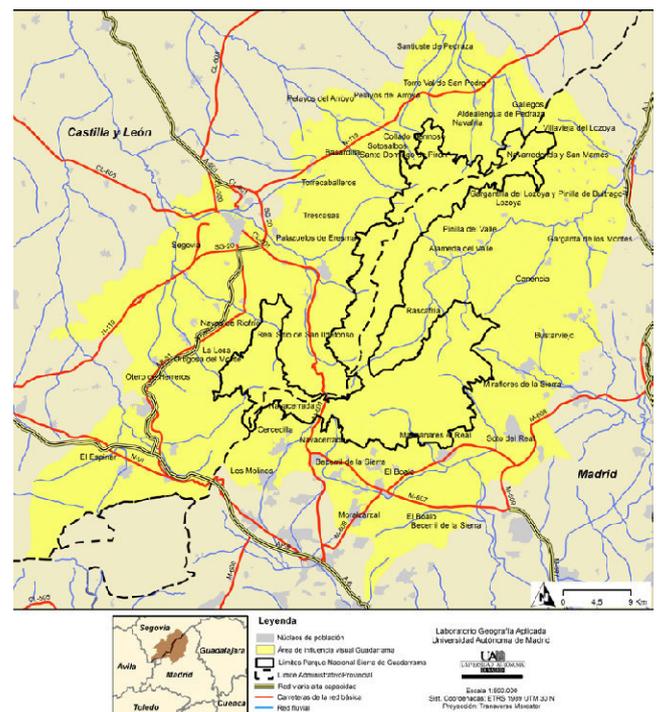


Figura 1. Mapa de situación del ámbito de estudio

Actualmente la Sierra de Guadarrama está atravesada por numerosos puertos de montaña, algunos de ellos con una altura superior a los 1.800 metros. Este hecho, unido a la proximidad de la ciudad de Madrid, hace que estas montañas tengan y hayan tenido una gran afluencia de montañeros y turistas, suponiendo una pérdida neta de valores del grandioso patrimonio natural, que por otra parte no ha hecho más que atraer a un creciente público desde la década de 1870, momento en el cual el paisaje se configura como el principio de mayor influencia para la toma de decisiones relacionadas con los usos y funciones históricas y actuales de la Sierra del Guadarrama (figura 1).

FUENTES

La presente investigación está fundamentada en el análisis perceptivo de los elementos del paisaje, para cuyo ajuste se ha procedido a trabajar previamente con información geolocalizada de tipo digital. En la conformación del modelo de decisión EMC han tenido una importancia capital las capas de criterios señaladas en la tabla I, donde se aporta información relativa tanto a sus características esenciales, el modelo de datos trabajado y la escala a la que se encuentra referenciada la información. Las capas, de libre acceso en las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDES), han sido descargadas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Ministerio de Agricul-

tura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (Magrama). La normalización de cada una de la información contenida en las capas referidas se ha elaborado de acuerdo a la referencia de la máscara de límites municipales, de resolución 1:25.000 y proyección en sistema geodésico UTM30N-ETRS89.

TABLA I
FUENTES DE DATOS UTILIZADAS

ELEMENTO	AUTOR	FORMATO	ESCALA/RESOL.	PROYECCIÓN
Lim. municipal	IGN	Vectorial/SHP	1:25000	UTM30N-ETRS89
Base cartog.	IGN/BTN100	Vectorial/SHP	1:100000	UTM29N-ETRS89
Modelo digital elevación	IGN/MTN25	Ráster/ASCII	25 m	UTM30N-ETRS89
Base ocupación del suelo	IGN/CLC12	Ráster/MMZ	1:100000	UTM30N-ETRS89
Mapa forestal español	MA-GRAMA MFES0	Ráster/SHP	1:50000	UTM30-ETRS89
Espacios naturales protegidos	MA-GRAMA	Vectorial/SHP	1:25000	UTM30-ETRS89

II. MÉTODO

La Fragilidad Visual del paisaje del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama y el ámbito territorial de su entorno más inmediato se determinará, tal y como ya se ha comentado en los apartados anteriores, según una valoración directa del medio. En el proceso de valoración, que parte de la identificación de los elementos constituyentes del medio, se ha utilizado la metodología EMC para adaptar las decisiones procedimentales a las características del ámbito de estudio, otorgando para ello semejanza a los criterios paisajísticos naturales y a los de origen antrópico.

DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES

El estudio de la fragilidad visual del paisaje es, de forma indiscutible, una valoración del medio en la actualidad partiendo de la selección de los elementos o componentes que lo integran. En la determinación de estos componentes llevada a cabo en esta investigación ha influido prioritariamente el conocimiento previo del ámbito de estudio a través de trabajos de campo, así como una lectura sobre los modelos y metodologías de investigación sobre la fragilidad del paisaje para comprender qué clase de componentes y criterios se habían utilizado en investigaciones previas. Con todas estas premisas se elaboraron una serie de modelos o esquemas de valoración jerárquicos, de cuyo desarrollo emanó un modelo final en el que cada nodo de la red corresponde a un componente de valoración del medio. Este modelo, capaz de organizar con detalle los componentes que integran la realidad paisajística del entorno, se ha elaborado entorno a dos grupos principales de criterios: fragilidad visual intrínseca del paisaje y fragilidad visual extrínseca, partiendo de trabajos realizados anteriormente sobre la evaluación de la fragilidad visual del paisaje. Los dos grupos de criterios propuestos presentan las siguientes características:

- Fragilidad visual intrínseca: Fragilidad que deriva de las características inherentes del paisaje, es decir, las propiedades constitutivas del medio, tales como sus cualidades fisiográficas o los usos del suelo.
- Fragilidad visual adquirida: Aquella fragilidad que no depende exclusivamente de los valores innatos del territorio, si no que estará determinada por los observadores en fun-

ción de elementos antrópicos fijos del ámbito, las figuras de protección existentes y la accesibilidad del mismo.

A través de estos dos grandes componentes se ha vertebrado el estudio de la fragilidad visual del paisaje de la Sierra de Guadarrama, en un sistema de jerarquización que divide los dos componentes principales en criterios paisajísticos más concretos y simples de cuantificar (figura 2).

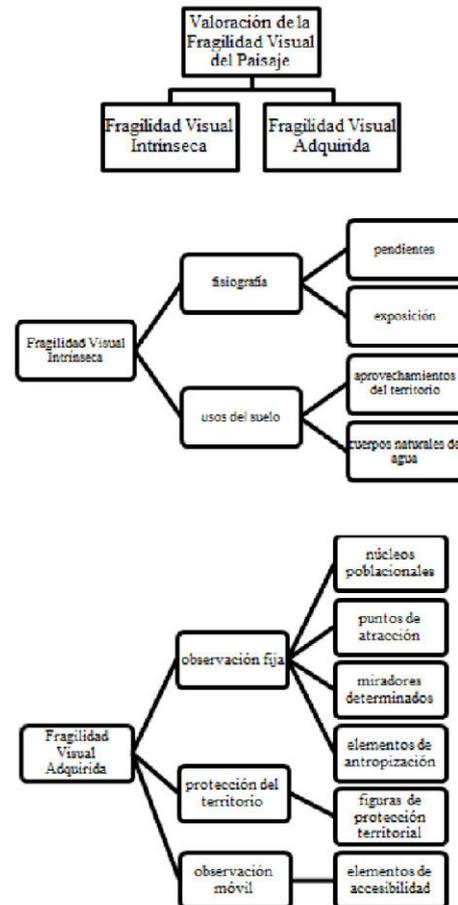


Figura 2. Modelo de valoración de la Fragilidad Visual

NORMALIZACIÓN Y VALORACIÓN

Una vez definido el modelo de componentes a considerar en el estudio de paisaje deben establecerse unas pautas de valoración de cada valor integrante del modelo. La valoración se efectúa en una escala jerárquica similar para todos los componentes, de manera que cada uno de ellos es tratado de forma independiente. La explicación acerca de la gestión de la valoración y normalización de cada uno de los componentes del modelo se realizará a partir del desarrollo metodológico de un caso concreto, esto es, sobre el proceso de valoración y normalización realizada para el criterio de los aprovechamientos del territorio, extraída y trabajada a partir de la información digital contenida en las capas de Corine Land Cover 2012. De este modo, se propuso un sistema de valoración y normalización de los componentes y sus criterios en el que los valores expresados son cuantitativos, por lo que son comparables. La escala de valoración es de 0 como valor mínimo de fragilidad a 4 como valor máximo, intentando de esta forma maximizar todo lo posible la coherencia de contenidos y de resultados entre las dos escalas de trabajo ya mencionadas. En esta escala quedan definidas las 4 clases de valor (tabla II).

TABLA II
NORMALIZACIÓN DE LOS VALORES DE FRAGILIDAD VISUAL

VALOR	FRAGILIDAD VISUAL
1	Reducida
2	Media
3	Alta
4	Muy alta/ Límite

TABLA III
ASIGNACIÓN DE VALORES DE FRAGILIDAD VISUAL SEGÚN USOS DEL SUELO DEL CORINE LAND COVER 2012

USOS SUELO CLC_12	DENSIDAD	ALTURA	CROMATIS- MO	TOTAL
Bosque mixto	3	3	4	10
Bosque coníferas	2	4	3	9
Bosque frondosas	3	3	4	10
Cultivos regadío	1	2	3	6
Esp. Agrícolas vegetación natural	2	2	3	7
Escasa vegetación	1	1	2	3
Mosaico seco/regadío	3	2	3	8
Matorral transición	2	2	2	6
Matorral medit. esclerófilo	2	2	2	6
Olivares	2	2	2	6
Pastizales supraforestales naturales	3	2	3	8
Prados y praderas	3	2	4	9
Sistemas agroforestales adhesionados	2	2	3	7
Tierras de labor en seco	2	1	3	6

Una vez acotado el campo de información al área de estudio de interés se evalúan los diferentes usos en función de tres indicadores visuales que ayudarán a determinar la fragilidad de cada aprovechamiento: densidad, altura y cromatismo de la vegetación. Cada uno de estos tres indicadores será puntuado según la escala 1-4 de acuerdo a las determinaciones observadas por el evaluador en trabajo de campo, posteriormente se sumarán los tres valores de cada uso del suelo y se obtendrá un valor global (tabla III).

Para el análisis del criterio de los aprovechamientos del territorio se han tenido en cuenta, como ya se ha dicho, las densidades apreciables en la vegetación, la altura media a la que puede ser visibilizado cada uso y el cromatismo (gama de colores y riqueza de tonalidades predominante en la vista como factores que inciden en la calidad visual del punto de observación y percepción de la fragilidad del paisaje. En la percepción visual del paisaje, la propia percepción de las formaciones y/o elementos vegetales que son visibles desde un punto de observación es fundamental para valorar la fragilidad de un paisaje. De este modo, se ha propuesto un sistema de valoración y normalización de los componentes y sus criterios en el que los valores expresados son cuantitativos, por lo que son comparables. La escala de valoración es de 0 como valor mínimo a 4 como valor máximo, intentando de esta forma maximizar todo lo posible la coherencia de contenidos y de resultados entre las dos escalas de trabajo ya mencionadas. En esta escala quedan definidas las 4 clases de valor (tabla IV).

TABLA IV
NORMALIZACIÓN DE LOS VALORES DE FRAGILIDAD DE LOS USOS DEL SUELO

RANGO DE VALORES	FRAGILIDAD VISUAL NORMALIZADA
≤3	1 fragilidad reducida
4-6	2 fragilidad media
7-8	3 fragilidad alta
9-10	4 fragilidad muy alta/límite

A esta metodología de valoraciones se adaptarán todas y cada una de las valoraciones que se realicen para todos los descriptores paisajísticos que el modelo de evaluación paisajístico propone para este trabajo.

PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS Y APLICACIÓN DEL ALGORITMO EMC

Cuando todos los criterios del paisaje objeto de esta investigación han sido evaluados según sus indicadores determinados, la labor del investigador consiste en discernir cuáles de estos criterios y componentes tienen predominancia sobre otros desde el punto de vista visual, ya que no todos tendrán la misma significancia/relevancia visual en el conjunto de la imagen paisaje analizada. Es en este punto donde surge la necesidad de clarificar, de un modo lo más sistemático y objetivo posible, de qué modo pasarán a ponderarse cada uno de los criterios y componentes del paisaje contemplados en el modelo de valoración. La ponderación de los criterios se define como el peso o importancia que se le atribuye a cada uno de los factores utilizados para el cálculo de la fragilidad visual del paisaje dentro del modelo diseñado para ello.

La valoración sobre la fragilidad visual del paisaje relativo al Parque Nacional del Guadarrama estará supeditada, de forma indefectible, a la asignación de ponderaciones que se le aporte, realizada esta bajo criterios aceptados por buena parte de la comunidad científica, probados en numerosos estudios sobre la calidad visual del paisaje o de valoraciones de impactos ambientales y pulidas con el conocimiento del ámbito de estudio del componente humano de este trabajo.

La asignación de ponderaciones aquí diseñada se ha desarrollado mediante la utilización del método Analytic Hierarchy Process (AHP) o Método Analítico Jerárquico. Este método se caracteriza porque descompone y organiza el problema de forma visual en una estructura jerárquica. El método establece la importancia relativa de los elementos de cada jerarquía a partir de la matriz de comparación por pares de (Saaty, 1980).

A cada par de variables se le asigna un valor de la escala entre 1/9 (extremadamente menos importante el primer criterio respecto al segundo) hasta 9 (extremadamente más importante el primer criterio respecto al segundo), expresados en la tabla V.

TABLA V
ESCALA DE MEDIDA EN LAS COMPARACIONES ENTRE FACTORES

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extrema	fuerte	moderada	igual	moderada	fuerte	extrema		
<i>menos importante</i>					<i>más importante</i>			

En la primera matriz se asignan los valores a cada par de variables que la componen (tabla VI).

TABLA VI
MATRICES DE PONDERACIÓN DE LA FRAGILIDAD VISUAL INTRÍNSECA CALCULADOS MEDIANTE LA MATRIZ DE SAATY

	Observación fija	Observación móvil	Protección territorio
Observación fija	1	2	3
Observación móvil	1/2	1	2
Protección territorio	1/3	1/2	1

El cálculo de los pesos se obtiene de la suma de los valores de cada columna de la matriz. Después se divide cada elemento por el total calculado para su columna, obteniendo así la matriz de normalidad, y se calcula el promedio de los elementos de cada fila de esa matriz normalizada. Los valores medios son los pesos asignados a cada criterio.

	Observación fija	Observación móvil	Protección territorio
Observación fija	1	2	3
Observación móvil	0,5	1	2
Protección territorio	0,3	0,5	1
	1,8	3,5	6

	Observación fija	Observación móvil	Protección territorio	Peso (%)
Observación fija	0,55	0,58	0,5	50
Observación móvil	0,28	0,28	0,33	30
Protección territorio	0,17	0,14	0,17	20
	1,00	1,00	1,00	100

La tercera matriz es la matriz normalizada a suma 1, donde cada valor de una columna se divide por la suma de los valores de esa misma columna. Posteriormente se desarrolla el vector de prioridad de cada criterio calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada. Como resultado de este proceso se obtiene el peso de cada criterio (Zube, 1984). En la segunda matriz se han calculado los valores de las fracciones y éstos se han sumado columna a columna.

Según las determinaciones del AHP, una vez se ha procedido a la normalización de los factores mencionada en las líneas anteriores se calculan los pesos porcentuales de los mismos, con el objetivo de concluir con una integración de las capas de información de cada criterio a partir de la aplicación de un algoritmo de EMC. La metodología EMC se sirve, entre otras, de las técnicas compensatorias, basadas en el precepto de que un valor alto de una alternativa en un factor puede compensar un valor bajo de la misma alternativa en otro factor.

La Sumatoria Lineal Ponderada, como una de las técnicas EMC compensatorias, será la utilizada en este trabajo (Gómez y Barredo, 2005). Esta técnica procede asignando el valor en cada componente como resultado de la función de los componentes del nivel inferior que en él confluyen, La fórmula de la Sumatoria Lineal Ponderada es: $R = \sum w * v$

Donde (r) es el nivel de adecuación de la alternativa, (w) es el peso del criterio y (v) es el valor normalizado del factor. Como puede apreciarse en la figura 3, en el primer nivel de los dos grandes componentes de la fragilidad visual del paisaje se han estimado unas ponderaciones del 60% en el componente relativo a la fragilidad visual intrínseca, es decir, que los valores consustanciales del paisaje, no vinculados ni a la acción del hombre en el territorio ni a su papel como observador del territorio, tienen una influencia sobresaliente en el modelo de fragilidad sobre el cual pivota la presente investigación. Ello viene a reforzar la tesis de que buena parte de la fragilidad visual que pueda ostentar un determinado paisaje están vinculados fundamentalmente a las realidades fisiográficas y de dominancia de usos del suelo en el mismo.

El 40% restante de la ponderación del modelo de fragilidad visual confeccionado atañe a los componentes visuales adquiridos del paisaje, ligados a la acción del hombre y a su percepción como observador del paisaje. Dentro de este gran componente de la fragilidad visual queda patente que las principales determinaciones de este valor vienen dadas desde los factores de observación fija del territorio, debido a su permanencia y visibilidad en el ámbito guadarrameño.

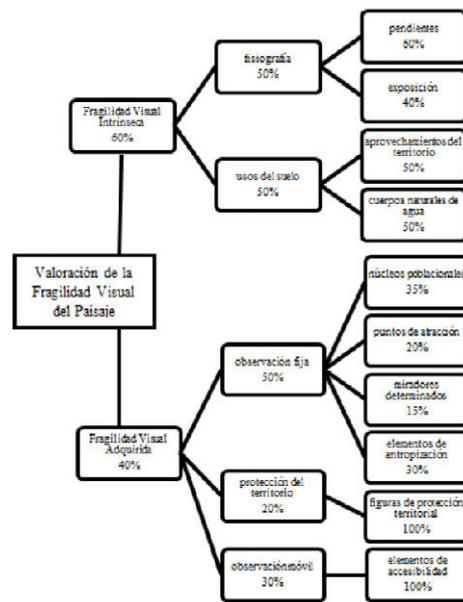


Figura. 3. Ponderación del modelo de Fragilidad Visual

III. RESULTADOS

Producto de la aplicación del modelo de fragilidad visual y de la ponderación de los elementos del paisaje reseñados en el apartado metodológico, consistente de manera sucinta en la agregación de los valores de fragilidad obtenidos para los componentes visuales intrínsecos y adquiridos analizados, se elaboró una cartografía de la fragilidad visual del paisaje del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama y su área aledaña. En dicha cartografía quedó expresada la fragilidad visual del paisaje global de la zona mediante siete valores positivos, basándose en una escala valorativa que asignó a cada pixel del mapa de fragilidad visual una valoración positiva que iba desde el 4 al 10, siendo el 10 la máxima fragilidad visual obtenible en una cuadrícula del modelo ráster y 4 la mínima.

Con el objetivo de normalizar, estandarizar y hacer más legible el mapa resultante se procedió a realizar una última reclasificación del mapa, destinada a resolver los problemas de legibilidad derivados de un mapa que tenía una escala cromática de siete tonos, en la que las diferencias entre áreas de alta y las de baja calidad quedaban totalmente diluidas en una amalgama sin orden. Estas siete categorías, por lo tanto, se reclasificaron y agruparon en cuatro niveles de fragilidad visual, dando lugar al Mapa Final de la Fragilidad Visual del Paisaje del Parque Nacional de Guadarrama.

TABLA V
DISTRIBUCIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE FRAGILIDAD VISUAL EN EL ENTORNO ANALIZADO

CATEGORÍA	SUPERFICIE (HA)	%
Baja	23935	12,6
Media	40651	21,4
Alta	51858	27,3
Muy alta/ Límite	73513	38,7
TOTAL	189957	100

Más allá de lo interesante que resulta analizar por separado cada uno de estos datos porcentuales (tabla V), lo cierto es que se ha considerado prioritario en este apartado realizar una síntesis acerca del porqué de esta distribución. La valoración de fragilidad visual máxima, correspondiente al 38,7% del Mapa de Fragilidad Visual del Paisaje, aproximadamente unos

735 km², tiene una distribución que abarca las intensidades de relieve menos acusadas, ya que de forma clara los datos de mayor fragilidad ocupan los piedemontes y áreas de fondo de valle o llanura meseteña, tanto en la vertiente de Madrid como en la de Segovia. Esta afirmación, si se relaciona la ponderación de la fragilidad intrínseca del paisaje con los resultados territorializados, viene reforzada por el hecho de que es precisamente en las zonas menos abruptas, con poca pendiente, áreas de llanura y fondos de valle, donde se ubican los aprovechamientos y usos del suelo de menor valoración paisajística, pues los elementos de máxima valoración de fragilidad, como pudieran ser los bosques o los pastizales de montaña tienen su ámbito geográfico enclavado en las estribaciones y macizos de la Sierra de Guadarrama. Atendiendo, por último, a las relaciones entre el modelo de fragilidad visual adquirida y la distribución de la fragilidad visual muy alta en el ámbito de estudio cabe destacar que son precisamente las zonas con una fisiografía más favorable las que poseen una mayor densidad y tamaño de los núcleos de población, mayores elementos de antropización del paisaje y mayor densidad de redes y elementos de accesibilidad, así como una menor densidad de puntos de atracción visual, miradores para la observación fija del paisaje y un menor grado de protección del territorio mediante figuras normativas. Atendiendo muy concretamente al área de delimitación del Parque Nacional (figura 4) puede apreciarse que el uso intensivo de actividades de gran impacto visual ejercen una enorme presión sobre el paisaje en áreas como el entorno de los puertos de Navacerrada y Coto, con elevadas presiones y antropización del espacio por su accesibilidad y fragmentación de áreas protegidas; y los pinares y montes de Valsaín (Segovia) y del valle del Lozoya (Madrid), debido en ambos casos a la presión antrópica de los puntos de accesibilidad, la presencia de grandes núcleos urbanos en el entorno, los usos del suelo intensivos de la zona y el menor grado de protección del territorio que presentan estas zonas circundantes al Parque Nacional propiamente dicho.

En cuanto a la fragilidad visual alta es importante comprender que la territorialización que ha resultado en el Mapa de Fragilidad Visual tiene detrás un claro reflejo emanado del modelo de análisis del paisaje. Esta afirmación se realiza por la clara vocación de mediación y conciliación entre los ámbitos que presentan una mayor fragilidad y los expuestos a una menor. Por eso la distribución concreta resultado del análisis global del ámbito de la Sierra de Guadarrama confirma que las fragilidades medias se encuentran, de forma muy general, en las inmediaciones de áreas con alta fragilidad, esto es, circundando núcleos urbanos, áreas deportivas de alta montaña, las infraestructuras y elementos de accesibilidad y conectividad. Al igual que ocurre con la distribución de los espacios con muy alta fragilidad, la fragilidad alta también se encuentra en gran medida repartida en las áreas de llanuras y penillanuras. Dentro de los límites del Parque Nacional (figura 4) se puede observar como los puertos de montaña, las estribaciones de la Mujer Muerta y el valle del Lozoya son áreas en las que predomina, al igual que en los enclaves de los montes de Valsaín, los Cotos y la línea de cumbres de la vertiente serrana de Madrid, debido fundamentalmente a las presiones visuales y de accesibilidad e intensidad de usos turístico-recreativos que se suceden en estas áreas concretas.

Al igual que en el análisis de los resultados extraídos para la distribución de las fragilidades visuales altas y muy altas, la interpretación que puede realizarse sobre la el reparto territorial de los valores de fragilidad media guardan una muy estrecha relación con las determinaciones especificadas en el modelo de toma de decisiones y la ponderación de los diferentes

componentes del paisaje analizados. Ello tiene un claro reflejo en cómo se distribuyen al áreas con fragilidad media en el ámbito de influencia paisajística del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, ya que, como puede apreciarse, se han definido como áreas de media fragilidad aquellas que poseen una cualidades fisiográficas pronunciadas y bien definidas, con un grado de pendiente y exposición solar/visual elevadas, y en las que comienzan a ser predominantes los usos silvícolas, de mosaico agroforestal y de pastizal. Como cabe esperar estas zonas de ladera y piedemontes o de cumbre soportan una menor presión antrópica, ya que la densidad y tamaño de los núcleos de población disminuye ostensiblemente en relación con las zonas de relieve más suave. Como consecuencia de ello también en estas zonas de fragilidad media se encuentran menores capacidades de accesibilidad y de otros elementos de distorsión y antropización visual del medio. Los datos volcados arrojan la cifra aproximada del 20% de territorio analizados bajo la consideración de fragilidad media, aunque su distribución en el mapa final esté concentrada en cuatro grandes ámbitos insertos dentro de la delimitación del Parque Nacional: el entorno de la Sierra de la Mujer Muerta y los bosques y Parques de San Ildefonso, el macizo de la Pedriza y la Cuerda Larga y sus estribaciones de los Altos del Hontanar y Collado Hermoso y, por último, el gran macizo central de las cumbres de Peñalara, Puerto del Reventón, y de Calderuelas.

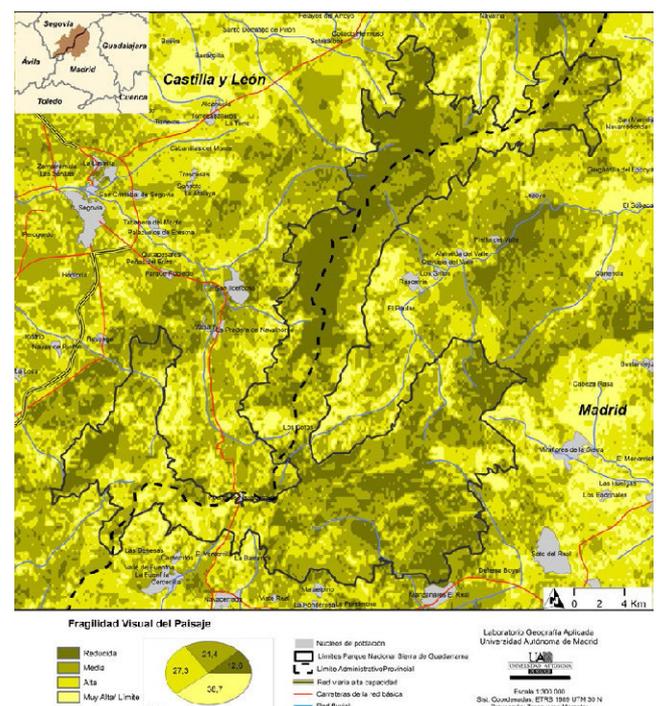


Figura 4. Mapa final de la Fragilidad Visual del paisaje

Para concluir, es necesario realizar un análisis de los resultados relativos a los valores de fragilidad visual baja medidos en el entorno del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (figura 4). Algo más del 12% del territorio analizado, unos 239 km², ha arrojado unos bajos indicadores de fragilidad, es decir, que la presión antrópica que soportan estos ámbitos territoriales es baja y que, por tanto, la tendencia la degradación de los paisajes desde el punto de vista ambiental y visual está muy limitada y sus amenazas son contenidas. Como podrá apreciarse las áreas que han arrojado menores valores de fragilidad visual coinciden, de forma casi íntegra, con las fisiografías más pronunciadas y abruptas, esto es, con zonas de cumbres serranas, valles internos, circos glaciares

y áreas periglaciares, laderas boscosas o zonas de fondo de valle, riberas de cursos fluviales u otras áreas y entornos protegidos como bosques, cotos de caza, embalses o montes de utilidad pública. Más concretamente en el área de delimitación del Parque Nacional se aprecian tres grandes entornos en los que los bajos valores de fragilidad visual denotan, de manera muy complementaria, áreas en las que también la calidad global de los entornos paisajísticos es muy elevada, tales como las zonas cumbreiras de Peñalara, Siete Picos, la Cuerda Larga, la Najara, un gran ámbito de los plegamientos y murallas graníticas de la Pedriza de Manzanares y algún área más difuminada en el sector oeste del Parque, ya en el entorno del macizo de la Mujer Muerta, en Segovia, todos ellos sin duda parajes de una muy limitada pero creciente afectación antrópica, con unos elevados estándares de calidad ambiental y visual, con claros y evidentes rasgos de atalaya desde los cuales apreciar y valorar los elementos de atracción visual del ámbito y en los que tienen un papel fundamental los componentes de observación fija y de protección del territorio del criterio de fragilidad visual adquirida del modelo propuesto.

IV. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de la aplicación, se demuestra una vez más que los estudios de calidad y de fragilidad visual del paisaje son fundamentales para una correcta ordenación del territorio, especialmente en espacios naturales en los que es prioritaria la política de conservación de la naturaleza, y en aquellos en los que son compatibles usos como las actividades turístico-recreativas o el uso público con la conservación de los recursos naturales. Sin duda estudios como este, vinculados a la percepción del paisaje, proporcionan información para disminuir la presión humana sobre determinados sitios de gran valor ecológico donde se concentra tradicionalmente el uso público, indicando parajes alternativos con una elevada atracción. En este sentido, la fragilidad visual del paisaje, junto a otros recursos, es frecuentemente empleada como criterio para señalar zonas que deben ser preservadas frente a actuaciones que suponen un cierto impacto ambiental.

En la actualidad es cierto que la inmensa mayoría de técnicas de evaluación de la fragilidad visual del paisaje son criticadas por su subjetividad, por el reducido y característico ámbito territorial o de conocimiento al que son aplicadas. Esta investigación ya partía de la premisa de que no existe una técnica de valoración del paisaje correcta que excluya a las demás y que la mayor parte de los trabajos se basan en métodos subjetivos pero sistemáticos. La parcialidad con respecto a la valoración del paisaje se hace aún más patente si cabe cuando variables de tipo estético y cultural, relacionadas con la percepción humana, entran a formar parte de la ecuación de la calidad/fragilidad visual. El desarrollo de la metodología indirecta de evaluación que aquí se presenta tiene un claro sesgo vinculado a la relevancia y grado de participación de los parámetros que constituyen su modelo. Dicho sesgo está indiscutiblemente asociado a la dirección y elección de los componentes del paisaje estudiados y los enfoques de fragilidad aportados. Únicamente mediante la exigencia de un mayor y más certero conocimiento del medio objeto de estudio por parte del equipo gestor y una incorporación más exhaustiva de parámetros paisajísticos y la importancia relativa dada por medio de las ponderaciones realizadas aportará una solución eficaz capaz de, por lado, ofrecer una alternativa menos sesgada y, por otro, ajustarse más a las exigencias y peculiaridades del complejo espacio analizado.

La propuesta metodológica aquí expuesta nace como aspiración de ser una pauta más que ayude a determinar el valor que

presenta el paisaje de un espacio tan concreto como puede ser el ámbito de la Sierra de Guadarrama dentro del Sistema Central Ibérico, pero en todo momento la investigación ha considerado necesaria la elaboración de un completo método de valoración con rangos y criterios bien establecidos, que sea una herramienta más en el campo de la valoración perceptual del paisaje desde el punto de vista de la disciplina geográfica.

REFERENCIAS

- Antrop, M. (2005). Why landscapes of the past are important for the future. *Landscape and Urban Planning*, 70, págs 21-34. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016920460300207X>
- Cancer, L. (1994). Aproximación crítica a las teorías más representativas de la ciencia del paisaje. *Geographicalia*, págs 17-34. <http://bddoc.csic.es:8080/detalles.html?tabla=docu&bd=GEOURBI&id=240949>
- Cifuentes, P. (1979): La Calidad Visual de Unidades Territoriales. Aplicación al valle del río Tiétar. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ing. de Montes. Universidad Politécnica, Madrid.
- Fuente de Val L, G., Atauri, J.A. y De Lucio, J.V. (2004). "El aprecio por el paisaje y su utilidad en la conservación de los paisajes de Chile Central". *Ecosistemas*, nº2. págs 82-89.
- Galiana, F. y Vallés, M. (2007). La planificación del paisaje en la comunidad valenciana: análisis de la calidad y fragilidad visual. Universidad de Valencia. págs 111-125.
- Gómez, M. y Barredo, J. I (2005): Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid, Ed. Ra-Ma. págs 37-53.
- Malczewski, J. (2004): "GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview". *Progress in Planning*, nº 62, págs 3-65.
- Mérida, M. (1996). El paisaje visual. *Baetica*(18), págs 205-222. <http://hdl.handle.net/10630/9334>.
- Ocaña, C. y Galacho Jiménez, F. B. (2002): "Un Modelo de Aplicación de SIG y Evaluación Multicriterio, al Análisis de las Capacidad del Territorio en Relación a Funciones Turísticas" Universidad de Málaga. Págs 58-71.
- Orán Cáceres, J.P., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Una propuesta complementaria de análisis de sensibilidad de un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio". En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Págs. 971-987
- Ormaetxea, O. (1997). Concepto y método en paisaje. Una propuesta docente. *Lurralde*(20), págs 333-344. Obtenido de <https://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur20/20ormae/20ormae.pdf>
- Pérez Albert, Y. et al. (2015): "Propuesta metodológica para el análisis de la calidad visual del paisaje. El caso de la comarca de El Priorat" *Congreso Age-Unizar 2015*. Págs 797-806.
- Saaty, T.L. (1980): *The Analytic Hierarchy Process*. New York, McGraw Hill. págs 245-264.
- Santos, J. M. (1997): "El planteamiento teórico multiobjetivo/ multicriterio y su aplicación a la resolución de problemas medioambientales y territoriales, mediante los S.I.G. Raster". *Espacio, Tiempo y Forma, Serie VI, Geografía*, nº10, pp 129-151.
- Santos, J. M., y Cocero, D. (2006): *Los SIG raster en el campo medioambiental y territorial: ejercicios prácticos con IDRISI y MiraMon*. Madrid, UNED. Págs 89-103.
- Valpreda, C. (2007): "Sistema de Información Geográfica (SIG)-teledetección y evaluación multicriterio (EMC) en un estudio de evaluación de impacto ambiental (EIA)", *Memorias XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*, págs 29-31.
- Zube, E.H (1984). "Themes in Landscape Assessment Theory". *Landscape Journal*, nº 3. pp.104-110.

Tecnologías de Información Geográfica en el diagnóstico territorial participativo con comunidades indígenas. Caso de estudio en territorios Mapuche Lafkenches de Tirúa (38°20'S y 73°30'W), Chile

Fuenzalida Díaz Manuel¹

¹ Departamento de Geografía /
Facultad de Ciencias Sociales /
Universidad Alberto Hurtado
Calle Cienfuegos # 41, Santiago,
Chile
mfuenzal@uahurtado.cl

RESUMEN

Se describe la experiencia de diagnóstico y problematización territorial con enfoque comunitario que se elaboró en conjunto a comunidades Mapuche Lafkenches de Tirúa, en el litoral sur de la región del Bío-Bío [38°20'S y 73°30'W], Chile.

Se trabajó con cuatro comunidades (Kellgko; Lorenzo Quintrileo; Milla Rayen; Alto Primer Agua), utilizando diversas técnicas participativas como transecto o caminata de campo, cartografías participativas, entrevistas en profundidad e historias de vida, mapas de usos de suelo, biografía de cultivos, Evaluación Multicriterio, compartiendo su cotidianidad y reflexionando las distintas experiencias de vida. Las herramientas tecnológicas utilizadas corresponden a GPS, Imágenes Satelitales, QGIS y EasyAHP.

Se advierte la necesidad urgente de reforestar en espacios que presentan altos niveles de erosión, con especies nativas, que sirvan para recuperar suelos. Se reconoce la preocupación por mantener un uso sustentable en el tiempo del bosque nativo de manera de contribuir al equilibrio del territorio desde un enfoque ecosistémico e intercultural. Se construye un diagnóstico en que los saberes de la comunidad son la base fundamental para la construcción de información territorial.

Los intereses y necesidades de las comunidades indígenas pueden ser espacializados con TIG. Cada comunidad propone una estrategia distinta para la resistencia al monocultivo forestal, lo que revela la importancia de la construcción e intervención social de abajo-arriba.

Palabras clave: **Diagnóstico territorial participativo, Tecnologías de la Información Geográfica, Comunidades indígenas, Chile.**

ABSTRACT

The experience of diagnosis and territorial problematization with a community-based approach it is described, which was developed jointly with Mapuche Lafkenches communities of Tirúa, on the southern coast of the Bio-Bio region [38°20'S and 73°30'W] Chile.

Work has been done with four communities (Kellgko; Lorenzo Quintrileo; Milla Rayen; Alto Primer Agua), using various participatory techniques how transects or field walks, life histories, land use maps, crop biography, Multicriteria Assessment, sharing their daily

life and reflecting the different life experiences. The technological tools used correspond to GPS, Satellite Images, QGIS and EasyAHP.

There is an urgent need to reforest areas with high levels of erosion, with native species that serve to recover soils. Concern is recognized for maintaining a sustainable use of native forest over time to contribute to the balance of the territory from an ecosystemic and intercultural approach. A diagnosis is constructed in which the knowledge of the community is the fundamental basis for the construction of territorial information.

The interests and needs of indigenous communities can be spatialized with Geographic Information Technologies. Each community proposes a different strategy for resistance to forest monoculture, which reveals the importance of a bottom-up approach of social intervention and construction.

Keywords: *Participative territorial diagnosis, Geographic Information Technologies, Indigenous communities, Chile.*

I. INTRODUCCIÓN

Se describe la experiencia de diagnóstico y problematización territorial con enfoque comunitario que se elaboró en conjunto a comunidades Mapuche Lafkenches de Tirúa, en el litoral sur de la región del Bío-Bío [38°20'S y 73°30'W], Chile. Este espacio está dominado por un modelo de producción forestal de monocultivo, heredado por el Decreto Ley 701 de 1974 promulgado por la dictadura militar de Pinochet, que mantiene en constante tensión a las comunidades con el Estado y los empresarios (Donoso et al, 2015).

Este modelo industrial de plantación de árboles como pinos (pino radiata) y eucalipto (eucalipto globulus) -especies exóticas de rápido crecimiento- en extensas áreas geográficas, tiene como finalidad abastecer mercados externos de madera, carbón, leña, troncos y celulosas (Gonzales, 2015), desplazando sistemáticamente el bosque nativo y generando diversos efectos medioambientales en las comunidades mapuches como: acidificación de los suelos, pérdidas de nutrientes y agotamiento de los recursos hídricos, lo cual se traduce en una creciente desertificación del territorio, pérdida de la riqueza natural, deterioro de la biodiversidad y destrucción de ecosistemas (Programa Chile Sustentable, 2004, p.19).

Actualmente, las políticas públicas, los programas y proyectos en general, tienen una lógica de construcción e intervención social de relaciones asimétricas de poder entre Estado y comunidad (Martínez, 2006), en el que no se da una articulación efectiva entre las estructuras y funcionamientos de la institución y las comunidades indígenas (Martínez, 2006; Rubilar & Roldan, 2014). Tal lógica, opera de igual forma en los modelos de producción extractiva en América Latina, generando profundos conflictos socioambientales y niveles agudos de injusticia ambiental, en particular, en comunidades indígenas que habitan zonas rurales ricas en recursos territoriales, profundizando el enraizamiento de relaciones asimétricas entre comunidad y Estado.

En particular para la comuna de Tirúa, el 48% de la superficie total comunal es de uso forestal (Censo Forestal Agropecuario, 2007) perteneciendo a dos grandes empresas del rubro; Mininco y Arauco. Ello ha significado conflictos territoriales producto de la ocupación de predios indígenas que actualmente se encuentran bajo dominio de empresas forestales. Esto ha originado procesos de resistencia en contra de la expansión del monocultivo y defensa de la naturaleza, "enmarcada en la reconstitución y re-emergencia de las identidades étnicas como defensa y preservación ante procesos de desestructuración materiales e inmateriales de las condiciones de reproducción sociocultural" (Pineda, E. p.182).

La explotación del bosque nativo en territorios ancestrales ha dado origen a conflictos entre el desarrollo del sector forestal y la preservación del bosque nativo (PLADECO Tirúa, 2009) o Mawida y de la reproducción social, material y cultural del pueblo Mapuche, en el sentido de su cosmovisión en su concepción de territorio. De acuerdo a la cosmovisión Mapuche todos los árboles y toda la naturaleza son sagrados y desde esa visión la explotación forestal representa la pérdida del espíritu del bosque y de la cultura ancestral. Por lo cual existe un daño directo a la producción social y simbólica del pueblo, puesto que amenaza el carácter simbólico e identitario que las comunidades tienen con la tierra y con los elementos naturales como el Mawida. De esta manera, la relación con la naturaleza busca el equilibrio a través de un vínculo armónico, donde el pueblo Mapuche antes de llevar a cabo cualquier trabajo que interfiera con la naturaleza, ya sea cortar un árbol o iniciar una siembra, pide permiso a Ngenechen "dueño de los hombres", a quien también deben agradecer (FUCOA, 2014). En efecto, todo territorio es sagrado y concebido "no solo como un espacio geográfico donde se habita, sino como ámbito en el que los seres humanos y la naturaleza constituyen un todo indivisible, un círculo equilibrado de vida. La relación seres humanos y naturaleza se piensa circular, armónica y basada en el principio de la reciprocidad -se da y se recibe a la vez-" (Agosto, P & Briones, C. 2007, p. 296).

De esta manera, la relación con la naturaleza se encuentra regida por una serie de nociones simbólicas, junto a una serie de principios ecológicos y culturales, que representan los pilares fundamentales de la noción de kúme mogñen o buen vivir (Hasen, 2014). De esto último, es que la pérdida de suelo y de bienes naturales como el agua y el bosque nativo representan para las comunidades mapuches una situación medioambiental que influye en la salud de la comunidad (PLADECO Tirúa, 2009). En este sentido, es necesario entender que la cosmovisión del pueblo mapuche, es el punto de partida desde el cual se debe entender la salud y el modelo medicinal ancestral, pues implica una relación directa entre el ser humano y su entorno conformando una unión armónica indisoluble (Hasen, 2012).

Por ello es que diversos actores locales advierten la necesidad urgente de reforestar en espacios que presentan altos niveles de erosión, con especies nativas, que sirvan para recuperar suelos y proteger el agua para consumo humano. De esta manera, se plantea la preocupación por mantener un uso sustentable en el tiempo del bosque nativo de manera de contribuir al equilibrio del territorio desde un enfoque ecosistémico e intercultural. Este enfoque tiene la "capacidad de articular de manera armónica el medio ambiente, la sociedad humana y la economía, entendiendo los ecosistemas en sus vinculaciones al desarrollo humano" (Hasen, 2012, p.105).

Por todo lo anterior, la presente propuesta de trabajo pretende construir información territorial con enfoque comunitario a fin de aportar en las iniciativas de resistencia al monocultivo forestal en territorios Mapuche Lafkenches. El enfoque comunitario pretende romper la relación experto/institución y no experto/comunidad, bajo encuadre positivo, lo que equivale a emerger las capacidades, competencias, habilidades, recursos y potencialidades. Aquí la apuesta es poner en valor la sabiduría (de la comunidad) por sobre el saber (del experto).

En el apartado siguiente se detalla la metodología adoptada. Luego se describen los resultados alcanzados por la utilización de distintos instrumento y técnicas desde la Geografía, para terminar con una sección de conclusiones.

II. MÉTODO

Se trabajó con cuatro comunidades asentadas en el medio rural. Comunidad Kellgko en la localidad de San Ramón (Sector Norte). Comunidad Lorenzo Quintrileo en la localidad de Quidico (Sector Centro). Comunidad Milla Rayen en la localidad de Las Misiones (Sector Sur) y finalmente, Comunidad Alto Primer Agua (Sector Sur).

El uso de TIG en el diagnóstico territorial participativo con pueblos indígenas, requiere de dos fases metodológicas (ver Figura 1).

En la **Fase 1: Terreno**, en cada uno de los territorios y en conjunto con la comunidad, se emplearon diversas herramientas participativas, las cuales permitieron mediante reflexiones de los participantes, comprender y reconocer las necesidades y dinámicas territoriales, en un contexto local sobre el impacto del monocultivo forestal para proponer estrategias comunitarias de reforestación y protección de las nacientes de aguas para restaurar sistemas ecológicos degradados. Entre las herramientas utilizadas por el equipo investigativo se encuentran (1) los transectos o caminatas de campo, empleando tecnología GPS; (2) Cartografías participativas, entrevistas en profundidad e historias de vida; (3) Mapas de usos de suelo y biografías de cultivo, usando tecnología SIG (software QGIS).

En la **fase 2: Laboratorio**, se empleó una sistematización desde de las experiencias participativas, entendiéndolas como procesos complejos en los que intervienen diferentes actores, en un contexto económico-social determinado y en un momento institucional del cual forman parte.

Para ello se llevó a cabo la (4) Construcción de mapa base, recurriendo a archivos vectoriales disponibles en la IDE nacional (www.ide.cl), y a información construida en Openstreetmap. También se emplearon archivos ráster consistentes en imágenes satelitales Landsat obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), y datos SRTM (NASA) para la construcción de un modelo de elevación digital que permitiera (5) delimitar cuencas hidrográficas (software GRASS, comando rwatershed). La importancia que tiene conocer el componente de cuenca hidrográfica es fundamental, ya es un proceso de planificación que busca guiar el manejo integrado de recursos naturales de una cuenca, posibilitando “procesos de gestión ordenados, articulados e informados, conducentes a optimizar los impactos positivos de las intervenciones, desde el punto de vista social, económico y ambiental, todo ello en pos del bienestar presente y futuro de la sociedad” (PROT, 2011, p.20).

Finalmente, se aplicó (6) Evaluación multicriterio para priorizar restauración ecológica con bosque nativo (software QGIS, complemento EasyAHP).

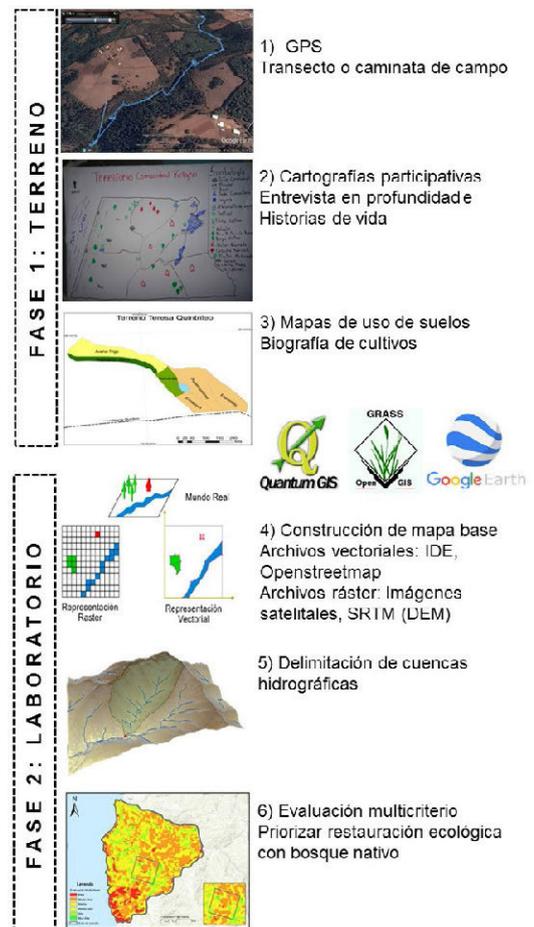


Figura. 1. Proceso metodológico.

III. RESULTADOS

Los resultados de la Fase 1: Terreno, se pueden observar en la Tabla I. En términos territoriales, un ejemplo de producción de información territorial se muestra en la Figura 2.

TABLA I
RESUMEN DE PRINCIPALES RESULTADOS DE LA FASE 1: TERRENO

ACTIVIDAD	RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD.
Transectos o Caminata de Campo.	<ul style="list-style-type: none"> Reconocimiento de la realidad a escala local, en un contexto rural. Identificación del uso actual de los recursos, además de la caracterización de los terrenos y la presencia de sitios de significancia cultural para los habitantes de cada sector. Reconocimiento de vegetación nativa.
Cartografías participativas.	<ul style="list-style-type: none"> Descripción y análisis de los componentes ambientales del entorno inmediato de cada una de las comunidades. Identificación de actividades económicas, predios, plantaciones forestales, agrícolas, esteros, nacientes de agua. Visualización de las problemáticas y oportunidades de cada sector.
Entrevista en Profundidad e Historia de vida.	<ul style="list-style-type: none"> Identificación de puntos comunes entre actores relevantes para la comunidad, principalmente para quienes desempeñan funciones en beneficio de la comunidad, además del reconocimiento de hechos trascendentales en la vida de los participantes. Cruce de información territorial y las necesidades comunitarias
Mapas de usos de suelo y biografías de cultivos.	<ul style="list-style-type: none"> Conocer el historial de cultivos en la comunidad, en el sentido de las variedades tradicionales que se han ido usando, y la introducción de otras variedades. Permite entender mucho acerca de los cambios, y la toma de decisión de los agricultores.

Comunidad Kellgko
Localidad de San Ramón

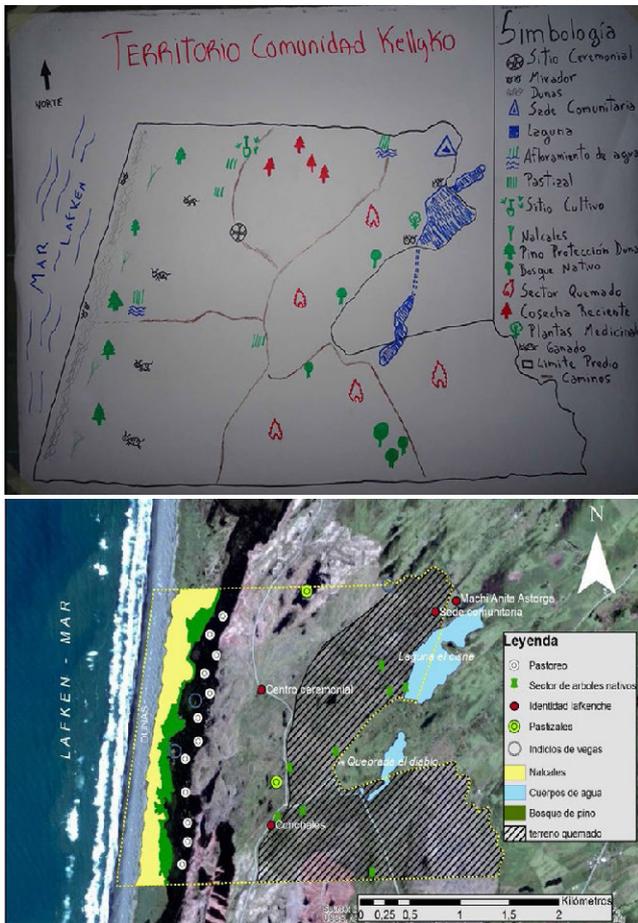


Figura 2. Ejemplo de producción de información territorial.

Los resultados de la **Fase 2: Laboratorio**, se pueden consultar en las Tablas II y III. Especialmente, la información construida con el diagnóstico territorial participativo se puede observar en las figuras 3, 4, 5 y 6.

TABLA II
RESUMEN DE PRINCIPALES RESULTADOS DE LA FASE 2: LABORATORIO

ACTIVIDAD	RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD.
Construcción del mapa base	<ul style="list-style-type: none"> Proyecto SIG con las siguientes capas vectoriales: Áreas sensibles, caminos, clase de uso de suelo, erosión actual, erosión potencial, localidades pobladas, predios rurales, vegetación. Capas ráster: DEM, Pendiente, Imágenes satelitales Landsat años 1975, 1979, 1986, 1987, 1998, 2000, 2002, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2016
Delimitación de cuencas hidrográficas	<ul style="list-style-type: none"> Individualización de cuencas de primer, segundo y tercer orden abastecedoras de agua y cobertura de bosque nativo. Identificación de drenes hídricos, pozos y tranques de captación, junto con elementos significativos del uso de la cuenca.
Evaluación Multicriterio	<ul style="list-style-type: none"> Diseño de un modelo priorizar las áreas a restaurar con bosque nativo. Utilización de variables uso de suelo, erosión actual, erosión potencial, pendiente, distancia a drenes. Definición de propuestas de intervención.

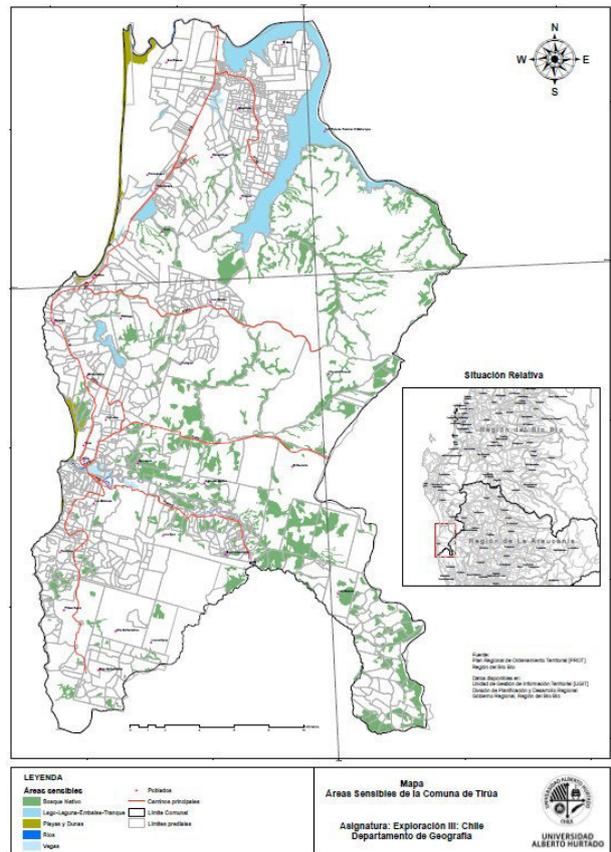


Figura 3. Mapa Áreas Sensibles.

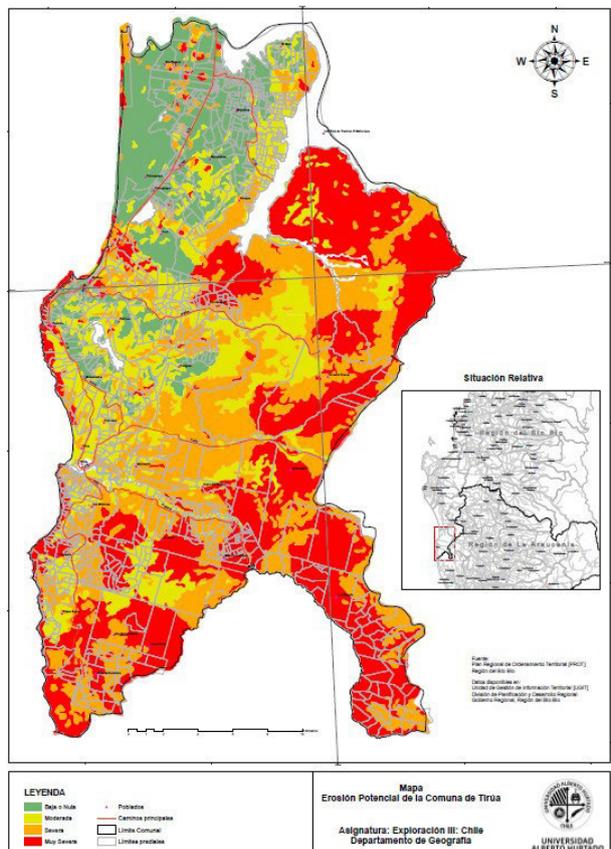


Figura 4. Erosión potencial.

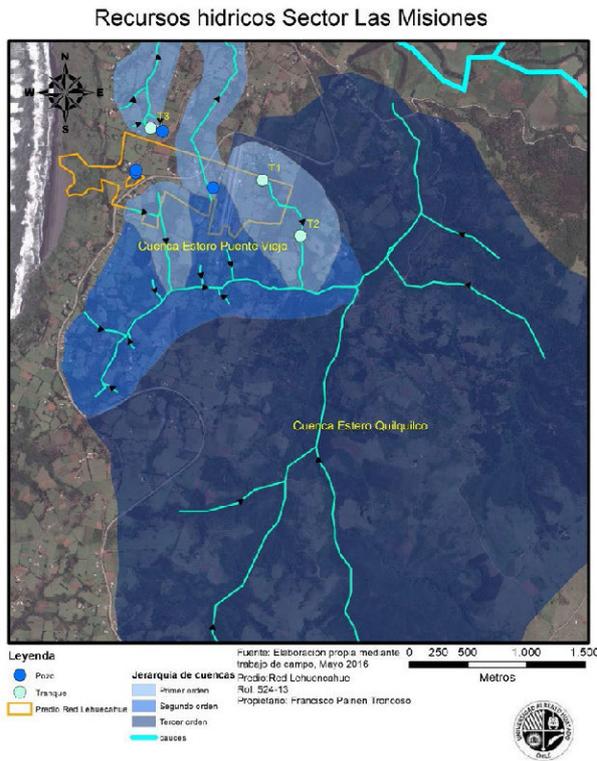


Figura 5. Ejemplo de delimitación de cuenca hidrográfica.

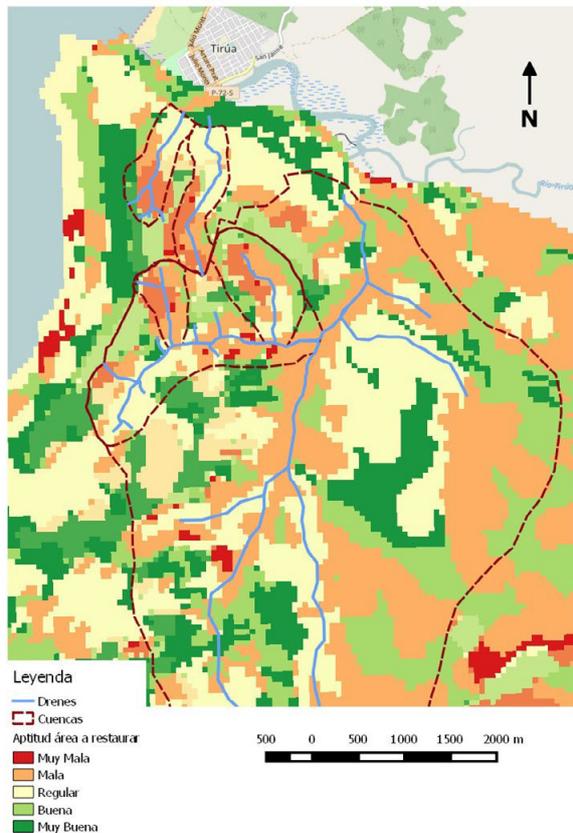


Figura 6. Ejemplo de aptitud territorial para restaurar cuencas hidrográficas con bosque nativo.

TABLA III
RESUMEN DE PROPUESTAS DE INTERVENCIÓN

ACTIVIDAD	RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD.
Cercado del dren	<ul style="list-style-type: none"> • Instalación y/o mejoramiento del cercado existente en los alrededores del dren para evitar la intervención de los animales que pastorean en el lugar y de esta forma evitar la alteración tanto del curso hídrico como del suelo continuo a este.
Eliminación de plantaciones introducidas a 50 metros del dren a intervenir	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación efectiva de plantaciones de eucaliptus y pino en las cercanías de la zona que se intervendrá para evitar pérdida de agua por estas especies
Plantación de especies nativas	<ul style="list-style-type: none"> • Plantación de especies nativas de acuerdo a las necesidades o importancia que la comunidad tengan sobre estas

IV. CONCLUSIONES

Se advierte la necesidad urgente de reforestar en espacios que presentan altos niveles de erosión, con especies nativas, que sirvan para recuperar suelos. Se reconoce la preocupación por mantener un uso sustentable en el tiempo del bosque nativo de manera de contribuir al equilibrio del territorio desde un enfoque ecosistémico e intercultural. Se construye un diagnóstico en que los saberes de la comunidad son la base fundamental para la construcción de información territorial.

Los intereses y necesidades de las comunidades indígenas pueden ser espacializados con TIG. Cada comunidad propone una estrategia distinta para la resistencia al monocultivo forestal, lo que revela la importancia de la construcción e intervención social de abajo-arriba.

AGRADECIMIENTOS

Se deja expreso reconocimiento a la participación del equipo docente y estudiantes en torno a la asignatura Exploración III, de 5to año de la carrera de Geografía de la Universidad Alberto Hurtado.

Equipo docente: Dr. Manuel Fuenzalida Díaz (principal), Dr. Nicolás Rojas (Asociado), Msc© Felipe Salinas (Asociado) y Susana Huenul (I. Municipalidad de Tirúa)

Estudiantes: *Comunidad Kellgko en la localidad de San Ramón*: Lucas Alcayaga, Carlos Cavieres, Juan Fredes, Jorge Moscoso, Ricardo Pérez, Camilo Romero.

Comunidad Lorenzo Quintrileo en la localidad de Quidico: Angela Bernal, Javiera Bravo, Tomás Bravo, Sebastián Carrasco, José Fuentes, Ignacio Milic

Comunidad Milla Rayen en la localidad de Las Misiones: Héctor Cayún, Viviana Díaz, Esteban Espinoza, Francisca Flores, Nicolás Quezada

Comunidad Alto Primer Agua: Alexander Acosta, Miguel Castellani, Paulina Guerra, Anakena Orrego, Francisco Terraza, Daniela Sepúlveda.

REFERENCIAS

Agosto, P. y Briones, C. (2007). Luchas y resistencias mapuche por los bienes de la naturaleza. En OSAL (Buenos Aires: CLACSO) Año VIII, N° 22, septiembre.

Donoso, P., Romero, J., Reyes, R. y Mujica, R. (2015). Precedentes y efectos del neoliberalismo en el sector forestal chileno y transición hacia un nuevo modelo. En Pinol (Ed.) Democracia versus neoliberalismo. 25 años de neoliberalismo en Chile. LOM Ediciones.

FUCOA. Fundación de Comunicaciones, Capacitación y Cultura del Agro, . (2014). Mapuche. Serie introducción histórica y relatos de los pueblos originarios de Chile. Santiago.

Gonzales, M. (2015). ¿Agua para quién? Escasez hídrica y plantaciones forestales en la provincia de Arauco. Chile. Recuperado de <http://www.mapuexpress.org>

INE (2007). Censo agropecuario y forestal. Resultados por comuna. Chile. Recuperado de <http://historico.ine.cl>

Martínez, V. (2006). El enfoque comunitario. El desafío de incorporar a la comunidad en las intervenciones sociales. Santiago: Universidad de Chile.

Hasen, F. N. (2012). La noción de Kume mogñen en el pueblo mapuche: aproximaciones desde un enfoque ecosistémico. Kula. Antropólogos del Atlántico sur, 96-114.

Hasen, F. N. (2014). Desarrollo y BuenVivir desde un Enfoque Ecosistémico: La experiencia local de Lago Neltume, Chile. Sustentabilidades, 10, 1-23.

Pineda, E. (2012). Dominación y emancipación en el pueblo mapuche. El pensamiento de la Coordinadora Arauco Malleco. SubHistoria N°4, 43-71.

PLADECO. I. Municipalidad de Tirúa. (2009). Plan de desarrollo comunal. Tirúa. Región del Bio Bío

Programa Chile Sustentable. (2004). Impactos ambientales en Chile: Desafíos para la Sustentabilidad. LOM Ediciones.

PROT (2011). Plan Regional de Ordenamiento Territorial. Contenidos y procedimientos. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), Chile.

Rubilar, G. y Roldán, A. (2014). Áreas de Desarrollo Indígena: estudio de caso del ADI Puel Nahuelbuta, como estrategia de las políticas públicas en el mundo mapuche. Universum, vol.29, n.2, pp.253-276.

Impacto de los incendios forestales en las áreas protegidas de Costa Rica

Moraga Peralta Julio César

Escuela de Ciencias Geográficas/
Facultad de Ciencias de la Tierra y
el Mar/Universidad Nacional
Campus Omar Dengo/Heredia/Costa
Rica
julio.moraga.peralta@una.cr

RESUMEN

Los incendios forestales constituyen problemas que ocasiona grandes daños ambientales sobre los ecosistemas, uno de los mayores impactos en el ambiente son los efectos sobre el cambio climático, situación que acentúa los problemas globales que atentan la vida sobre el planeta. Notoriamente se reconoce que los incendios son un agente constante de cambios sobre los paisajes naturales y por tanto su estudio reviste importancia ya que afectan de una manera notable la vegetación, la fauna, el suelo y aumentan el peligro de desertificación, que ello conlleva a los problemas socioeconómicos.

Este artículo tiene por objetivo analizar el impacto de los incendios forestales en las áreas protegidas de Costa Rica, a partir de variables explicativas como la proximidad carreteras, tipos de usos de la tierra, focos de incendios, insolación y altitud sobre el nivel de mar, modeladas con técnicas de Evaluación Multicriterio (ECM) en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Dado que el concepto riesgo se refiere a una condición de probabilidad, en este artículo se recrea escenarios en donde podría tener lugar el fuego, los cuales se correlacionan con eventos que se han presentado en años anteriores. Se debe advertir que no considera la variable viento como factor dispersor del fuego, ya que el objetivo es determinar lugares con condición favorable a incendio sin mediar los factores que contribuyen en su distribución.

Palabras clave: **incendio forestal, problema ambiental, riesgo, sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio.**

ABSTRACT

Forest fires are a problem that causes environmental damages on the ecosystems. One of the biggest impacts in the atmosphere are the effects on the climatic change, situation that accentuates the global problems that attempt the life on the planet. Historically, fires are recognized as constant agent of changes on the natural landscapes. Therefore fires studies are important, in the way, how they affect the vegetation, the fauna, the soils and expand the dry conditions that tight link to poverty. This article aims to analyze the impact of forest fires on Costa Rica protected areas, based on explanatory variables such as proximity to roads, types of land uses, fire fires, sunshine and altitude above sea level, Modeled with

Multicriteria Evaluation (ECM) techniques in a Geographic Information System (GIS). Since the concept risk refers to a condition of probability, in this article model different scenarios where could carry out the fire, which are correlated with events that had been occurred in previous years. It should be noticed that it does not consider the variable wind as a propagate factor of the fire, since the objective is to determine places with adequate condition to fire without the factors that contribute in its distribution mediating.

Key words: *fire forest, environmental problem, risk, geographical information system and evaluation multicriterio.*

III. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales causan daños económicos, afectan el suelo, alteran los ciclos hidrológicos, provocan serios deterioros a los ecosistemas forestales y a la biodiversidad y aportan carbono a la atmósfera, contribuyendo en el calentamiento global de la tierra. Aunque en condiciones naturales los incendios forman parte del proceso dinámico de los ecosistemas. Ferreras, J. Estada. P. Herrero T. Martín M.A. (2001).

En Costa Rica, durante la época seca de cada año, se concentra la mayor cantidad de incendios forestales. Según la Comisión Nacional sobre Incendios Forestales, las principales causas de incendios obedecen a vandalismo, quema de pastos, quemas agropecuarias (para sembrar frijol, por ejemplo) y quema para promover la caza. (La Nación, 24 de enero de 2008).

No obstante, Villalobos (2000), basado en datos de la Comisión Nacional sobre Incendios Forestales, señala que el problema real se origina por el uso descontrolado del fuego para fines agrícolas y ganaderos. Advierte que existe dificultad para determinar las causas reales de la mayoría de los incendios forestales. No obstante, expertos señalan que estos se deben a la mala utilización del fuego en actividades agropecuarias, y en menor porcentaje, por prácticas de cazadores, venganzas y negligencias. Otras causas son debidas a altas temperaturas o tormentas eléctricas sobre materiales de fácil combustión, aunque estos ocurren de forma muy esporádica, sin embargo no dejan de ser una causa real de generación de incendios.

Las áreas protegidas han sido escenario de gran cantidad de incendios, por ello, es importante determinar su potencial a través de modelos probabilísticos según sus características geográficas analizadas con técnicas de ECM y SIG. Estos últimos constituyen un medio tecnológico que articula varias disciplinas con el fin de realizar análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización, distribución, etc., de información geográfica. En el caso particular, a través de ellos se pueden desarrollar planes de prevención y vigilancia ante incendios forestales.

Se analizan los elementos y factores geográficos que configuran en territorio costarricense, lo cual permite diagnosticar la incidencia y la problemática de incendios forestales, posteriormente se explican los conceptos teóricos y metodológicos, se analizan los resultados y por último se discute el impacto sobre los ecosistemas.

IV. MÉTODO

A continuación se explica el modelo metodológico para abordar el problema, el mismo parte del reconocimiento de cinco variables explicativas tales como: proximidad a las carreteras, altitud sobre el nivel del mar, la insolación, focos de incendios y uso de la tierra. La base metodológica se derivó del modelo presentado por Ordoñez y Martínez (2003). La información cartográfica a priori la constituyen diferentes coberturas en formato vectorial, así como fotografías aéreas del año 2005

del proyecto Costa Rica Airborne Research and Technology Applications (CARTA) e imágenes de satélites Landsat y Aster de los años 2006 y 2008 respectivamente, las cuales son la base para generar las diferentes categorías de uso de la tierra.

La red de caminos fue obtenida del mapa base de Costa Rica del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y se complementó con la digitalización de vías a partir de la interpretación de fotografías aéreas, la resultante fue transformada en una cobertura de distancias a vías. También se contó con la cobertura de curvas de nivel con equidistancias cada 20 metros del IGN. En ellas los valores de altitud se presentan de manera discreta por lo que fue necesario realizar procesos de interpolación para generar un modelo digital de elevaciones sobre el nivel del mar. A partir del modelo digital de elevaciones, se deriva la orientación de las laderas la cual es utilizada para analizar la insolación, esta es combinada el registro de horas sol recibida obtenido del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica. En la tabla 1 se muestra la forma en que se reclasifica la orientación y las horas sol.

TABLA 1
Clasificación de orientación de la ladera vrs horas sol.

ÁNGULO	ORIENTACIÓN	HORAS SOL	VALOR
-1	Zonas planas	6	5
0° - 23°	Norte	4	1
23° - 68°	Noreste	4	2
68° - 113°	Este	7	3
113° - 158°	Sureste	5	4
158° - 203°	Sur	7	8
203° - 248°	Suroeste	5	4
248° - 293°	Oeste	7	3
293° - 338°	Noroeste	4	2
338° - 360°	Norte	4	1

Fuente: Adaptado de Ordoñez Celestino y Martínez Alegría Roberto (2003)

Se contó con información referente a puntos de calor a través de Alertas Globales de Incendios de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y MODIS Rapid Response - Global Fire Information Management System (GFIMS). Recuperado de <http://maps.geog.umd.edu/firms/> el mismo se complementó con un registro de focos de incendios en formato vectorial del MINAE. El mismo tenía observaciones desde 1 a 13 años. Para el caso de estudio se consideró incluir en el análisis aquellos focos superiores a cuatro años, con el fin de asegurar la certeza en cuanto a la presencia de un evento.

A partir de las imágenes Landsat y Aster se obtuvo la cobertura de uso de la tierra mediante el método de clasificación supervisada, las categorías obtenidas constituyen la base para analizar sobre qué tipo de usos tienen mayor incidencia los incendios.

Definidas las variables explicativas se construye un modelo matemático que relacione las variables independientes o explicativas con una variable dependiente, para ello se realiza una regresión logística múltiple, la cual considera como de-

pendiente una variable dicotómica, que será la presencia o no de focos de incendios. Además se incorporan las variables explicativas las cuales pueden ser de cualquier tipo, en este caso tenemos tres cuantitativas (elevaciones, insolación y distancia a carreteras) y una nominal (usos de la tierra).

Mediante una regresión logística multivariante expresada en la ecuación 1, se determina la probabilidad de que se origine un incendio en un punto cualquiera de Costa Rica y establece que la variable dependiente sea igual a 1.

Ecuación 1. Regresión logística.

$$P(Y = 1) = \frac{\exp(\sum \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_3 X_3)}{1 + \exp(\sum \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_3 X_3)}$$

Siendo Y la variable dependiente y X_i las variables independientes y α y β números reales.

El modelo de regresión logística asume que se cumpla una hipótesis básica en donde P sigue una curva logística, para una única variable independiente X.

La probabilidad de incendio se expresa mediante la ecuación 2.

Ecuación 2. Determinación del mapa de probabilidad

$$\text{logit}(Y) = \ln \frac{P}{1-P} = \alpha + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \Rightarrow P = \frac{e^{\text{logit}(Y)}}{1 + e^{\text{logit}(Y)}}$$

Para obtener el riesgo final se reclasificó el mapa de probabilidad de acuerdo a la tabla 2.

TABLA 2

Categorías de riesgo ante incendios según probabilidad

PROBABILIDAD	RIESGO	CATEGORÍA
0 - 0,000001	1	Nulo
0,000001 - 0,25	2	Bajo
0,25 - 0,50	3	Medio
0,50 - 0,75	4	Alto
0,75 - 1	5	Muy alto

Fuente: Adaptado de Ordoñez, 2003.

A continuación se presentan los resultados obtenidos según el modelo explicado en el marco metodológico.

V. RESULTADOS

5.1 DISTANCIA A CARRETERAS

En Costa Rica, los medios de comunicación y el transporte han marcado un acelerado desarrollo en obras de infraestructura pública y privada tales como, la red vial para el transporte de personas y de mercancías. Históricamente el territorio costarricense gira alrededor de tres vectores; la existencia de rutas y caminos desde tiempos precolombinos y la carretera interamericana que conecta de manera eficiente el territorio nacional. Desde esta perspectiva, la cobertura de carreteras constituye un tema de líneas el cual ocupa prácticamente todo el territorio, presentando una menor densidad en las áreas protegidas, las cuales son consideradas un factor de riesgo de incendios ya que se asocian al tránsito de fumadores.

El análisis de distancias se derivó de la transformación del vector de red vial a raster y consistió en asignar a cada celda la distancia de la entidad más cercana del conjunto de celdas analizadas, esto se logró mediante la ayuda de un SIG. En la figura 1 se muestra que las mayores distancias a partir del centro de celda se localizan en las áreas con menor densidad de caminos, las cuales coinciden con los espacios de protección en donde no existe gran cantidad de vías de acceso.

Al compararlas junto a la cobertura de focos de incendios se determina que las carreteras constituyen una variable que aportan de forma decisiva en la ocurrencia de incendios, ya que algunos de los focos registrados muestran una estrecha relación con estas.

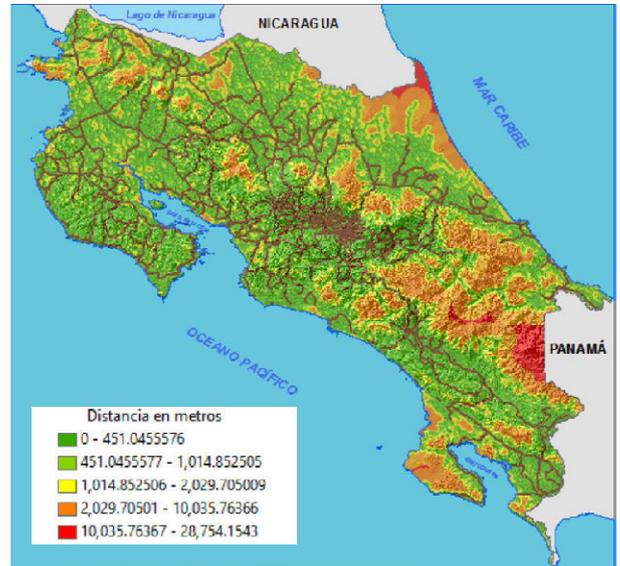


Figura 1: Costa Rica - Distancia Vías

5.2 ELEVACIONES

Las elevaciones se determinaron a partir de la interpolación de valores de altitud del mapa base de Costa Rica del IGN a escala 1:50.000, con la ayuda de SIG se realizó un proceso matemático que permitió predecir el valor de altitud transformando un número finito de observaciones en espacio de superficie continua, con ello se obtuvo un modelo digital de elevaciones (MDE). Las altitudes del territorio nacional van desde el nivel de mar hasta los 3818 msnm.

En la figura 2 se muestra en color verde considerable extensiones de tierras bajas, situación que determina su influencia directa en el comportamiento de las condiciones de temperatura, favoreciendo un calentamiento de la superficie por la acción del sol, lo que repercute directamente en el desarrollo de incendios.

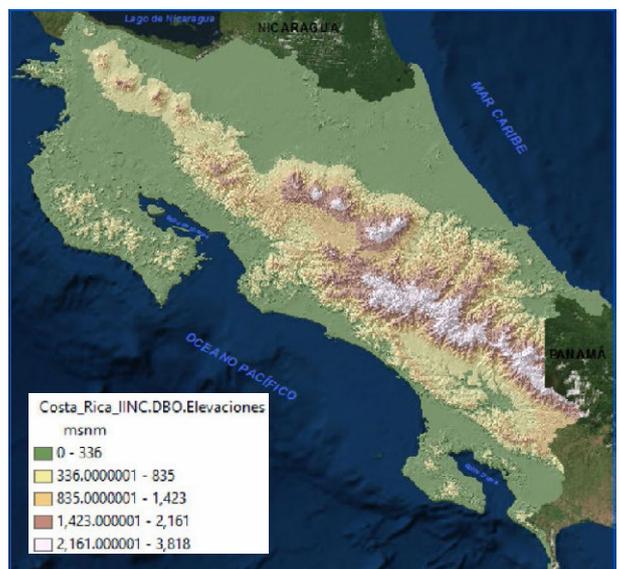


Figura 2: Costa Rica - Elevaciones

5.3 INSOLACIÓN

A partir del MDE se derivó la orientación de las laderas, es decir, la exposición o dirección de la pendiente definida por una celda y sus ocho vecinos circundantes. La interpretación de este dato permitió establecer áreas en donde se pueda originar un incendio en un punto determinado.

Es evidente que las áreas con orientación hacia el sur son las que están más expuestas al sol, no obstante para afianzar este criterio se correlacionó la orientación con los datos de brillo solar, y se estimó la cantidad de horas sol que reciben ciertas áreas en función a la dirección de la ladera. Lo anterior permitió determinar que las laderas orientadas al norte, noreste y noroeste reciben 4 horas sol, las orientadas al este y oeste, así como sureste y suroeste reciben hasta 5 horas sol, mientras que las zonas planas reciben 6 horas sol y las laderas orientadas a sur reciben hasta 7 horas diarias de energía solar, siendo la mayor cantidad recibida en nuestro país.

Con esto se determinó que la radiación solar es un factor que influye sobre estas áreas a lo largo del tiempo y por ende favorece el desarrollo de incendios forestales.

En la figura 3 se observa que debido a las características geomorfológicas algunas áreas reciben hasta siete horas de sol al día, sin embargo las áreas que tiene mayor dominio son las que reciben hasta seis horas sol, su espacio es ocupado por las llanuras presentes en el territorio nacional, en muchos casos estas áreas son dedicadas a las actividades agrícolas y pecuarias. El patrón de uso conjugado con la cantidad de horas sol por unidad de superficie constituye un factor determinante en el disparo de incendios.



Figura 3: Costa Rica - Horas Sol

5.4 FOCOS DE INCENDIOS

A partir del registro histórico suministrado por MINAE, además de los datos recopilados de puntos de calor se logró determinar la presencia de 681 focos de incendios algunos de los cuales se alinean cerca de las carreteras, mientras que otros se conjugan con las particularidades del uso de la tierra. La importancia de esta cobertura para el estudio es la condición temporal con que ocurren las quemaduras en Costa Rica, se constata que muchos de ellos tienen un periodo de retorno anual,

principalmente durante la época seca de diciembre a abril de cada año.

Durante esta época la temperatura se incrementa unido a ellos existen ciertas prácticas agrícolas que requieren procesos de quema como por ejemplo, la caña de azúcar que es incinerada para su posterior cosecha, por lo tanto algunos de los focos de incendios observados tienen su origen en estas áreas. En la figura 4 se muestra la distribución geográfica de los puntos de ignición, concentrados en su mayoría en el sector noroeste de nuestro país, área geográfica que cubre la provincia de Guanacaste.

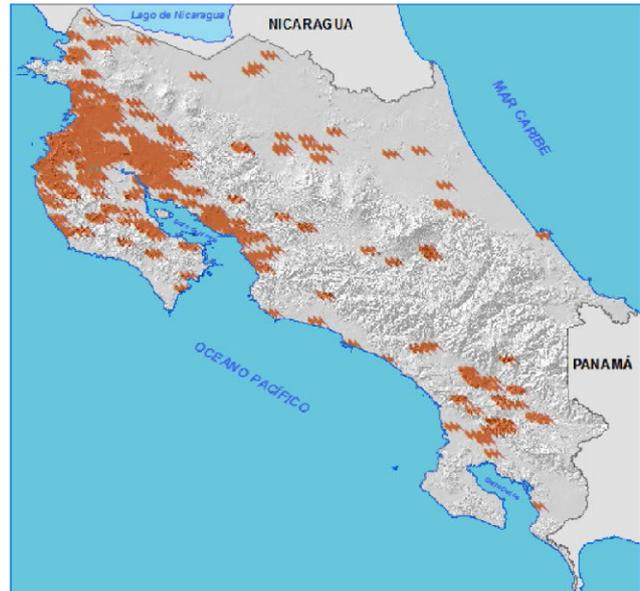


Figura 4: Costa Rica - Focos de Incendios

5.5 USOS DE LA TIERRA

A partir de las imágenes de satélite Landsat y Aster se determinaron 16 categorías de uso de la tierra, siendo la categoría de pastos y pastos con árboles las que presentan mayor dominio en la presencia de incendios.

El uso de la tierra constituye una variable de vital importancia para la determinación de las áreas con riesgo de incendios, para ello se analizó la relación existente entre los diferentes usos y la presencia de focos de incendio. Esto se logró mediante una tabulación cruzada, en donde se determinó que los usos que tienen mayor incidencia a las quemaduras son los pastos, ya que de los 36 focos de incendios registrados al menos 23 tienen su origen en estas áreas, seguidos del charral y tacotal con 18 focos y 16 en la categoría de bosque secundario, por este motivo y dado que una gran extensión del territorio nacional tiene este tipo de uso centraremos el estudio en ellos. En la figura 5 se muestra el resultado obtenido mediante SIG, la categoría seis corresponde a pastos y es sobre esta en donde se da la mayor propensión de los incendios.

Cross-tabulation of focos_incendios (columns) against uso_tierra (rows)			
	0	1	Total
0	3830415	0	3830415
1	656910	5	656915 Bosque primario
2	985604	16	985620 Bosque secundario
3	96821	2	96823 Manglar
4	1009055	18	1009073 Charral y tacotal
5	4151	1	4152 Plantación forestal
6	1693574	23	1693597 Pastos
7	11989	0	11989
8	393255	10	393265 Caña
9	630	0	630
10	176979	6	176985 Arroz
11	3745	0	3745
12	54	0	54
13	277965	7	277972 Terreno descubierto
14	53014	0	53014
15	4288	0	4288
16	3860	0	3860
17	41990	0	41990
18	8775	0	8775

Figura 5: Tabulación cruzada de focos de incendios versus usos de la tierra.

Fuente: Elaboración propia a partir de la cobertura de uso de la tierra vs focos de incendios.

En la figura 6 se muestra la distribución espacial de las diferentes categorías de uso, se evidencia que la categoría de pastos y pastos con árboles tienen gran representatividad espacial, por lo tanto fueron agrupadas para realizar el análisis.

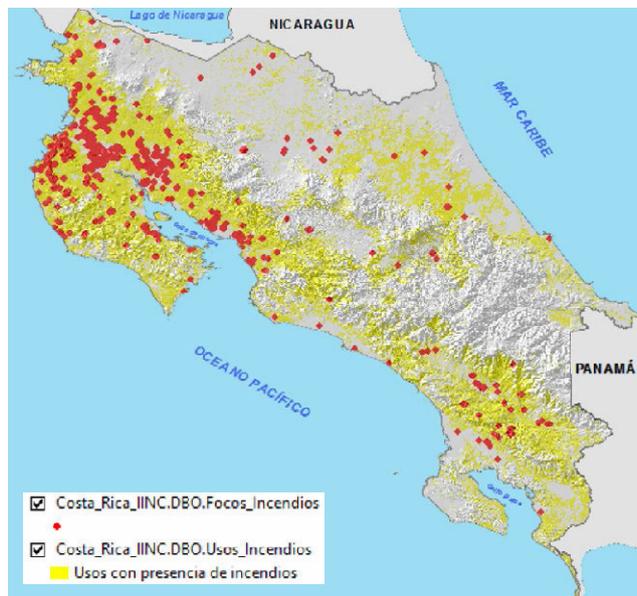


Figura 6: Costa Rica - Distribución espacial del uso de pastos

5.6 PROBABILIDAD DEL RIESGO A INCENDIOS

Los incendios forestales constituyen una de las principales amenazas en el territorio nacional estos se conjugan con las características físicas geográficas y la presión humana motivada por las actividades agropecuarias. A partir de las variables analizadas se obtuvo los coeficientes del modelo de regresión logística y se estableció la probabilidad de la variable dependiente. En dicho modelo se asume una hipótesis básica en donde la probabilidad sigue una curva logística o en forma de S, la cual es una función matemática que se utiliza para modelar la propagación de los incendios forestales.

El modelo de regresión logística fue introducido en un SIG, para ello la variable dependiente se transformó a dicotómica, es decir, la matriz de datos raster asumió valores entre 0 y 1, en donde 1 se refiere a los casos de igniciones observadas y 0 para puntos aleatorios en donde no se ha presentado incendios, por esta razón fue necesario construir una cobertura de puntos distribuidos aleatoriamente con valores de 0 y se unió a la cobertura de focos de incendios, la resultante constituyó

la capa muestra para el modelo de regresión. Es importante advertir que para obtener buenos resultados en la regresión logística la capa muestra debe estar equilibrada, es decir, debe haber un número semejante con valores de 1 y 0.

Los coeficientes obtenidos de la ecuación de regresión se expresan a continuación.

$$\text{logit}(\text{focos_incendios}) = -0.9821 - 0.000259*d_vias + 0.198545*insolación - 0.004594*mde - 1.068334*pastos$$

En donde:

d_vías = Distancia a carreteras (-0.00025926)

Insolación = Orientación de la ladera con horas sol (0.19854472)

mde = Modelo digital de elevaciones (-0.00459415)

pastos = Categoría derivada del mapa de usos de la tierra. (-1.06833377)

El resultado de la regresión indica que la variable insolación tendrá mayor importancia en la solución final. Partiendo de dichos coeficientes se obtuvo la probabilidad de ocurrencia de un incendio, la misma asume valores que van desde 0,002229562 a 0,736122549, tal y como se muestra en la figura 7, en donde la mayor probabilidad se da en las áreas planas, situación que puede explicarse por la influencia de la insolación unido a los factores antrópicos resultante de las actividades agropecuarias, mientras que la probabilidad se reduce conforme se aumenta en altitud sobre el nivel medio del mar. Esta situación tiene estrecha relación con la acción de los elementos climáticos, siendo el mayor contenido de humedad en las partes altas de la cordillera que cruza el territorio de noroeste a sureste en donde existe una menor intensificación de las actividades humanas.



Figura 7: Costa Rica - Probabilidad de incendios forestales

Con el anterior índice de probabilidad se reclasificó el riesgo ante incendios de acuerdo a lo establecido en la cuadro tabla 2, particularizado para cada espacio de protección, de esta manera se obtuvo cuatro indicadores de riesgo los cuales cualitativamente va desde bajo a muy alto, como se puede apreciar en la figura 8.

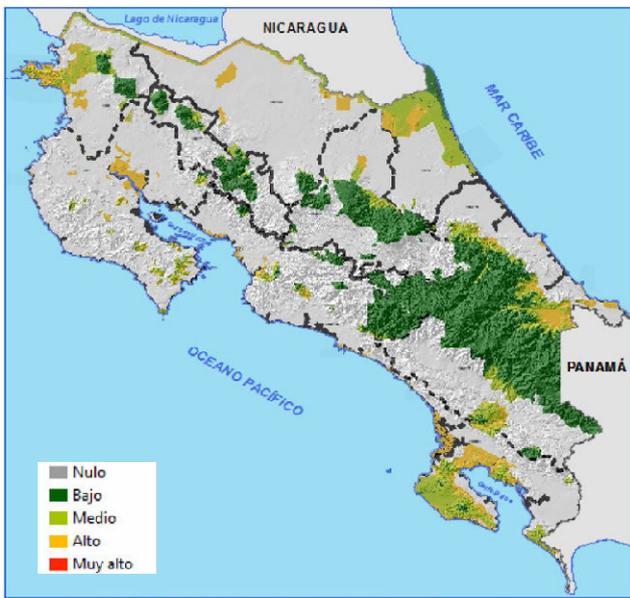
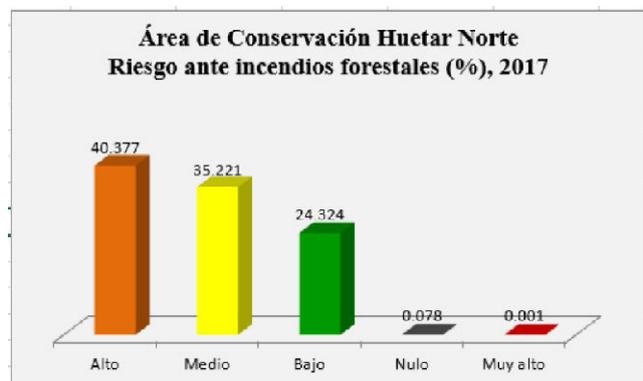
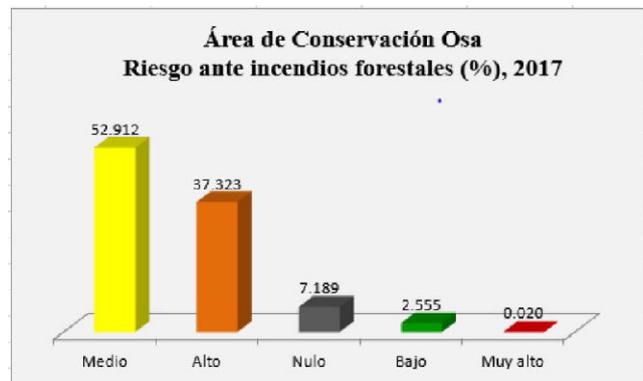
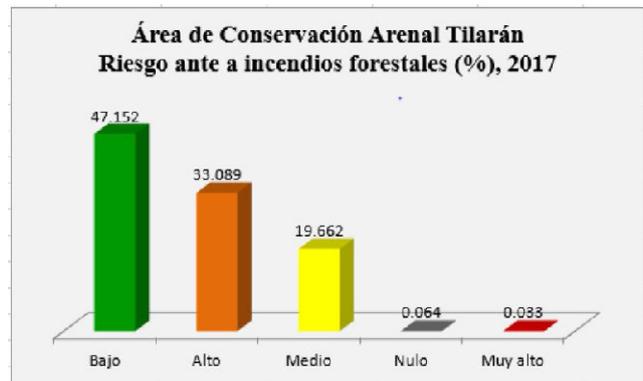
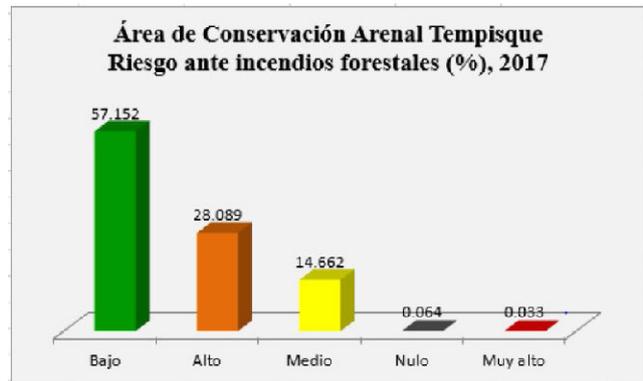


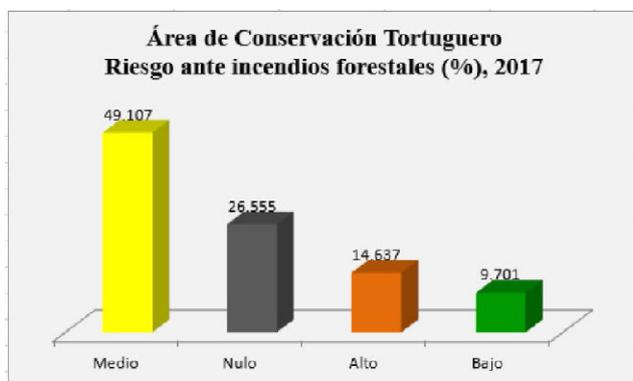
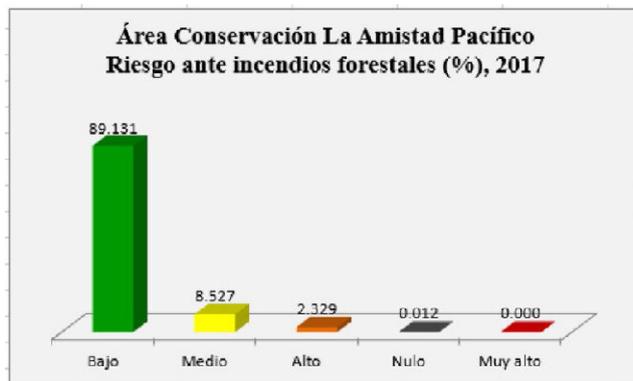
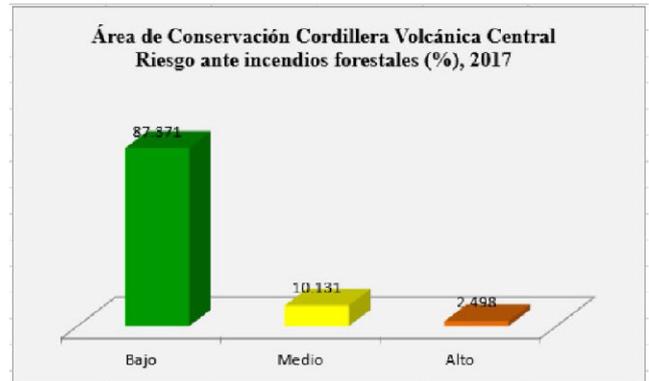
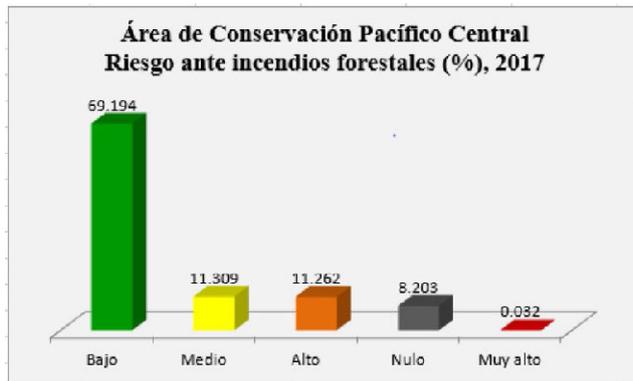
Figura 8: Costa Rica – Riesgo ante incendios forestales en espacios protegidos

El riesgo fue caracterizado para las diez áreas de conservación existentes en Costa Rica:

1. Área de Conservación Guanacaste
2. Área de Conservación Arenal - Tempisque
3. Área de Conservación Arenal - Tilarán
4. Área de Conservación Osa
5. Área de Conservación Huetar Norte
6. Área de Conservación Pacífico Central
7. Área de Conservación La Amistad Pacífico
8. Área de Conservación La Amistad Caribe
9. Área de Conservación Tortuguero
10. Área de Conservación Cordillera Volcánica Central.

En las siguientes gráficas se muestran las categorías de riesgo ante incendios forestales en porcentaje según área de conservación.





En las anteriores gráficas puede observarse siete de las áreas de conservación presentan condiciones de riesgo considerable, principalmente las ubicadas en la vertiente del pacífico, se exceptúan las áreas de conservación Huetar Norte, Tortuguero y la Amistad Caribe, estas dos últimas ubicadas en la vertiente del caribe costarricense que también presentan un inminente riesgo ante incendios forestales.

Es importante resaltar que los espacios protegidos de Costa Rica, están amenazados por incendios forestales, ello significa que muchas especies de flora y fauna son vulnerables a este tipo de fenómenos, por lo que se requiere tener mayor control en los procesos de mitigación y atención de estos eventos.

VI. CONCLUSIONES

Se reconoce que existen impactos ambientales en los ecosistemas del medio físico, biológico y humano, así como en los aspectos socioeconómicos que justifican la supresión, prevención, detección y combate de incendios descontrolados, ya que desde el punto de vista económico y ecológico Costa Rica posee un valor económico muy alto en cuanto a especies de flora y fauna se refiere.

A pesar de que el impacto apreciable después de un incendio son las pérdidas de calidad paisajística por la desaparición de la cubierta vegetal, el daño va más allá ya que sus consecuencias superan el ámbito local del terreno quemado ya que los efectos impactan en aspectos sociales, económicos y ambientales, lo cual conlleva al deterioro y la pérdida de los recursos naturales, así como a la contaminación del aire y agua, degradación y erosión de los suelos, algunas pérdidas económicas y destrucción de infraestructura. También pueden provocar problemas de salud a las personas que se ubican en zonas aledañas al incendio.

Los incendios forestales representan parte de los problemas que enfrentan las áreas protegidas de Costa Rica, en ocasiones son producidos por actividades humanas de manera involuntaria o en forma premeditada; a veces como resultado de un problema de desigualdad social, carencia de tenencia de la tierra, falta de una cultura de uso adecuado del fuego o bien, falta de información o desconocimiento de cómo administrar y tratar las quemas en las tierras de usos agropecuarios.

La planificación para la protección contra los incendios y su manejo debe realizarse de manera integral y cooperativa por lo tanto urge a nivel nacional un documento que advierta el riesgo potencial ante incendios de nuestro país. Este debe estar fundamentado en mapas que muestren espacialmente la distribución de la problemática.

Se debe elaborar mapas con recursos humanos, zonas forestales, actualización de las vías de comunicación terrestre, estas últimas con el fin de conocer las diferentes rutas de acceso en caso de detección de un foco de incendio.

En el país las especies la flora amenazada son resilientes pero el lapso esperado para ello supera el cuarto de siglo, situación que vuelve altamente frágil la permanencia de los ecosistemas.

El modelo utilizado presenta buenos resultados ya que existe una relación directa de incendios con las diferentes categorías de riesgo establecidas.

Se recomienda su uso siempre y cuando exista la información disponible para poder modelar los datos según lo establecido en la metodología.

Las técnicas de teledetección constituye una herramienta poderosa y confiable para llevar a cabo procesos de validación y contextualizar el desempeño del modelaje de los datos, además facilita el monitoreo de los espacio protegidos.

La correspondencia entre las áreas incineradas y el riesgo de incendio asociado permitirá profundizar el estudio de esta herramienta para su puesta en funcionamiento de manera operativa dentro de un SIG.

La problemática de los incendios forestales debe abordarse desde la prevención, enfatizando en la motivación de los pobladores y su actitud negligente y/o irresponsable con los recursos naturales y por ende con el ambiente.

La sinergia de actores debe orientar esfuerzos en educación para el conocimiento de los recursos naturales y cómo protegerlos, además de incluir campañas de difusión que incentiven a la utilización de prácticas alternativas a las quemadas para la eliminación de desechos vegetales.

Esta investigación constituye un insumo básico para orientar prácticas en materia de prevención de manera que se busque garantizar la estabilidad biogeográfica del país.

REFERENCIAS

- Alpizar, E., Bolaños, R., Bravo, J., Canessa, G. & J. Echeverría (1998) Plan de Acción para la Cuenca del Río Tempisque. Zonas de Vida, Biodiversidad, Áreas Protegidas y Humedales. Volumen II. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.
- Bosque Sendra Joaquín, Díaz Castillo Concepción & Díaz Muñoz María Ángeles. (2002). De la justicia espacial a la justicia ambiental en la política de localización de instalaciones para la gestión de residuos en la comunidad de Madrid. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. Recuperado de <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo2/archivos/jusespam.pdf>
- Castillo Miguel, Pedrera Patricio, Eduardo Peña (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA. VOL. XIX / N°s 3 y 4 / 2003. Recuperado de http://www.cipma.cl/RAD/2003/3-4_Castillo.pdf
- Echeverría, A., Echeverría, J. & A. Mata (1998) Plan de Acción para la Cuenca del Río Tempisque. Antecedentes del Estudio y Resumen Ejecutivo. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.
- Galdames Ortiz Domingo Vicente (2000). Desarrollo de un marco conceptual para proponer un sistema de gestión ambiental municipal en la Comuna de Melipilla. Universidad de Santiago de Chile. Recuperado de <http://www.fortunecity.es/expertos/creativo/129/>
- Gómez Delgado Montserrat & Barredo Cano José Ignacio, (2004). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Editorial RAMA, Madrid, España.
- Ferreras, J. Estada. P. Herrero T. & Martín M.A. (2001). Los incendios forestales. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. Recuperado de <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=379>
- Lizano, O.G. (1998) "Dinámica de las aguas en la parte interna del Golfo de Nicoya ante altas descargas del Río Tempisque." Revista de Biología Tropical, vol. 46. Supl. 6: 11-20.
- Loaiza N. Vanessa. La Nación, (24 /01/ 2008). Incendios forestales provocados arrasaron 32.000 hectáreas. San José, Costa Rica. Recuperado de http://www.nacion.com/ln_ee/2008/enero/24/pais1396413.html
- Mascaraque Sillero Álvaro (2003). Índices de causalidad y riesgo de incendios aplicados a los espacios naturales protegidos de la comunidad de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de http://oa.upm.es/911/1/PFC_Riesgos_Incendios_Forestales.pdf
- Maskrey Andrew (1993). Los desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Colombia.
- Mateo Vega Javier, (2001). Características generales de la cuenca del Río Tempisque, p. 32-72. En: Jiménez, J.A. y E. González (editores). La cuenca del río Tempisque. Perspectivas para un manejo integrado. Organización para Estudios Tropicales, San José, Costa Rica.
- Ordoñez Celestino & Martínez Alegría Roberto. (2003) Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de los riesgos naturales y problemas medioambientales. Editorial ALFA OMEGA. México.
- R. Viqueira José R., Álvarez Pedro, Varela José & Saco Pedro J.(2003). Architecture of a Natural Disasters Management Framework and its Application to Risk Assessment. Instituto de Investigaciones Tecnológicas. University of Santiago de Compostela, y el Centro Politécnico Superior. University of Zaragoza. España. Recuperado de http://plone.itc.nl/agile_old/Conference/estoril/papers/65_Jose%20Viqueira.pdf
- Ramos Rodríguez Marcos Pedro, González Menzonet Yudisnelvis. (2003) Definición de la época de incendios forestales en un contexto multivariado. Recuperado de <http://www.floresta.ufpr.br/firelab/artigos/artigo354.pdf>
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación del Ministerio de Ambiente y Energía (2006). Estrategia Nacional de Manejo del Fuego de Costa Rica: 2006 - 2010. Tercera edición, San José, Costa Rica. Recuperado de http://documentacion.sirefor.go.cr/archivo/incendios/emf_2006.pdf
- Villalobos Flores Roberto, Retana José A., & Acuña Anselmo. (2000) El Niño y los Incendios Forestales en Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. Gestión de Desarrollo. Recuperado de http://www.imn.ac.cr/publicaciones/estudios/Nino_incendios_forestales.pdf

Análisis y simulación espacio temporal de la dinámica de las zonas agrícolas mediante Sistemas de Información Geográfica

Plata Rocha Wenseslao¹, Corrales Barraza Gabriela²

¹ Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio/Universidad Autónoma de Sinaloa
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios Ciudad Universitaria Culiacán/Sinaloa/México
wenses@uas.edu.mx

² Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio/Universidad Autónoma de Sinaloa
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios Ciudad Universitaria Culiacán/Sinaloa/México
ga5bi.corrales@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis y simulación espacio-temporal de la agricultura en el Valle de Culiacán, Sinaloa, México, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). El estado de Sinaloa tiene el primer lugar en producción alimentaria del país, de hecho, la Ciudad capital, Culiacán, se asienta en uno de los valles agrícolas más prolíficos del territorio nacional, abarcando principalmente los municipios de Culiacán y Navolato. Las zonas agrícolas en estos municipios constituyen el 52.6% de la superficie, casi 450,000 hectáreas de cultivo, de las cuales, el 34.3% es agricultura de riego y el 18.3% restante es agricultura de temporal. Para llevar a cabo el estudio se utilizan los mapas de usos de suelo y vegetación de 1993 y 2011, y con base en estos se proponen 2 escenarios de simulación (tendencia y sostenibilidad) al 2030. El resultado obtenido muestra que la mayor dinámica se da en la agricultura de temporal y en la agricultura de riego. De esta manera se generó el escenario de tendencia, donde las transiciones más significativas se dan de selvas hacia la agricultura de temporal y hacia la agricultura de riego y humedad; y de ambas agriculturas a los asentamientos humanos. Mientras que en el escenario de sostenibilidad, la principal transición se presenta de agricultura de temporal hacia las selvas, seguida en menor cantidad, por la de agricultura de temporal a pastizales.

Dichos escenarios son de gran utilidad en la gestión, planeación y prospección del territorio, integrando una visión participativa y adaptativa a las ordenanzas gubernamentales sobre las proyecciones de futuro de la región.

Palabras clave: **SIG, escenarios futuros, evaluación multicriterio.**

ABSTRACT

This paper presents a spatial-temporal analysis and simulation of agriculture in the Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico, using Geographic Information Systems (GIS). The state of Sinaloa has the first place in food production in the country, in fact, the capital city, Culiacán, is based in one of the most prolific agricultural valleys of the national territory, mainly covering the municipalities of Culiacan and Navolato. The agricultural areas in these municipalities constitute 52.6% of the area, almost 450,000 hectares of cultivation, of which 34.3% is irrigated agriculture and the remaining 18.3% is temporal agriculture.

In order to carry out the study, the maps of land use and vegetation of 1993 and 2011 are used, and based on these, are proposed two scenarios of simulation (trend and sustainability) by 2030. The results obtained shows that the greatest dynamics occurs in temporal agriculture and in irrigation agriculture. In this way, the trend scenario was generated, where the most significant transitions occur from rainforests to temporal agriculture and to irrigated agriculture and humidity; and from both agricultures to human settlements. While in the sustainability scenario, the main transition occurs from temporal agriculture to the rainforests, followed in less quantity, by the one of agriculture of temporary to grasslands. These scenarios are very useful in the management, planning and prospecting of the territory, integrating a participatory and adaptive vision to the governmental ordinances on the future projections of the region.

Keywords: GIS, future scenarios, multicriteria evaluation.

I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones principalmente debido a los cambios de cobertura y uso del suelo, los cuales, representan las consecuencias más claras de la intervención humana sobre el medio ambiente (Mustard, Defries, Fisher, Moran, & 2004, 2004). En este sentido, al análisis de los cambios, ayudan a explicar el alcance, la importancia y el efecto negativo que tiene dicha dinámica en el medio ambiente y su relación con las diversas actividades humanas, sobre todo las relacionadas con la antropización del territorio, la cual provoca la fragmentación y contaminación del paisaje, provocando daños irreversibles al medio ambiente y a la población.

De la misma forma, se señala en la literatura que no basta el monitoreo y análisis retrospectivo de los cambios de uso y cobertura de suelo, sino que es también necesario el análisis prospectivo a mediano y largo plazo (Henriquez, Azócar, & Romero, 2006; Mahesh Kumar & Garg Deepak, 2008). Una alternativa puede ser optar por la generación de diferentes escenarios de futuro, los cuales contribuyen, además, a tener un mejor entendimiento de los principales procesos de cambios de usos del suelo y ser utilizados como un sistema de alerta temprana que pone de manifiesto y subraya los efectos e impacto de los cambios futuros de usos del suelo que son prioritarios para un análisis en profundidad o de interés en la intervención política, económica, ambiental, social y cultural (Verburg, Kok, Pontius, & Veldkamp, 2006).

Al respecto, se puede decir que los modelos de simulación se presentan como un instrumento innovador, en los cuales es posible considerar las dinámicas actuales de la región y, a la vez, incluir la opinión consensuada de instituciones, ambientalistas, constructores, sociedad, investigadores, economistas, entre otros, permitiendo de este modo llevar a cabo un proceso de planificación del territorio más informado.

Dichos modelos ofrecen la posibilidad de integrar un conjunto de factores económicos, ambientales, sociales, entre otros, abarcando así los aspectos más representativos de las dinámicas territoriales.

Las posibilidades que se desprenden de lo anterior motivan que la aplicación de escenarios en planificación sea una línea o enfoque de actualidad científica, en el que se encuadran diversos proyectos de investigación en la materia, tanto de carácter nacional como internacional.

La aplicación de los escenarios para cuestiones medioambientales aparece a comienzos de la década de 1970 (Meadows, Meadows, Randers, & Behrens, 1972). Desde entonces los estudios de escenarios se han utilizado para analizar todo tipo de situaciones a distintas escalas, desde la sostenibilidad global hasta cuestiones ambientales muy específicas a escala regional. Los ejemplos más conocidos de estudios de

escenarios incluyen el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2000), el Global Environment Outlook (PNUMA, 2002) y la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (WRI, 2005). Estos estudios se han tomado como referencia por numerosas naciones y organizaciones mundiales, adaptando los escenarios a su escala de gestión.

Los objetivos de los estudios globales tienden a centrarse únicamente en producir escenarios, mientras que los estudios regionales, normalmente, se concentran en desarrollar herramientas que sirvan como apoyo en la toma de decisiones. Además, los escenarios globales tienden a responder cuánto uso del suelo cambiará, mientras que los escenarios regionales y locales tienden a responder también dónde tendrá lugar el cambio. Asimismo las simulaciones globales o continentales se llevan a cabo a largo plazo (normalmente tienen como horizonte futuro el año 2050 en adelante), mientras que los escenarios regionales y locales se realizan a corto plazo (la mayoría al 2020, 2030 o 2050).

Por su impacto en el ambiente, los escenarios asociados al cambio de uso de suelo y la evaluación de las políticas públicas han tomado relevancia en México desde la década de los 90. En las dos últimas décadas, se han realizado trabajos enfocados a establecer áreas de adecuación óptima para plantaciones agrícolas (Aguilar Rivera, Galindo Mendoza, Fortanelli Martínez, & Contreras Servin, 2010), para estudios de deforestación (Pineda Jaimes, 2010; Franco Prieto, 2010) y análisis de la desertificación (López Beltrán, Aguilar Villegas, & Plata Rocha, 2014; Pérez Verdín, Hernández Díaz, Márquez Linares, & Tecle, 2009).

En este sentido, en el presente trabajo se realiza un estudio de la dinámica histórica de las zonas agrícolas y la simulación de 2 escenarios de futuro, lo cual dará la pauta para analizar una línea evolutiva de tendencia y una situación de sostenibilidad en la agricultura en los Municipios de Culiacán y Navolato.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El Estado de Sinaloa tiene el primer lugar en producción alimentaria del País, de hecho, la Ciudad capital del Estado, Culiacán, se asienta en uno de los valles agrícolas más prolíficos del territorio nacional, abarcando principalmente los municipios de Culiacán y Navolato, los cuales se encuentran ubicados entre los paralelos 24° 02' y 25° 59' de latitud Norte y los meridianos 106° 52' y 108° 04' de longitud Oeste; con una altitud entre 0 y 800 m., colindando al Norte con los municipios de Angostura, Mocorito, Badiraguato y el Estado de Durango; al Este con el Estado de Durango y los municipios de Cosalá y Elota; al Sur con el Municipio de Elota y el Océano Pacífico (Figura 1).

El Municipio de Culiacán ocupa el 10.96% de la superficie del estado y cuenta con un total de 1,483 localidades (INEGI,

2010), mientras que al municipio de Navolato le corresponde un total de 3.71%, con 498 localidades. Ambos municipios ostentan un 14.67% del territorio estatal, con una superficie de 8,760.74 km², en los cuales se distribuye un total de 994,241 habitantes (INEGI, 2010). El mayor porcentaje de habitantes radica en las ciudades capitales, Culiacán y Navolato, con 858, 638 y 135, 603 habitantes, respectivamente (INEGI, 2010).

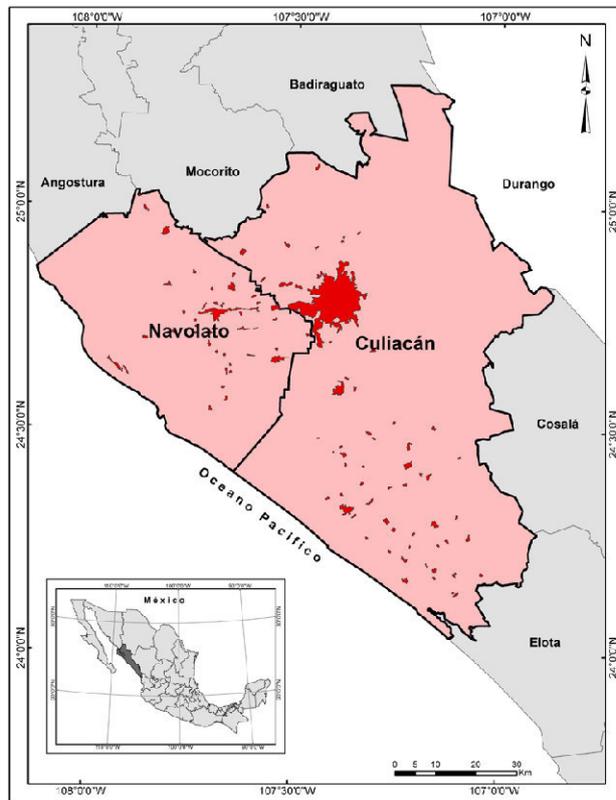


Figura 1. Municipios de Culiacán y Navolato

Las zonas agrícolas en estos municipios constituyen el 52.6% de la superficie, casi 450,000 hectáreas de cultivo, de las cuales, el 34.3% es agricultura de riego y el 18.3% restante es agricultura de temporal (Tabla 1).

Tabla 1 SUPERFICIE DE USOS DE SUELO EN AMBOS MUNICIPIOS

CATEGORÍA	SUPERFICIE (HAS) 1993	SUPERFICIE (HAS) 2011	% 2011
Agricultura de riego y humedad	283,812	293,782	34.3
Agricultura temporal	143,911	156,151	18.3
Asentamiento humano	6,650	20,116	2.4
Bosque	26,969	28,185	3.3
Otros tipos	164,152	158,948	18.6
Pastizales	340	3,020	0.4
Selvas	229,461	195,093	22.8
Σ	855,295	855,295	100.0

Otro aspecto fundamental a considerar es el hecho que ambas cabeceras municipales trazan un eje donde interactúan entes rurales, urbanos, industriales y comerciales, lo cual induce a la conformación de una zona metropolitana (Figura 3), lo que implica en corto plazo el desarrollo de planes territoriales en el corredor Culiacán - Navolato (Roldán López, 2006).

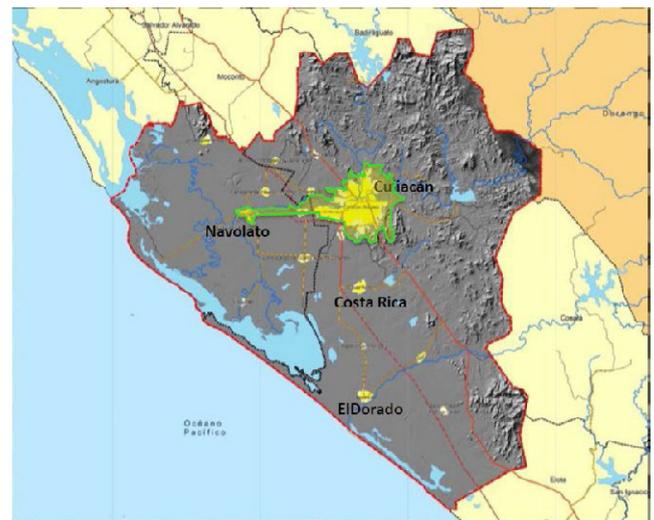


Figura 3. Zona metropolitana Culiacán - Navolato
Fuente: <http://codesin.mx/wp-content/uploads/2015/01/Zona-Metropolitana-Culiacan-Navolato.pdf>

III. MÉTODO

Para el estudio de la dinámica del territorio se utiliza como información de partida los mapas de usos del suelo del año 1993 y 2011, obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para lo cual se definió una leyenda conformada por 7 categorías, las cuales representan adecuadamente la dinámica entre los diferentes usos de suelo, obteniéndose así los mapas homogeneizados entre ambas fechas que permitieron realizar el estudio retrospectivo y la simulación de los escenarios de futuro (Figura 2).

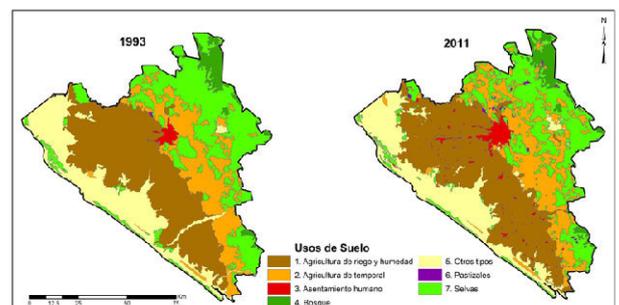


Figura 2. Mapas de usos de suelo del modelo

Una vez preparada la información cartográfica espacio-temporal se procedió a realizar el análisis detallado de los cambios de uso del suelo mediante la metodología desarrollada por Pontius (Pontius, Shusas, & McEachern, 2004), la cual permite obtener para cada categoría de uso del suelo las ganancias y las pérdidas, el cambio neto y los intercambios experimentados entre dos momentos temporales.

Luego de identificar los principales usos de suelo que intervienen en la dinámica territorial de los municipios de Culiacán y Navolato, se realiza la construcción de los escenarios para identificar las diferentes opciones que tuviese el área de estudio, si continuase la tendencia actual (escenario tendencial) o si se tuvieran intervenciones planificadas y concertadas en el corto, mediano y largo plazo (escenarios de sostenibilidad). Dicha metodología se realiza en 3 etapas (Figura 4).



Figura 4. Etapas para la simulación de escenarios

Para llevar a cabo la primera etapa se realizaron reuniones con expertos del grupo de geomatica de la Universidad Autónoma de Sinaloa (geomatica.uas.edu.mx), en las cuales se consensó realizar un escenario de tendencia con la finalidad de mostrar cual sería el estado de los usos agrícolas hasta el año 2030 si se mantuvieran las lógicas ocurridas en el pasado, así como un escenario de sostenibilidad, en el cual se tomarían en cuenta los nuevos modelos de producción agrícola tecnificada y la reforestación de algunas zonas consumidas por la agricultura de temporal.

Para realizar la segunda etapa se optó por el diseño y ajuste de un modelo de Dinámica de Sistemas (DS) de Demanda, utilizando para ello el Software Vensim y los mapas de usos de suelo de 1993 y 2011 (Corrales, 2016).

Posteriormente, para la simulación geoespacial de los escenarios de zonas agrícolas se recopiló datos referentes al tipo de suelo, hidrografía, carreteras, altitud y pendiente (Tabla II), para diseñar los factores a utilizar en cada escenario.

TABLA II
VARIABLES UTILIZADAS EN LA SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS

VARIABLES	FUENTE/ESCALA
• Agricultura de riego y humedad	Uso del Suelo y Vegetación
• Agricultura de temporal	INEGI
• Asentamiento humano	Año 2011
• Bosques	1:250,000
• Pastizales	
• Selvas	
• Otros tipos.	
• Altitud	MDT. INEGI
• Pendiente	Escala: 90m Año: 2013
• Tipos de suelo	INEGI
	1:250,000
• Ríos	INEGI
• Canales	1:250,000
	1:1,000,000
• Carreteras	INEGI
	1:50,000

Para obtener los mapas de aptitud o adecuación se utilizó la sumatoria lineal ponderada, la cual es uno de los métodos más utilizados en la Evaluación Multicriterio por su relativa sencillez, robustez y poca complejidad en su implementación (Gómez Delgado & Barredo, 2005). El nivel de adecuación de cada alternativa se obtiene sumando el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso [1]:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_i \cdot v_{ij} \quad (1)$$

Donde: w_i son los pesos; v_{ij} son los factores y r_i es la aptitud de cada píxel.

Finalmente, con los mapas de aptitud/adecuación obtenidos, se realizó una asignación multiobjetivo (MOLA, MultiObjective Land Allocation) en el software Idrisi entre los mapas de aptitud para agricultura de riego y aptitud para la agricultura de temporal.

El esquema metodológico seguido para realizar la investigación se muestra en la figura 4.

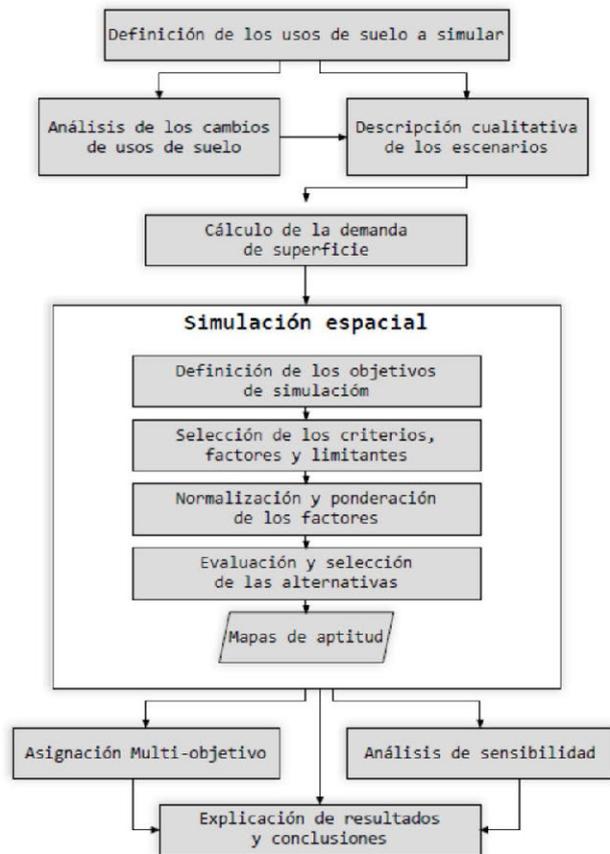


Figura 4. Esquema metodológico

IV. RESULTADOS

ANÁLISIS HISTÓRICO DE LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DE SUELO

Analizando la dinámica de los usos de suelo del año 1993 al 2011 se tuvo que la tendencia de los cambios fue de un aumento de los asentamientos humanos, de la agricultura de temporal, de la agricultura de riego y en menor medida de los pastizales y bosques. A su vez, las selvas tuvieron una gran pérdida de superficie y en menor cantidad la categoría de otros tipos.

Analizando ésta matriz de cambios, vemos como la transición de mayor tamaño se da de selvas a la agricultura de temporal, seguidas por las de la agricultura de temporal hacia agricultura de riego y otros tipos (Tabla 3).

TABLA III
MATRIZ DE CAMBIOS: 1993 A 2011

	1	2	3	4	5	6	7
Agric. de riego y humedad	267,398	12,226	4	0	10,877	2	3,275
Agric. temporal	250	116,343	3	380	3,250	0	35,925
Asent. humano	9,462	2,687	6,641	0	209	0	1,117
Bosque	0	0	0	26,166	0	0	2,019
Otros tipos	5,926	2,313	0	0	146,326	0	4,383
Pastizal	146	432	0	231	0	337	1,874
Selva	630	9,910	2	192	3,490	1	180,868

Ahora bien, si analizamos la dinámica de los usos de suelo en función de sus ganancias, pérdidas, persistencias y cambios, tenemos que, la categoría que experimentó la mayor ganancia fue la agricultura de temporal, seguida por la agricultura de riego y humedad, y en cantidades menores los asentamientos humanos y otros tipos. En cuanto a las pérdidas, fueron las selvas la categoría que experimentó la mayor pérdida, de igual forma, son las selvas las que presentan los mayores cambios, seguidas por los asentamientos humanos y las agriculturas. Es importante recalcar que, el aumento de superficies de categorías como, las agriculturas y los asentamientos humanos, se da básicamente a costa de las selvas (Tabla 4). De igual forma, debemos considerar que las transiciones experimentadas por la categoría de otros tipos, no representa un cambio negativo, pues dichos cambios se dan en las subcategorías de "área sin vegetación aparente" y "vegetación halófila y gipsófila", mientras que la vegetación hidrófila y los cuerpos de agua permanecen constantes.

TABLA 4
CAMBIOS OCURRIDOS DE 1993 AL 2011

CLASE	GANANCIA	PÉRDIDA	PERSISTENCIA	CAMBIO NETO	CAMBIO TOTAL
1	26,384	16,414	267,398	9,970	42,798
2	39,808	27,568	116,343	12,240	67,376
3	13,475	9	6,641	13,466	13,484
4	2,019	803	26,166	1,216	2,822
5	12,622	17,826	146,326	5,204	30,448
6	2,683	3	337	2,680	2,686
7	14,225	48,593	180,868	34,368	62,818
Σ	111,216	111,216	744,079	79,144	222,432

En función de los resultados obtenidos del análisis de los cambios de usos de suelo observamos que la agricultura de riego y de temporal son las que mantienen las mayores ganancias y están dentro de las que tienen más pérdidas, mismas que se presentan espacialmente de diferentes partes del territorio, mientras que la agricultura de riego refleja su dinámica en el valle, la agricultura de temporal lo representa en la zona serrana (Figura 5).

Dicha dinámica no garantiza que nuestro territorio soporte tal presión en el futuro cercano, es por ello, que se propuso evaluar dos escenarios territoriales futuros, uno que nos marque las pautas de tendencia, es decir, un escenario de tendencia, que permita evaluar nuestro territorio futuro si se dieran las mismas lógicas seguidas en el pasado. Dicho escenario sería la base para medir un escenario alternativo de sostenibilidad a mediano y largo plazo de las dinámicas de los usos de suelo en nuestro territorio.

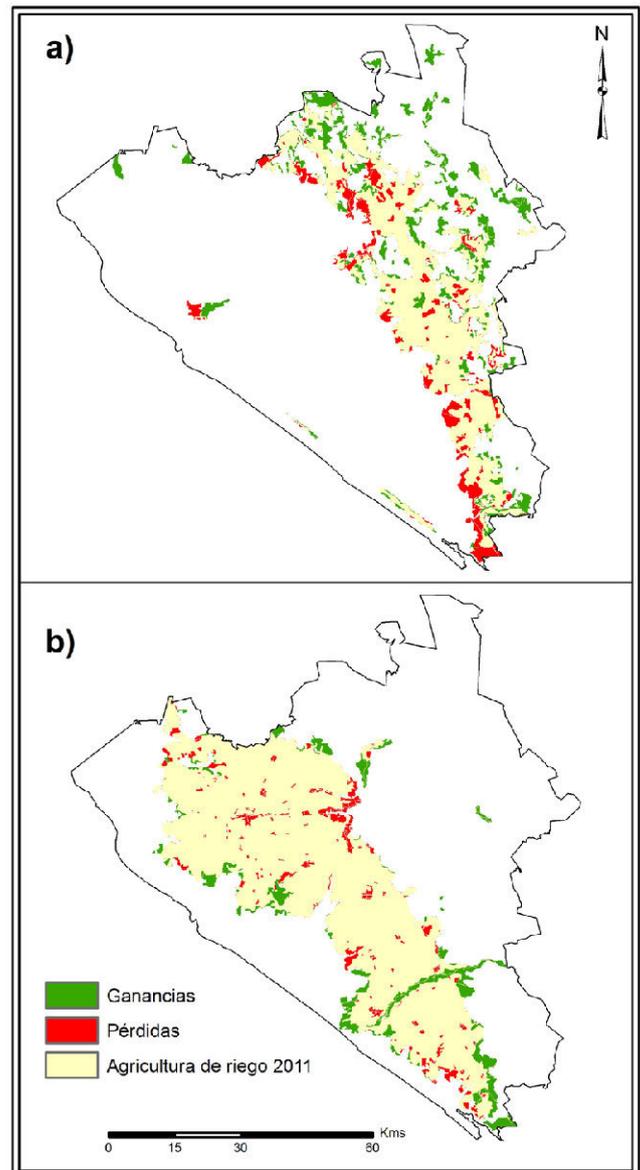


Figura 5. a) Agricultura de temporal, b) Agricultura de riego

ESCENARIOS DE FUTURO

Descripción cualitativa

De este modo se realizó la descripción cualitativa de los escenarios considerando el consenso de los integrantes del grupo de investigación en Geomática de la Universidad Autónoma de Sinaloa como se enuncian a continuación.

El seguimiento de las directrices de cambio ocurridas en el pasado, constituye la base del escenario de tendencia. Este escenario supone la confirmación y consolidación de las tasas de cambio ocurridas en el pasado, en donde, se establece un comportamiento de intercambio espacial de las zonas agrícolas, ya que mantendrán altas tasas de incremento y considerables pérdidas.

Por otro lado, la búsqueda de nuevos modelos y fórmulas que minimizan el impacto ambiental y maximizan el beneficio social y económico constituye la fortaleza del escenario de sostenibilidad. Las tasas de crecimiento de las superficies agrícola-

las disminuyen, debido a la innovación y tecnificación en las actividades agrícolas, lo que incrementaría la productividad en superficies menores de suelo. En particular, la agricultura de temporal disminuye debido al incremento de las selvas y pastizales. Lo que resulta en una disminución de las tasas de deforestación, así como recuperación de parte de la superficie de selvas deforestadas.

Demanda de suelo agrícola

Con el Modelo de Demanda ajustado, se obtuvo la superficie de futuro, ejecutándose con 19 iteraciones (años) para obtener la demanda de cada categoría del año 2011 al año 2030 para ambos escenarios futuros (Corrales Barraza, 2016).

En el caso del escenario de tendencia, solamente se ejecutó hacia adelante con 19 iteraciones y manteniendo las tasas obtenidas en el pasado, lo cual permitió obtener la demanda de cada uso de suelo, considerando un comportamiento igual al pasado.

A partir de los resultados de la superficie simulada, observamos que, efectivamente como ocurrió del año 1993 al 2011, todas las categorías continúan con la tendencia de aumentar de superficie, a excepción de las selvas, las cuales disminuyen considerablemente su superficie.

Para el escenario de sostenibilidad se ajustaron las tasas de transiciones de manera que se cumpla lo planteado en este escenario, es decir, que las tasas de superficie de cada categoría disminuyan o aumenten, conforme una dinámica sostenible de los usos de suelo. Al respecto, vemos una disminución de la superficie de agricultura de temporal debido al incremento de las selvas y pastizales, las superficies urbanas se mantienen constantes, con una tasa de crecimiento muy baja.

En la Tabla 5 se muestra la superficie obtenida para cada escenario y un indicador de su dinámica de cambio neto.

TABLA 5
SUPERFICIES SIMULADAS

CATEGORÍA	SUPERFICIE REAL 2011	ESCENARIO DE TENDENCIA (ET) 2030	ESCENARIO SOSTENIBLE (ES) 2030
1	293,782	304,306.00	289,733.00
2	156,151	169,069.00	125,176.00
3	20,116	34,330.00	20,792.00
4	28,185	29,470.13	29,401.00
5	158,948	153,455.00	159,353.00
6	3,020	5,848.87	9,450.00
7	195,093	158,816.00	221,390.00
Σ	855,295	855,295	855,295.00

Selección de los criterios, factores y restricciones para la simulación geoespacial

Para la simulación geoespacial primero que nada se determinaron las zonas de restricción, es decir, se tomaron en cuenta las áreas donde cada objetivo a simular no se debía asignar, tales como: zonas urbanas, vías de comunicación, cuerpos de agua, red hidrográfica y algunos usos de suelo en particular (Figura 6).

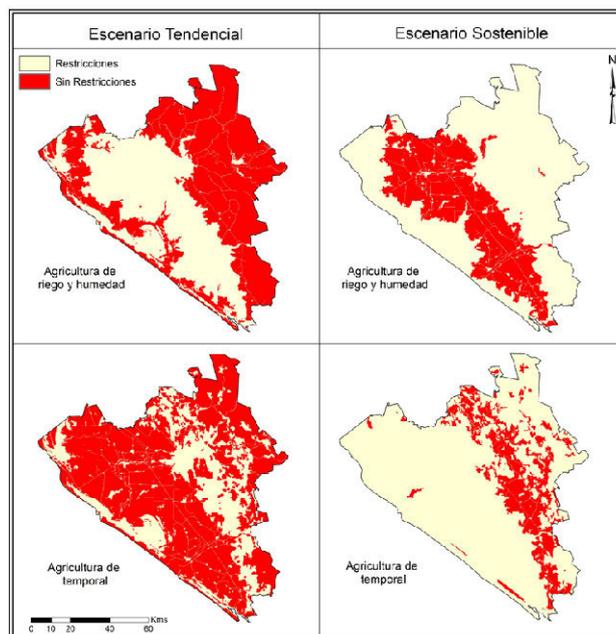


Figura 6. Mapa de restricciones, 1

Normalización

Como resultado de este apartado, tenemos los criterios normalizados, es decir, con una escala compatible, de todos los factores para cada uno de los escenarios.

La obtención de cada factor se obtuvo considerando diferentes procedimientos de normalización de cada uno de los factores para las categorías a simular en los dos escenarios planteados.

Agricultura de Riego y humedad

- Proximidad a Usos de suelo

Este criterio se utilizó solo para el escenario de sostenibilidad, en el cual se presentará una disminución de esta categoría. Considera los usos de suelo que producirán las pérdidas o disminución de superficie de la agricultura de riego. Es decir, las transiciones de agricultura de riego hacia otras categorías. Dichas transiciones, se obtuvieron en primer lugar, del análisis de los cambios sucedidos en el pasado, sin embargo, se analizó desde el punto de vista de la sostenibilidad que categorías deberían de crecer en función de la agricultura de riego y humedad y a que distancias se podrían producir esas transiciones. Se obtuvieron mapas de distancias de las categorías elegidas, y se normalizaron con funciones borrosas de tipo lineal decreciente, donde el valor máximo es el resultado del análisis mencionado, posteriormente se le asignó un peso a cada categoría y se realizó una sumatoria lineal ponderada, obteniéndose así, el mapa final que representa este criterio (Tabla 6).

TABLA VI
PROXIMIDAD A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU IDONEIDAD PARA LA AGRICULTURA DE RIEGO

USYV	PESOS	DIST. DE NORMALIZACIÓN
Agricultura temporal	0.211	0 a 25,000
Asentamiento humano	0.031	0 a 4,000
Otros tipos	0.538	0 a 10,000
Selvas	0.220	0 a 10,000

- Proximidad inversa a Usos de suelo

Este criterio se utiliza para el escenario de tendencia y representa los usos de suelo sobre los que se debe de dar el

crecimiento de la agricultura de riego, sin embargo, aparte de representar los usos de suelo, también representa las distancias sobre cada uno de ellos. Estas, se consideran inversas pues van desde los límites de cada categoría hacia el interior, ya que la idea es representar las distancias hacia cada uso de suelo. Para la obtención de éste factor, se analizaron los usos sobre los que se dio el crecimiento de la agricultura de riego en el pasado, así como a que distancias. Posteriormente se le asignó un peso a cada categoría y se realizó una sumatoria lineal ponderada, obteniéndose así, el mapa final que representa este criterio (Tabla 7).

TABLA VII
PROXIMIDAD INVERSA A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU IDONEIDAD PARA LA AGRICULTURA DE RIEGO

USYV	PESOS	DIST. DE NORMALIZACIÓN
Agricultura de temporal	0.46	0 a 5,000
Otros tipos	0.41	0 a 2,000
Selvas	0.13	0 a 2,500

- Proximidad a Agricultura de riego

Este factor da mayor nivel de aptitud a aquellas zonas más cercanas a la agricultura de riego. Se utilizó para la simulación de crecimiento de agricultura de riego y humedad en el escenario de tendencia. Se normalizó utilizando una función borrosa lineal decreciente, donde el valor mínimo que representa la máxima aptitud es 0, y máximo es 8,000.

- Proximidad inversa a Agricultura de riego

Este criterio se utilizó solo para el escenario sostenible, tiene como finalidad representar a que distancias de los límites de la agricultura de riego se producirá la disminución de superficie, asumiendo que se darán en los límites, donde esta colinda con otras categorías. Para generar este factor, primero se obtiene un mapa de distancias hacia el interior de la agricultura de riego y posteriormente se normaliza utilizando una función borrosa lineal decreciente, donde los valores van del 0 a 1,000.

- Proximidad a Canales

La accesibilidad a los canales se considera esencial para el desarrollo de la Agricultura de Riego. Así, los lugares más próximos a los canales se valoraron como los más óptimos para que se presente el aumento de la Agricultura de riego. Factor utilizado en el escenario de tendencia y normalizado con una función lineal decreciente.

- Lejanía a Canales

Este criterio utilizado en el escenario de sostenibilidad, considera los lugares más lejanos a los canales como los menos óptimos para la agricultura de riego, es decir, son los más óptimos para la pérdida de esta cobertura. Se normaliza usando una función Lineal creciente de 0 a 5,000.

- Proximidad a Ríos

Considera las zonas más cercanas a los ríos, como las más óptimas para que se presente el aumento de esta categoría, por lo que, este factor es utilizado para el escenario de tendencia. Se normaliza utilizando una función lineal decreciente.

- Lejanía a Ríos

Los lugares más lejanos a los ríos se valoraran como los más óptimos para la disminución de superficie de la agricultura de riego. Por lo que, éste factor es utilizado para simular pérdida de agricultura de riego en el escenario de sostenibilidad.

Para su normalización se utiliza una función borrosa lineal creciente.

- Pendiente

Este factor se normaliza de manera que se representen las mejores pendientes para el desarrollo de cada actividad, en este caso, para la agricultura de riego. La normalización se realizó, mediante una función sigmoideal decreciente, donde el valor más óptimo es el 0 (punto de control c) y el valor de menor aptitud es el 16 (punto de control d).

- Altitud

En este factor se representa la altura más adecuada para el crecimiento de la Agricultura de Riego. Se obtuvieron los umbrales adecuados para el escenario de tendencia y para su normalización se utilizó una función de tipo borrosa sigmoideal decreciente.

- Tipos de suelo ocupados

Este factor representa la aptitud de los distintos tipos de suelo para el desarrollo de la Agricultura de riego, dependiendo del escenario a simular. En el escenario de tendencia, que tiene como objetivo simular el aumento de superficie, se normaliza dando mayor aptitud a los tipos de suelos donde se debe desarrollar dicho aumento; para determinar los tipos de suelo, se realizó un análisis histórico que consistió en una superposición de los mapas de cambios de la agricultura de riego y el mapa de tipos de suelo, obteniendo así, los tipos de suelos en los que se ha dado el crecimiento, posteriormente, se establecieron pesos para cada uno, basándonos en la superficie ocupada por cada uno.

Una vez establecidos los pesos para cada tipo de suelo, se reclasificó cada uno con el valor del peso correspondiente y se normalizó utilizando una función lineal creciente, donde el valor mínimo es 0 y el valor máximo corresponde al valor del peso más alto (Tabla 8).

Para el escenario de sostenibilidad, que tiene el objetivo de simular la disminución de agricultura de riego, en primer lugar, se analizó sobre qué tipos de suelos se presentaba la agricultura de riego existente, la ponderación de cada suelo se realizó considerando la superficie de cada uno, en conjunto con los suelos que son menos óptimos para el desarrollo de la agricultura de riego. De la misma manera que en el escenario de tendencia, se normalizó utilizando una función lineal creciente de 0 al valor del peso más alto (Tabla 8).

TABLA VIII
PESOS DE LOS TIPOS DE SUELO PARA LA AGRICULTURA DE RIEGO

TIPOS DE SUELO	PESOS E. TENDENCIAL	PESOS E. SOSTENIBLE
Cambisol	0.16	0.25
Feozem	0.08	0.05
Fluvisol	0.14	0.03
Solonchak	0.20	0.10
Vertisol	0.42	0.57

En resumen en la Tabla 9 se muestran los factores y los parámetros utilizados para su normalización.

TABLA IX
VALORES UTILIZADOS PARA NORMALIZAR LOS FACTORES DE LA AGRICULTURA DE RIEGO Y HUMEDAD

FACTORES	FUNCIÓN	VALORES DE ADECUACIÓN			
		E. TENDENCIA		E. SOSTENIBLE	
		MIN	MAX	MIN	MAX
Proximidad a usos de suelo	Especial	-	-	SLP	SLP
Proximidad inversa a usos de suelo	Especial	SLP	SLP	-	-
Proximidad a Agricultura de riego	Lineal decreciente	0	8,000	-	-
Proximidad inversa a Agricultura de riego	Lineal decreciente	-	-	0	1,000
Proximidad a Canales	Lineal Decreciente	0	27,000	-	-
Lejanía a Canales	Lineal creciente	-	-	0	5,000
Pendiente	Sigmoidal decreciente	0	16	-	-
Altitud	Sigmoidal decreciente	0	130	-	-
Proximidad a Ríos	Lineal decreciente	0	30,000	-	-
Lejanía a Ríos	Lineal creciente	-	-	0	30,000
Tipos de Suelos	Lineal creciente	0	0.57	-	-
	Lineal decreciente	-	-	0	0.42

Finalmente, en la Figura 7 y 8 se muestran los mapas normalizados correspondientes a los factores para la simulación de la agricultura de riego en ambos escenarios.

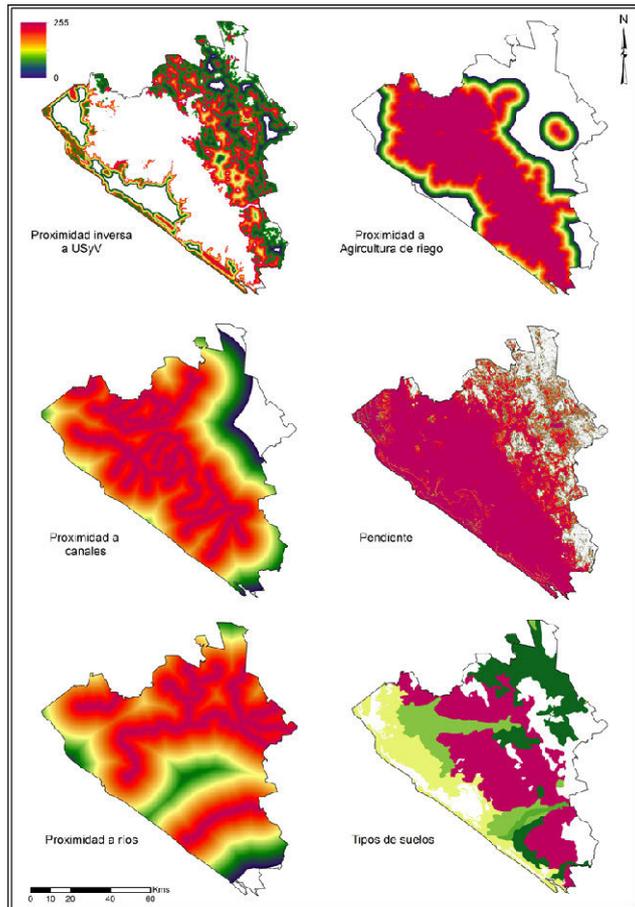


Figura 7. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de tendencia

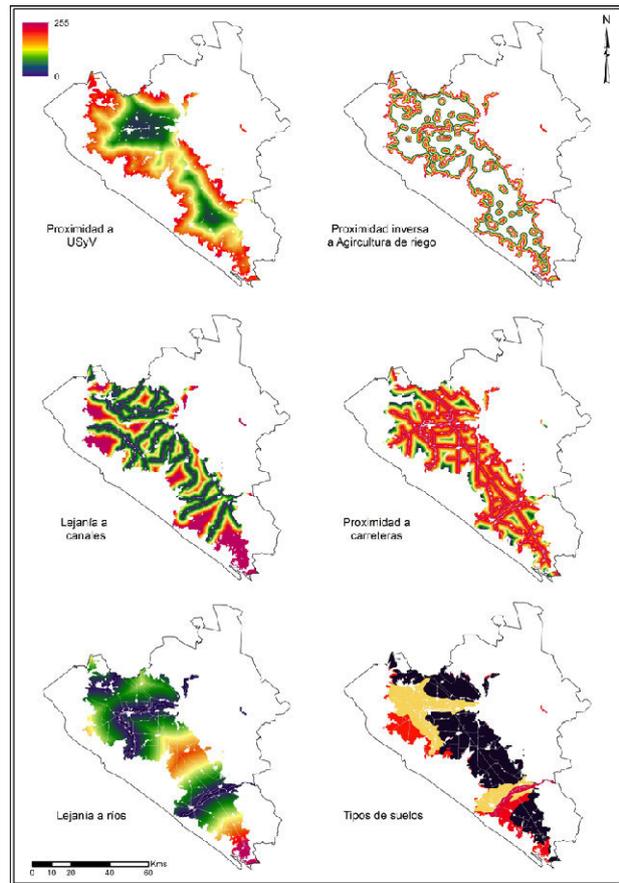


Figura 8. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de sostenibilidad

Agricultura de temporal

- Proximidad a Usos de suelo

Este criterio se realizó para el escenario sostenible, tomando en cuenta los usos de suelo que tienen que ver con las pérdidas de la agricultura de temporal. El procedimiento para obtenerlo, fue similar a este mismo factor para la agricultura de riego y humedad. A continuación, se presenta un resumen con las distancias utilizadas para la normalización, así como los pesos utilizados para la sumatoria lineal ponderada con que se obtuvo el criterio final (Tabla 10).

TABLA X
PROXIMIDAD A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU IDONEIDAD PARA LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

FACTORES	PESOS	DIST. DE NORMALIZACIÓN
Agricultura de riego y humedad	0.188	0 a 15,000
Asentamiento humano	0.003	0 a 5,000
Otros tipos	0.093	0 a 13,000
Pastizales	0.009	0 a 15,000
Selvas	0.707	0 a 10,000

- Proximidad inversa a Usos de suelo

Este criterio es utilizado para el escenario de tendencia, representa los usos de suelo sobre los que se dará el crecimiento de la agricultura de temporal. Al igual que el anterior, se utiliza el mismo procedimiento que en el factor de la agricultura de riego, pero pensado ahora, para esta categorías. Resumiéndose a continuación las distancias utilizadas para la normalización, así como los pesos utilizados para la sumatoria lineal ponderada con que se obtuvo el criterio final (Tabla 11).

TABLA XI
PROXIMIDAD INVERSA A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU APTITUD PARA LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

FACTORES	PESOS	DIST. DE NORMALIZACIÓN
Agricultura de riego y humedad	0.01	0 a 1,100
Bosques	0.01	0 a 1,500
Otros tipos	0.08	0 a 6,000
Selvas	0.9	0 a 7,000

- Proximidad a Agricultura de temporal

Este factor da mayor nivel de aptitud a aquellas zonas más cercanas a la agricultura de temporal, es utilizado para la simulación de crecimiento de dicha categoría en el escenario de tendencia.

- Proximidad inversa a Agricultura de riego

Este criterio se utilizó solo para el escenario sostenible, tiene como finalidad representar a que distancias de los límites de la agricultura de temporal hacia el interior de ésta ocurrirán las pérdidas.

- Proximidad a Ríos

Considera las zonas más cercanas a los ríos, como las más óptimas para que se presente el aumento de esta categoría, por lo que, este factor es utilizado para el escenario de tendencia.

- Lejanía a Ríos

Los lugares más lejanos a los ríos se consideran como los de menor aptitud para que se dé la agricultura temporal, por lo que, en estos lugares, es más probable que se presenten las pérdidas. Este factor es utilizado para simular pérdida de agricultura de riego en el escenario de sostenibilidad.

- Pendiente

Este factor representa las mejores pendientes para cada actividad, en este caso, para la Agricultura de temporal, se utilizó en ambos escenarios, normalizándose de diferente manera para cada uno. Para el escenario de tendencia, se utilizaron los valores resultantes en cuanto a lo ocurrido en el pasado, mientras que para el sostenible, se utilizaron los valores más adecuados para que se realice esta actividad.

- Altitud

En este factor se representa la altura en la que se debe de dar la Agricultura de temporal. Se obtuvieron los umbrales adecuados para el escenario de tendencia, para su normalización se utilizó una función de tipo borrosa sigmoidal decreciente.

- Tipos de suelo ocupados

Este factor representa la aptitud de los distintos tipos de suelo para la simulación de la agricultura de temporal en ambos escenarios. Su normalización se llevó a cabo de la misma manera que éste factor en la agricultura de riego, pero considerando ahora a la agricultura de temporal. Para los dos escenarios se utilizó una función lineal creciente, donde el valor mínimo es 0 y el máximo es igual al valor del peso más alto (Tabla 12).

TABLA XII
PESOS DE LOS TIPOS DE SUELO PARA LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

TIPOS DE SUELO	PESOS E. TENDENCIAL	PESOS E. SOSTENIBLE
Feozem	0.25	0.48
Litosol	0.03	0.05
Regosol	0.14	0.26
Solonchak	0.04	0.07
Vertisol	0.54	0.14

En la Tabla 13 se muestran todos los factores y los parámetros utilizados para su normalización.

TABLA XIII
VALORES UTILIZADOS PARA LA NORMALIZACIÓN DE LOS FACTORES DE LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

FACTORES	FUNCIÓN	VALORES DE ADECUACIÓN			
		E. TENDENCIA		E. SOSTENIBLE	
		MIN	MAX	MIN	MAX
Proximidad a usos de suelo	Especial	-	-	SLP	SLP
Proximidad inversa a usos de suelo	Especial	SLP	SLP	-	-
Proximidad a Agricultura de temporal	Lineal decreciente	0	20,000	-	-
Proximidad inversa a Agricultura de temporal	Lineal decreciente	-	-	0	2,000
Proximidad a Ríos	Lineal Decreciente	0	30,000	-	-
Lejanía a Ríos	Lineal creciente	-	-	0	35,000
Pendiente	Sigmoidal decreciente	0	60	0	15
Altitud	Sigmoidal decreciente	0	650	-	-
Tipos de Suelos	Lineal creciente	0	0.48	-	-
	Lineal decreciente	-	-	0	0.54

Finalmente en la Figura 9 y 10 se muestran los mapas normalizados correspondientes a los factores para la simulación de la agricultura de temporal en el escenario de tendencia y en el de sostenibilidad.

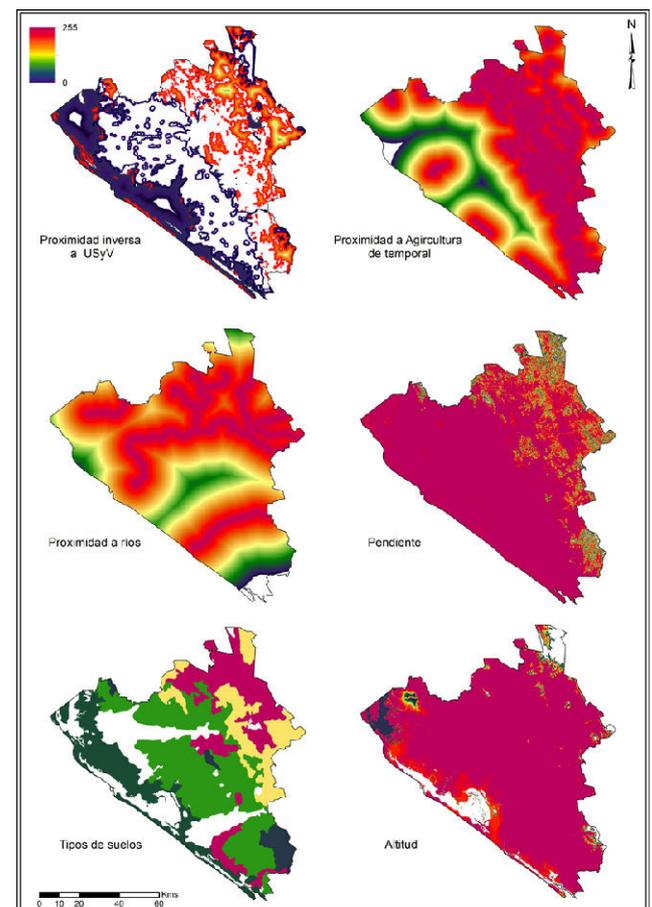


Figura 9. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de tendencia

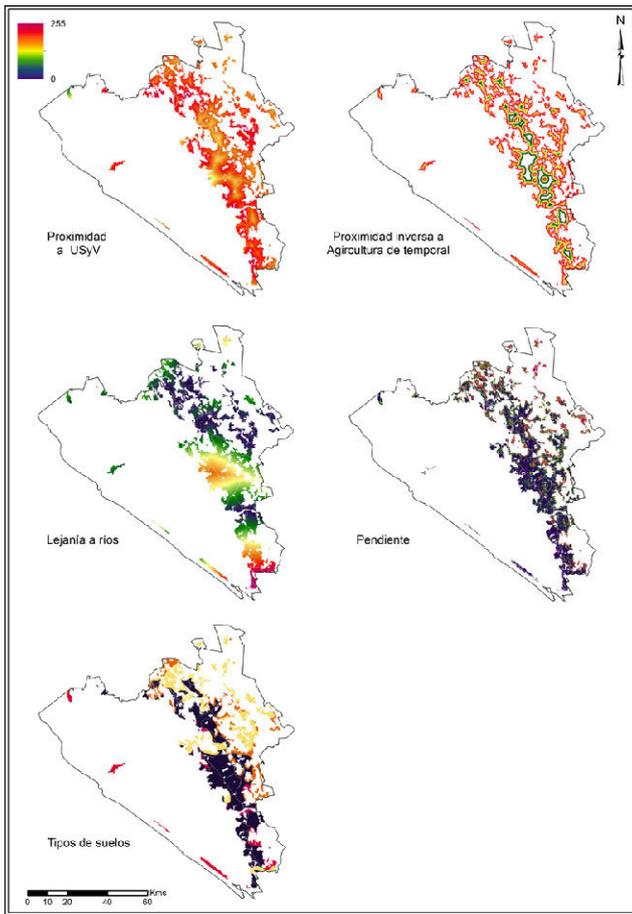


Figura 10. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de sostenibilidad

Ponderación de los factores utilizados para generar los mapas de aptitud para Agricultura de riego y humedad

En la ponderación de los factores, se establecieron primero el orden jerárquico de cada uno de ellos. Finalmente siguiendo el procedimiento de jerarquías analíticas, se obtuvo el peso de cada factor. El resultado del peso para los factores muestra que se asignó el mayor peso a los usos de suelo, así como al uso de suelo que se estuviera simulando. En el caso de la simulación de la Agricultura de riego y humedad, vemos como los factores de mayor peso con la proximidad a USyV, y la proximidad a Agricultura de riego, ya sea normal o inversa, dependiente del escenario a simular (Tabla 14 y 15).

TABLA XIV
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE RIEGO Y HUMEDAD EN EL ESCENARIO DE TENDENCIA

FACTORES	6	5	4	3	2	1	PESO
6) Tipos de suelo	1	---	---	---	---	---	0.05
5) Proximidad a Ríos	2	1	---	---	---	---	0.10
4) Pendiente	3	1.5	1	---	---	---	0.15
3) Proximidad a Canales	4	2	1.333	1	---	---	0.19
2) Proximidad a A. Riego	5	2.5	1.667	1.25	1	--	0.23
1) Proximidad inversa a USyV	6	3	2	1.5	1.2	1	0.28

TABLA XV
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE RIEGO Y HUMEDAD EN EL ESCENARIO DE SOSTENIBILIDAD

FACTORES	6	5	4	3	2	1	PESO
6) Tipos de suelo	1	---	---	---	---	---	0.05
5) Lejanía a Ríos	2	1	---	---	---	---	0.07
4) Proximidad a Carreteras	3	1.5	1	---	---	---	0.15
3) Proximidad a Canales	4	2	1.33	1	---	---	0.10
2) Proximidad inversa a A. Riego	6	3	2	1.5	1	--	0.25
1) Proximidad a USyV	9	4.5	3	2.25	1.5	1	0.38

Diseñados los factores para cada escenario y definidos sus pesos, se obtuvieron, aplicando una sumatoria lineal ponderada, los mapas de aptitud para ambos escenarios. En la Figura 11, vemos el mapa de aptitud para la Agricultura de riego y humedad para el escenario de tendencia y para el escenario de sostenibilidad, donde podemos apreciar como cada mapa representa el objetivo de simulación planteado, dependiendo esto, de la finalidad de cada escenario.

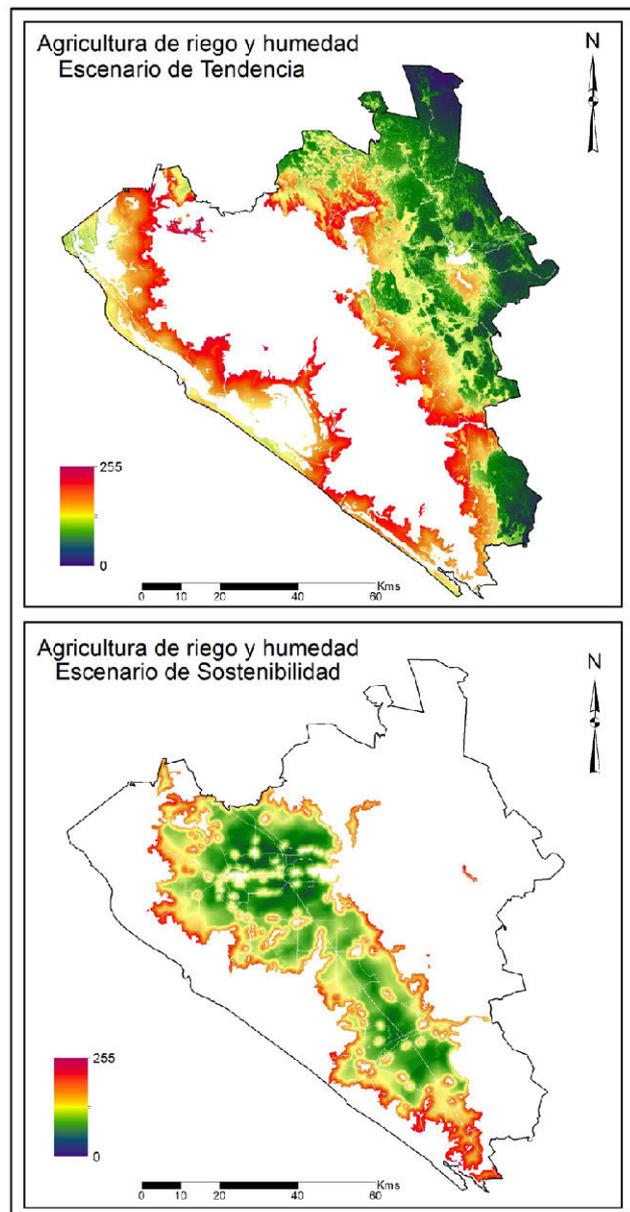


Figura 11. Mapas de aptitud para la agricultura de riego y humedad

Ponderación de los factores utilizados para generar los mapas de aptitud para Agricultura de temporal

La ponderación de los factores para la simulación de agricultura de temporal en ambos escenarios se muestra en la Tabla 16 y 17, donde podemos ver el orden jerárquico de cada uno de ellos, así como el peso resultante.

TABLA XVI
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE TEMPORAL EN EL ESCENARIO DE TENDENCIA

FACTORES	6	5	4	3	2	1	PESO
6) Tipos de suelo	1	---	---	---	---	---	0.05
5) Altitud	2	1	---	---	---	---	0.07
4) Pendiente	3	31.5	1	---	---	---	0.12
3) Proximidad a Ríos	4	2	1.333	1	---	---	0.16
2) Proximidad a A. Temporal	6	3	2	1.5	1	---	0.25
1) Proximidad inversa USyV	8	4	2.667	2	1.333	1	0.35

TABLA XVII
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE TEMPORAL EN EL ESCENARIO DE SOSTENIBILIDAD

FACTORES	5	4	3	2	1	PESO
5) Tipos de suelo	1	---	---	---	---	0.07
4) Pendiente	2	1	---	---	---	0.08
3) Lejanía a Ríos	4	2	1	---	---	0.15
2) Proximidad inversa a A. Temporal	5	2.5	1.25	1	---	0.25
1) Proximidad a USyV	9	4.5	2.25	1.8	1	0.45

Con los pesos determinados y los factores en cada uno de los escenarios, se obtuvieron los mapas de aptitud para el escenario de tendencia y para el escenario de sostenibilidad (Figura 12).

A partir de dichos mapas se obtuvieron los píxeles con la mayor aptitud para la asignación de la agricultura de riego y de temporal para ambos escenarios. Para ello, se realizó una asignación multiobjetivo (MOLA), con la finalidad de resolver posibles conflictos entre los píxeles de mejor aptitud para agricultura de riego y de temporal, obteniendo un mapa con todos ambos objetivos para el escenario de tendencia y de sostenibilidad (Figura 13).

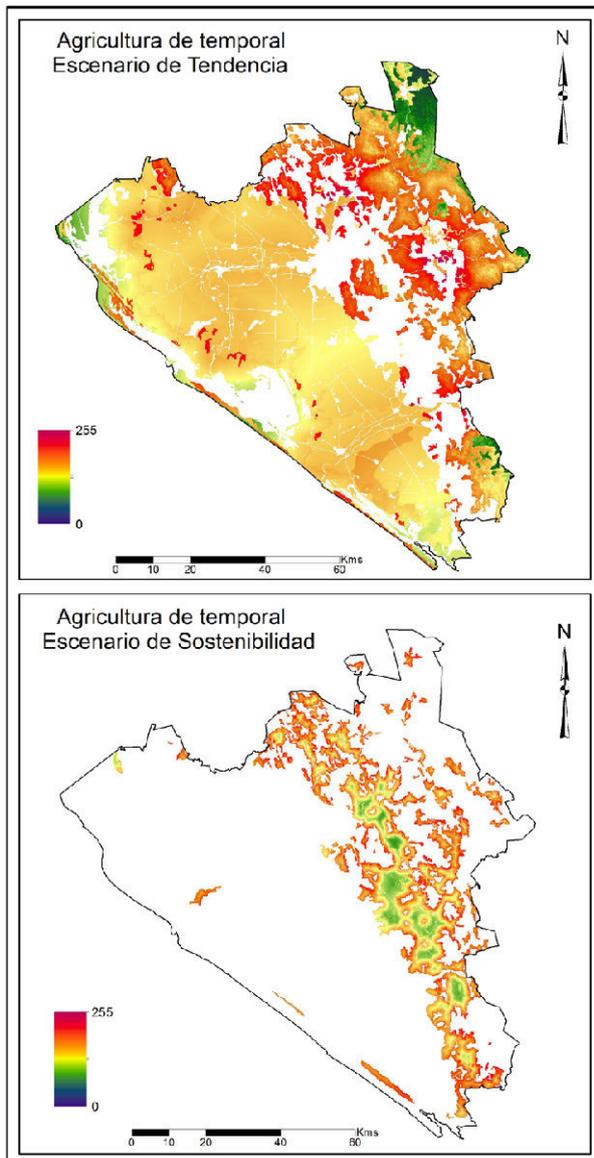


Figura 12. Mapas de aptitud para la agricultura de temporal

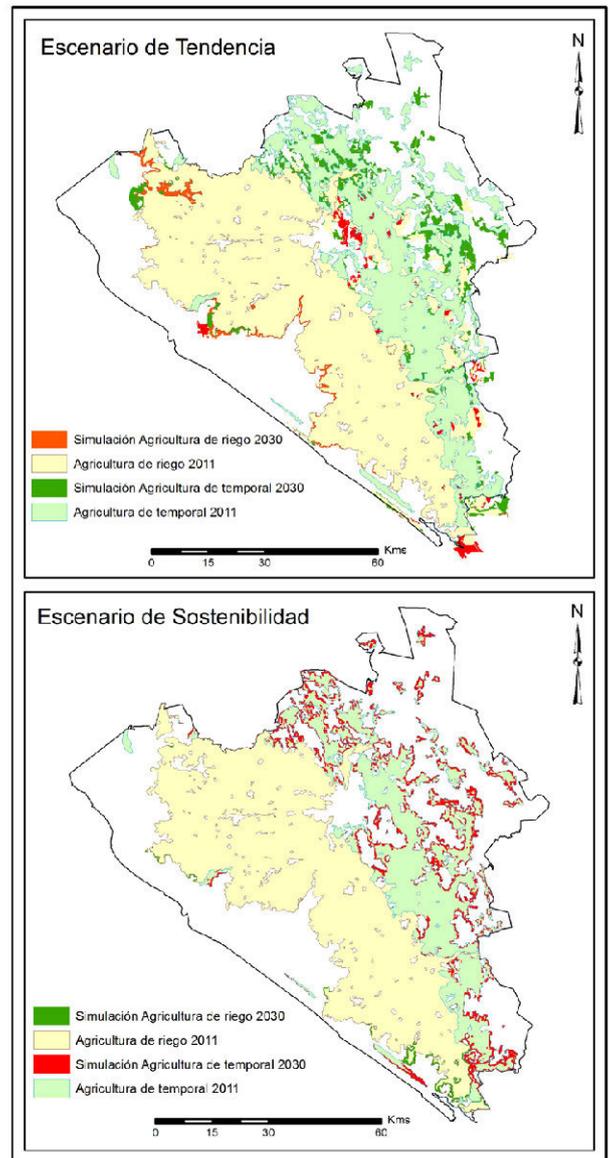


Figura 13. Escenario de Tendencia y Sostenibilidad para la agricultura de riego y humedad y la agricultura de temporal.

Descripción de la evolución de los cambios en ambos escenarios

La simulación espacial de cada escenario representa su descripción cualitativa, para el escenario de tendencia se observó una dinámica futura de los usos de suelo igual a la ocurrida en el pasado, mientras que, el escenario de sostenibilidad muestra un crecimiento con base en la protección de suelos forestales y una evolución de las zonas agrícolas sostenible en cuanto al consumo de suelo.

Analizando los indicadores de cambio del año 2011 a cada uno de los escenarios simulados, podemos ver que, en el escenario de tendencia, ambas agriculturas presentan unas ganancias altas, mientras las selvas sufren una enorme pérdida. Al contrario, en el escenario de sostenibilidad, la agricultura de temporal disminuye considerable en superficie a costa del aumento de las selvas (Tabla 18).

TABLA XVIII
INDICADORES DE CAMBIOS DEL 2011 AL 2030 EN AMBOS ESCENARIOS

CATEGORÍA	AUMENTO		DISMINUCIÓN	
	ET	ES	ET	ES
Agricultura de riego y humedad	21,649	0	11,125	4,049
Agricultura temporal	16,285	0	3,746	30,975

En la Figura 45 y la Figura 46, podemos analizar espacialmente donde se efectuaron cada una de las transiciones. De esta manera, podemos ver como en el escenario de tendencia, las transiciones más significativas se dan de selvas hacia la agricultura de temporal y hacia la agricultura de riego y humedad; y de ambas agriculturas a los asentamientos humanos. En el escenario de sostenibilidad, la principal transición se presenta de agricultura de temporal hacia las selvas, seguida en menor cantidad, por la de agricultura de temporal a pastizales.

Un análisis visual de ambos escenarios, muestra como en el escenario de tendencia, los cambios se presentan de manera compacta en torno a la categoría correspondiente, como es el caso de las transiciones hacia asentamientos humanos. Por otro lado, el aumento de las selvas en el escenario de sostenibilidad, muestra patrones espaciales un poco más diseminados, que corresponden a los límites entre ésta y la agricultura de temporal (Figura 14 y 15).

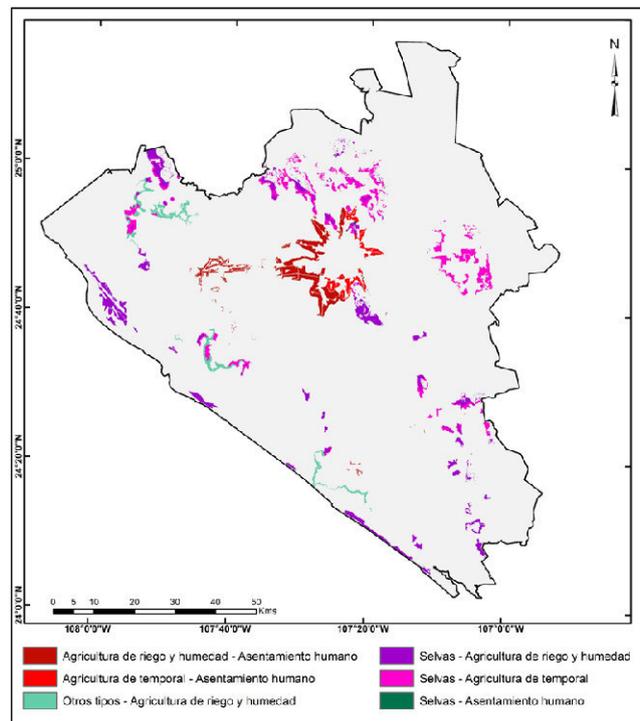


Figura 14. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de tendencia

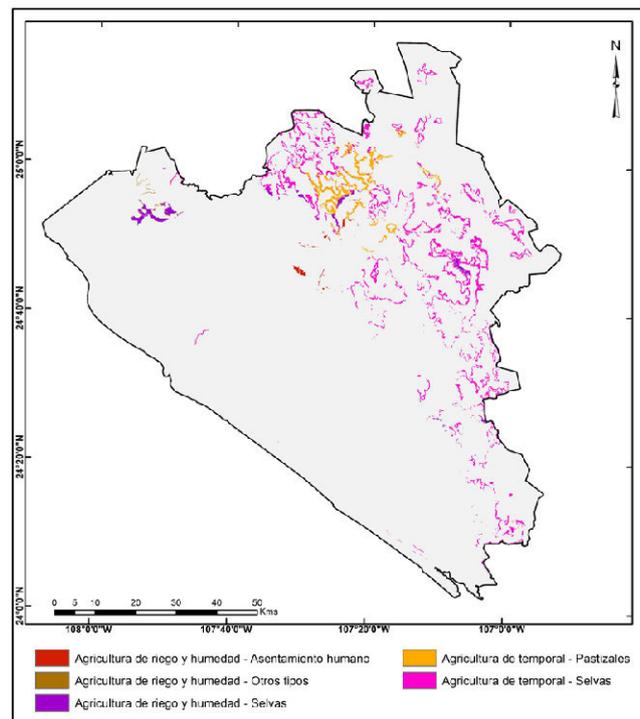


Figura 15. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de Sostenibilidad

V. CONCLUSIONES

Podemos concluir que en el presente estudio se han desarrollado y aplicado con éxito los modelos de simulación que nos permitieron obtener los dos escenarios planteados, utilizando algunos aspectos metodológicos novedosos y proponiendo un marco metodológico integral.

En primera instancia, de acuerdo con los resultados obtenidos respecto a los cambios de uso de suelo, se ha comprobado que en los municipios de Culiacán y Navolato se han presentado importantes cambios en el uso y ocupación del suelo en el periodo analizado. Observamos que el territorio tiene una tendencia a la pérdida de coberturas forestales, en particular de las selvas presentes en la región, y al incremento de las superficies artificiales; como los asentamientos humanos, la agricultura de temporal y la agricultura de riego.

Dicha dinámica no nos garantiza que nuestro territorio soporte tal presión en el futuro cercano, por ello, la necesidad de evaluar dos escenarios futuros, uno que nos marque las pautas de tendencia en dichas dinámicas de usos de suelo y uno alternativo, planteada en un desarrollo sostenible.

A pesar de la aparente sencillez de los módulos y programas informáticos utilizados, la simulación de los modelos requirió de un esfuerzo importante, sobre todo para definir los criterios y factores que deberían utilizarse para estructurar la base de datos geográfica, así como para normalizar cada uno de los factores, pues este es un paso determinante para obtener buenos resultados. La aplicación de una metodología combinada de técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica resultó ser muy práctica para sistematizar y agilizar procesos complejos que se dan en este tipo de modelos.

Se aplicaron algunos aspectos metodológicos novedosos en este campo, principalmente, en la modelización de los factores, como es el caso del factor de proximidad inversa a USyV. Otro aspecto relevante fue el uso de modelos normativos para implementar diferentes escenarios de futuro (tendencia y sostenibilidad). Dichos escenarios proporcionan información importante sobre los potenciales impactos ambientales, terri-

toriales y económicos que podrían ocasionar la continuación de las actuales políticas de planificación (escenario de tendencia) y/o alternativas de desarrollo más sostenibles (escenario de sostenibilidad).

También es relevante mencionar, el diseño y desarrollo de un modelo sencillo, pero robusto, que permitió la estimación de la demanda de usos de suelo, considerando solamente las transiciones entre estos usos, lo cual constituye una valiosa aportación. Pues se emplearon solamente dos mapas de usos de suelo de distintas fechas, a partir de los cuales, fue posible calcular la demanda que esos usos tendrían en una fecha futura. Es decir, a diferencia de otros modelos presentados en otros trabajos, no se han utilizado variables externas de tipo socioeconómico o demográfico, lo cual constituye un avance en la obtención de la demanda de suelo en escenarios de simulación de usos de suelo (Corrales Barraza, 2016).

De esta manera, el planteamiento metodológico seguido para la implementación de los escenarios es factible de ser utilizado para generar otras líneas evolutivas que podrían ser propuestas por los entes involucrados en la planificación del territorio. Además, la metodología planteada podría ser extrapolada a otros lugares y escenarios, pudiendo involucrar nuevas variables que permitirán enriquecer cada vez más los resultados obtenidos.

Finalmente, decir que los modelos y escenarios de futuro podrían servir para discutir exhaustivamente sobre los desequilibrios o beneficios que pueden ocasionar en el territorio si sigue una línea evolutiva u otra de las presentadas en los escenarios. Asimismo, estos escenarios de usos de suelo a futuro pueden convertirse en una herramienta útil para el diseño de la planificación territorial y en un instrumento para reparar posibles desequilibrios de los usos del suelo a nivel local y regional. Además, se presentan como algo novedoso, ya que no existe en la región otro tipo de análisis de esta índole, si bien en el Plan Director de Desarrollo Urbano de Culiacán se realiza la construcción de diferentes escenarios (Tendencial, Probable y Deseable), éstos se apegan solo a descripciones cualitativas de cada uno de ellos y están referidos solo al área urbana de la ciudad de Culiacán.

REFERENCIAS

- Aguilar Rivera, N., Galindo Mendoza, G., Fortanelli Martínez, J., & Contreras Servin, C. (2010). Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 144-154.
- Corrales Barraza, G. (2016). Simulación de Escenarios de Uso y Cobertura de suelo, mediante Técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. Caso de estudio: Culiacán y Navolato. (Tesis de maestría): Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México.
- Cuevas García, G., & Mas Causel, J. (2008). Aplicación de un modelo espacial para la elaboración de escenarios de uso/ cobertura del suelo en la Huacana, Michoacán. México, D.F. México, D.F.
- Franco Prieto, C. (2010). Desarrollo de un modelo basado en Análisis Espacial Multicriterio para la determinación de unidades de Ordenación Forestal. Caso Departamento del Casanare. Bogotá D.C., Colombia.
- Gómez Delgado, M., & Barredo, J. (2005). Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio aplicados al Ordenamiento del Territorio. Madrid: Ra-Ma.
- Henríquez, C., Azócar, G., & Romero, H. (2006). Monitoring and modelling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International* N° 30., 945-964.
- Ibarra Montoya, J., Román, R., Gutiérrez, K., Gaxiola, J., Arias, V., & Bautista, M. (2012). "Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático".
- INEGI. (2010). Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/>
- IPCC. (2000). Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.: Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds) .

- López Beltrán, M., Aguilar Villegas, J., & Plata Rocha, W. (2014). Integración de imágenes del sensor MODIS y cartografía temática para la simulación de modelos geoespaciales para obtener zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa, México. Culiacán, Sinaloa, México.
- Mahesh Kumar, J., & Garg Deepak, K. (2008). Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, N° 10., 26-43.
- Mas, J.-F., & Sandoval, A. F. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*.
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books Publishers.
- Mustard, J., Defries, R., Fisher, T., Moran, E., & 2004. (2004). "Land-Use and Land-Cover Change Pathways and Impacts". Springer.
- Pérez Verdín, G., Hernández Díaz, J., Márquez Linares, M., & Teclé, A. (2009). Aplicación de técnicas multicriterio en el manejo integral forestal en Durango, México. *Madera y Bosques*.
- Pineda Jaimes, N. (2010). Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante Tecnologías de la Información Geográfica. Alcalá de Henares, Madrid: (Tesis de Doctorado).
- Pontius, R., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251-268.
- Roldán López, H. (2006). *La Urbanización Metropolitana de Culiacán*. Culiacán, Sinaloa, México: Gobierno de Sinaloa: Fontamara.
- Verbarg, P., Kok, K., Pontius, R., & Veldkamp, A. (2006). Modeling land-use and land-cover change. En E. L. Geist (Ed.), *Land-use and land-cover change. Local processes and Global Impacts*. (págs. 117-135). Berlin: Springer.
- Von Thaden Ugalde, Clark Tapia Ricardo, & Venegas Barrera, C. (2012). Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el Municipio de Guelatao de Juárez, Oaxaca, México. Oaxaca, México.
- WRI, W. (2005). Millennium Ecosystem Assessment. En *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis* (pág. 68). Washington, DC.

Análisis geográfico para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia de residuos agropecuarios en la provincia de Manabí, Ecuador

Freire Sandy¹, Villamar Cristina Alejandra^{*1}, Zapata Ríos Xavier¹

¹ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental/Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental/ Escuela Politécnica Nacional
Ladrón de Guevara E11-253 /Pichincha/Ecuador
sandy.freire@epn.edu.ec /
cristina.villamar@epn.edu.ec* /
xavier.zapata@epn.edu.ec

RESUMEN

En el Ecuador, potencialmente se generan alrededor de 140 mil ton/día de residuos pecuarios (porcinos y bovinos) y alrededor de 8,9 ton/ha de cultivos de transición (maíz y arroz). La generación de residuos agropecuarios trae consigo problemas ambientales, sociales y económicos, por lo que su gestión es prioritaria. La co-digestión anaerobia, es una alternativa tecnológica viable porque a partir de los residuos agropecuarios potencia el valor energético (biogás) y agronómico (residuos estabilizados). En el sector rural, la sostenibilidad de las tecnologías de tratamiento de residuos (re-valorización), depende de la disponibilidad permanente de éstos, condición que puede lograrse con plantas centralizadas. El objetivo de este estudio, fue analizar geográficamente la generación de residuos agropecuarios sobre un espacio geográfico definido por ser altamente productivo a nivel productor agropecuario y necesarios para la implantación teórica de plantas de co-digestión anaerobia para residuos agropecuarios locales, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y considerando criterios de sustentabilidad. La metodología se basó en el uso de bases de datos agropecuarios y mapas temáticos de la provincia de Manabí, definida previamente como la zona geográfica con mayor potencial de generación de este tipo de residuos en el Ecuador. La información cartográfica y censal utilizó Procesos de Jerarquía Analítica (PJA) para dar peso a ciertas restricciones y álgebra de mapas para establecer restricciones físicas, ambientales, sociales y económicas que permitan delimitar las zonas sustentablemente adecuadas para estos fines. Los resultados obtenidos, permitieron establecer áreas delimitadas en la zona geográfica de estudio, con mayor (> 50 ton Sólidos Volátiles o SV) a menor (< 10 ton SV) potencial energético y agronómico. En conclusión, los modelos geográficos basados en SIG permiten establecer zonas apropiadas para la gestión y planificación en el tratamiento y re-valorización de residuos agropecuarios, es decir es una herramienta eficaz en la toma de decisiones a nivel territorial.

Palabras clave: **co-digestión anaerobia, estiércol animal, residuos de cultivos, análisis GIS.**

ABSTRACT

In Ecuador are potentially generated approximately 140,000 ton/day of livestock waste (pigs and cattle) and about 8.9 tonnes / ha of transitional crops (maize and rice). The generation of agricultural waste cause environmental, social and economic problems,

therefore its management is a priority. Anaerobic co-digestion from agricultural wastes is a viable technological alternative because it increases its energetic value (biogas) and agronomic properties (stabilized waste). In the rural sector, the waste treatment technologies sustainability depends on the permanent availability of these wastes, condition that can be achieved with centralized plants. The objective of this study was to analyze geographically the wastes agriculture generation on a highly productive geographical space at the agricultural level by this productivity activity, in where will theoretically implant anaerobic co-digestion plants using Geographic Information Systems (GIS) and considering sustainability criteria (social, economic and environmental). The methodology was based on the use of agricultural databases and thematic maps of the Manabí province, which has the highest agricultural potential of this type of waste generation in Ecuador. The cartographic and census information used the Analytical Hierarchy Process (AHP) to give weight to certain constraints and maps algebra to establish physical, environmental, social and economic constraints that allow the sustainable delimitation of areas. The results obtained allowed to establish areas delimited within the study area, with greater (> 50 ton Volatile Solids or VS) to smaller (<10 ton VS) energetic and agronomic potential. In conclusion, geographical models based on GIS allow the delimitation of appropriate zones for the management and planning in the treatment and re-valorization of agricultural residues, that is to say it is an effective tool for decision making at territorial level.

Keywords: Anaerobic co-digestion, animal manure, crop residues, GIS analysis.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, gracias a la revolución verde (agricultura) y la ganadera (pecuaria) ha crecido la producción y consumo de cereales y carne en los últimos 30 años (FAO, 1996). Actualmente, países en vías de desarrollo y emergentes (América Sur y Central y Asia), son los principales productores de estos insumos (FAO, 2016). Asia, lidera en producción de carne de ganado primario con casi 125 millones de toneladas de carne en el año 2010 y en producción de arroz con 667 millones de toneladas en el año 2014 (FAOSTAT, 2016). A nivel nacional, la actividad agropecuaria es uno de los ejes primordiales para la economía del Ecuador, pues su participación al PIB (Producto Interno Bruto) Nacional oscila entre el 8 al 9% (Monteros et al., 2015). De acuerdo a la última Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, para los rubros porcino y bovino existen alrededor de 4,12 y 1,64 millones de cabezas de ganado, respectivamente. Mientras, el rendimiento de producción de cultivos transitorios se encuentran en 4,41 y 4,47 ton/ha de arroz y maíz duro seco, respectivamente. Manabí, es una de las provincias con mayor producción agropecuaria, pues genera alrededor de 392 mil ton de cultivos transitorios (arroz y maíz duro seco) y alrededor de 894 mil cabezas de ganado vacuno al año (ESPAC-INEC, 2015).

Dentro de la actividad agropecuaria, la generación de residuos (excretas animales y restos vegetales) puede traer problemas ambientales, sociales y económicos por lo que su gestión es prioritaria (Menzi et al., 2010). Desde el punto de vista ambiental, el uso de excretas animales sin tratamiento en la agricultura, puede causar cambios en las características agronómicas del suelo, toxicidad por la presencia de metales y antibióticos y lixiviación de nutrientes a aguas subterráneas (Herrero y Gil, 2008). Algunos estudios, reportan además que el estiércol aplicado en grandes cantidades como fertilizante en climas áridos y semiáridos conduce a la salinización del suelo debido al alto contenido de cloruro de potasio y sodio (KCl, NaCl) (FAO, 1996). En el agua y por efecto de descarga directa o escorrentía de residuos agropecuarios, existen riesgos de contaminación orgánica, microbiológica y eutrofización (FAO, 1996). El almacenamiento de residuos agropecuarios, es fuente de emisiones a la atmósfera tales como gases de efecto invernadero (CH₄, CO₂, NO₂) y olores (NH₃, COV, etc) (Hristov et al., 2013; Jongbloed y Lenis, 1998). En adición a los daños ecológicos, a escala socio-económica los residuos agropecuarios no tratados pue-

den incidir en la salud pública, molestias, pérdida de calidad de vida y un incremento en costos económicos por reparación ambiental (Osterberg y Wallinga, 2004; Sims y Wolf, 1994).

El tratamiento de los residuos agropecuarios, surge como la herramienta de mitigación y gestión más eficaz dentro del rubro. El componente orgánico, medido como Sólidos Volátiles (SV) y que para residuos pecuarios está entre 48 a 64 kg SV/ton y residuos agrícolas entre 731 a 873 kg SV/ton, favorece el uso de tecnologías de tratamiento biológico (Angelidaki y Ellegaard, 2003). La digestión anaerobia es el proceso de conversión microbiana de la materia orgánica en ausencia de oxígeno para la obtención de biogás (Lettinga, 1995; Flores, 2014). Los principales sub-productos del proceso microbiológico son biogás constituido en casi un 70% por metano, el cual posee valor energético y un residuo tratado-estabilizado con propiedades agronómicas (Ward et al., 2008; Flores, 2014). Los últimos estudios en este ámbito, apuntan a la optimización en la producción del biogás a partir de la mezcla de sustratos orgánicos (Álvarez y Lidén, 2008; Li et al., 2009). La co-digestión anaerobia es el proceso de digestión simultánea de dos o más sustratos para mejorar la producción de biogás, pues las características de los sustratos se complementan de manera que se equilibra la cantidad de nutrientes (Álvarez y Lidén 2008). Durante este proceso, el uso de estiércol animal que es rico en proteínas, otorga una fuente abundante de nutrientes, agua y alcalinidad a la mezcla (Angelidaki y Ellegaard, 2003). Mientras, los residuos vegetales ricos en carbohidratos y otros compuestos carbonáceos como la lignina y celulosa, incorporan una fuente de carbono equilibrando la relación carbono-nitrógeno C:N del estiércol (Atandi y Rahman, 2012). La relación ideal de C:N para llevar a cabo el proceso anaerobio está en el orden de 25-30:1, condición que puede ajustarse al mezclar sustratos (Ward et al., 2008). Estudios al respecto, mencionan que la inclusión de residuos agrícolas en un 30% en procesos de co-digestión anaerobia, incrementan la producción de biogás entre 16 a 65% respecto a la degradación del estiércol por si solo (Kalamaras y Kotsopoulos, 2014; Lehtomäki, et al., 2007; Tufaner y Avşar, 2016).

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en el ámbito de manejo de residuos agropecuarios ha sido desarrollado por algunos autores. Basnet et al. (2002), utilizaron esta herramienta para identificar y ubicar residuos agropecuarios a escala de cuenca. En Grecia, se utilizó las herramientas

de SIG para estimar la producción de biogás del estiércol de ganado utilizando datos georreferenciados y se obtuvieron modelos predictivos de la producción de energía disponible y biogás (Batziás et al., 2005). En Asia, se han realizado modelos espaciales mediante la utilización de SIG para evaluar los impactos generados por la producción ganadera (Gerber et al., 2005). En Latinoamérica, algunos estudios hacen una aproximación del uso de SIG para el establecimiento de plantas de tratamiento de residuos agropecuarios con un enfoque de valoración energética (Villamar et al., 2016). Pese a que se han realizado estudios similares en varios países, este tipo de análisis aún no se ha hecho en el Ecuador, considerando el potencial energético y agronómico que tiene nuestro país. Además, no se ha establecido valoración geográfica entre los sub-productos obtenidos (biogás, residuos estabilizados) y las zonas donde es factible utilizarlos. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo, analizar geográficamente zonas factibles para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia a partir de residuos agropecuarios basándose en criterios de sustentabilidad ambiental, económica y social en una zona geográfica en el Ecuador que reporte mayor producción agropecuaria.

II. MÉTODO

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está comprendida por el territorio ecuatoriano. La República del Ecuador se ubica al noroeste de América del sur; el territorio continental se localiza entre las latitudes 01° 28' N (desembocadura del río Mataje) a 05° 02' S (afluencia quebrada San Francisco) y de longitud 75°11' W (confluencia ríos Napo y Aguarico) a 81° 04' (Isla de La Plata). Limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico y tiene una extensión total de 256 370 km² (IGM, 2014). El territorio Ecuatoriano se organiza territorialmente en: Parroquias, las cuales conforman los Cantones, estos las Provincias, y estas a su vez las Regiones Administrativas; cada una de estas entidades y los Distritos Metropolitanos tienen un Gobierno Autónomo Descentralizado, encargado de ejecutar políticas dentro de su ámbito (COOTAD, 2015). Es el octavo país más poblado de Latinoamérica, con alrededor 16,44 millones de habitantes (INEC, 2016). Presenta un clima muy variado debido a la presencia de la cordillera de los Andes y según la influencia del mar, el Ecuador continental se halla climatológicamente dividido en: climas húmedos cálidos, climas subhúmedos y climas secos (Moya, 2006). Ecuador es considerado como uno de los países biológicamente más ricos a nivel mundial ya que cuenta con las más variadas formas de vida en su flora, fauna y microorganismos, en su diversidad genética y en su variedad de ecosistemas (IGM, 2014).

FUENTES DE INFORMACIÓN

La información cartográfica necesaria para este proyecto de investigación fue basada en coordenadas geográficas UTM proyectadas en DATUM WGS84 en la Zona 17S. Los datos espaciales fueron coberturas vectoriales del área de estudio a nivel cantonal y correspondientes a la división administrativa (provincia/cantón/parroquia), densidad poblacional (centros residenciales), cuerpos de agua (ríos y lagunas) y viabilidad (IGM, 2013). Los datos espaciales de coberturas vectoriales del uso de suelo y aptitud agrícola se obtuvieron del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP (2003).

La información espacial y alfanumérica respecto a la producción de cereales (arroz y maíz) y al número de cabezas de gana-

do porcino, bovino y avícola a nivel parroquial se obtuvieron del Censo Agropecuario disponible en Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP (2016). Los cálculos de cantidad de materia orgánica y la producción de metano de cada tipo de residuo se basaron en los valores teóricos descritos en la Tabla I. Mientras que el potencial energético se obtuvo a partir de la transformación de 1 m³ de metano equivale a 0,01MW-h descrito por Ishikawa et al. (2006).

TABLA I
VARIABLES CONSIDERADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS AGROPECUARIOS

RUBRO	CANTIDAD DE RESIDUO (kg/animal d) o (t/ha)	MATERIA ORGÁNICA (kg SV/t)	PRODUCCIÓN DE METANO (m ³ /kg SV)
Avícola	0,1 ⁴	160 ¹	0,3 ¹
Bovino	10 ⁴	160 ¹	0,2 ¹
Porcino	1,5 ⁴	160 ¹	0,3 ¹
Arroz	Variable de acuerdo a cada hacienda ³	81,09% del peso del residuo ²	0,24 ¹
Maíz		94,97% del peso del residuo ⁵	0,24 ¹

Fuente: 1Angelidaki y Ellegaard (2003), 2Jabeen et al. (2015), 3MAGAP, SINAGAP (2016), 4Montalvo y Guerrero (2003), 5Zou et al. (2016).

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

La selección de la provincia con mayor potencial energético se realizó mediante la comparación de los datos de producción agrícola obtenidos por el MAGAP del año 2016. El análisis de la información geográfica se realizó con el software ArcGIS 10.2.1 de ESRI, considerando ciertos criterios y factores de limitación. Los criterios de limitación de las áreas con disponibilidad de residuos agropecuarios a nivel parroquial, suponen restricciones económicas: proximidad de la planta de co-digestión anaerobia los residuos resultantes de la actividad agropecuaria (Al Seadi, 2000), generación de materia orgánica mayor a 10 toneladas por día y red de energía mediante las líneas de transmisión (Ma et al., 2005). Restricciones sociales: las cuales se enfocan en los problemas potenciales de olores debido a la proximidad de las áreas residenciales y rutas o vías de acceso (Ma et al., 2005; Pan et al., 2007). Restricciones ambientales: que son aquellas zonas protegidas o bosques, cuerpos de agua superficiales cercanas a las plantas de co-digestión (Ma et al., 2005). Finalmente restricciones físicas: comprendidas como zonas de inundación y pendientes del terreno (Ma et al., 2005). Estos criterios son indispensables para la determinación de sitios sustentables y viables para el emplazamiento de tecnologías centralizadas de co-digestión anaeróbica. Adicionalmente, las coberturas económicas se consideraron como factores de importancia a los cuales se asignó su respectivo peso de aceptabilidad de acuerdo al Proceso de Jerarquía Analítica (PJA) descrito por Saaty (1990). El PJA es una herramienta que captura los aspectos cuantitativos y cualitativos de la información que facilita la toma de decisiones multicriterio (Ma et al., 2005). El PJA permite la comparación de las alternativas en pares para asignarles pesos de importancia. La Tabla II resume la escala de intensidad de importancia para la comparación de pares de alternativas de los factores seleccionados.

Los pesos de importancia de los factores económicos fueron sometidos al Radio de Consistencia (RC) determinado por las ecuaciones:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

determina la contribución de toneladas de materia orgánica en la determinación de zonas factibles para la implantación de sistemas de co-digestión anaerobia según su uso de suelo. A nivel de fincas, se observa en la Figura 4 que en la época de invierno para arroz y maíz si se sobrepasa las 10 t SV; mientras que, para la época de verano la cantidad no sobrepasa las 10 t SV para arroz y en maíz solamente se observa que una finca sobrepasa las 10t SV/d. Además, se constata que el cereal que aporta mayor cantidad de materia orgánica es el maíz en época de invierno con valores totales de 3140,6 t SV/d en la provincia. La materia orgánica total proveniente del arroz en el ciclo de invierno fue de 177 t/día para el año 2016. En el tercer cuatrimestre de producción de arroz, la cantidad de SV disminuyó a 7,3 t/d en el total de la provincia de Manabí. Para el caso de maíz en el ciclo de invierno en las parroquias Sucre, Rocafuerte, Calceta y Junín la cantidad de SV sobrepasó las 50 t/d; mientras, que en verano no sobrepasó las 29 t SV/día. Con respecto al uso de suelo los residuos generados por la producción de arroz y maíz potencialmente ocupan zonas con propiedad agropecuaria, debido a que el mayor uso de suelo de la población está destinado a tierras agrícolas. Por otro lado, en el periodo de invierno, tanto el maíz como el arroz se distribuyeron cerca de los cuerpos de agua y ocuparon algunas zonas de bosques.

La Figura 5 resume la distribución de materia orgánica (t SV/d) del estiércol de ganado en la provincia de Manabí a nivel de fincas. Con respecto al estiércol de ganado avícola, la generación de SV no alcanzó las 10 t/d, localizándose en las parroquias: Abdón Calderón, Andrés de Vera, Ángel Pedro Giler, Ayacucho, Bahía de Caraquez, Calceta, Canuto, Chone, Colón, El Anegado, El Carmen, El Colorado, Flavio Alfaro, Jipijapa, Junín, La Pila, Leonidas, Plaza Gutiérrez, Lodana, Montecristi, Picoaza, Ricaurte, Rocafuerte, San Pedro de Suma, Santa Ana, Santa Rita, Sucre y Wilfrido Loor Moreira. Para este rubro, en total se generó 91,3 t SV/d en la provincia de Manabí. Para el rubro porcino la cantidad de SV no sobrepasó las 10 t/d en cada parroquia. La parroquia Wilfrido Loor Moreira generó la mayor cantidad de SV procedentes de ganado porcino con 1,21 t/d, en total se generó 3 t SV/d en la provincia de Manabí. Por otro lado, el ganado bovino se distribuyó a lo largo de toda la provincia de Manabí, pero cada finca no superó las 10 t SV/d. En total, se generó 1.435 t SV/d procedente del ganado bovino en la provincia de Manabí. Además, respecto a la Figura 5 y relacionado con el uso de suelo, el ganado avícola y porcino ocuparon algunas zonas destinadas a tierras agropecuarias; mientras, que el ganado bovino se localizó en zonas de bosques, cuerpos de agua, tierras agropecuarias y en vegetación arbustiva de la provincia de Manabí. Esta condición revela el tipo de actividad pecuaria existente en la provincia, basada en producción intensiva y semi-intensiva de ganado porcino y avícola y de tipo extensiva para el ganado bovino.

Los pesos de importancia de los factores según el PJA obtenidos fueron: 0,64 para el factor de proximidad de los posibles sitios de implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia a las haciendas; 0,28 para el factor de proximidad a las vías de transporte y 0,07 para el factor proximidad a las líneas de transmisión de energía. Se determinó que el factor que tiene un gran peso de importancia es la proximidad de los posibles sitios de implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia a las haciendas; mientras que la proximidad a las líneas de transmisión de energía representa un menor peso de importancia en comparación con los otros dos factores: proximidad a las haciendas, proximidad a las vías de transporte.

Las Figuras 6 y 7 describen las zonas factibles en función de las restricciones físicas, económicas, sociales y ambientales para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia en época de invierno y verano respectivamente en la provincia de Manabí. Las restricciones físicas están comprendidas por las pendientes mayores al 15% y por las zonas de inundación. Las restricciones económicas están comprendidas por las distancias menores a 200 metros de la red de energía (líneas de transmisión), proximidad de las haciendas y terrenos de agricultura a las zonas factibles y las cargas de residuos mayores a 10 t SV/d. Las restricciones sociales están comprendidas por la distancia a las zonas pobladas debido a la generación de olores y distancia a los caminos. Finalmente, las restricciones ambientales definidas por las áreas correspondientes a cuerpos de agua dulce (ríos y lagunas), áreas de protección ambiental (bosques) y aguas subterráneas no permeables. En total las zonas no restringidas en época de invierno se localizan en 30 parroquias al sur de la provincia de Manabí y corresponde a un área de 1524,3 km² (8%) de la provincia. En época de invierno las zonas no restringidas o de factibilidad se localizan en la parroquia de Portoviejo ocupando un área de 33,35 km² (0,17%) de la provincia como lo indica la Figura 7.

Con respecto al potencial de generación de energía procedente de los residuos agropecuarios en las zonas factibles para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia en la provincia de Manabí en invierno y verano respectivamente se obtuvo que el mayor potencial energético lo aportan los cereales (arroz y maíz) con 7582,7 MW-h de energía a partir de biogás, seguidamente el ganado bovino con 1155 MW-h, luego el ganado avícola con 195 MW-h y por último el ganado porcino que aporta con 4,1 MW-h de energía a partir de biogás. En total en la época de invierno en las parroquias factibles a ser implantados dichos sistemas de tratamiento se generarían 8937,2 MW-h de energía procedente de los residuos agropecuarios. Mientras que en la época de verano la parroquia de Portoviejo aporta con 10,5 MW-h a la provincia de Manabí.

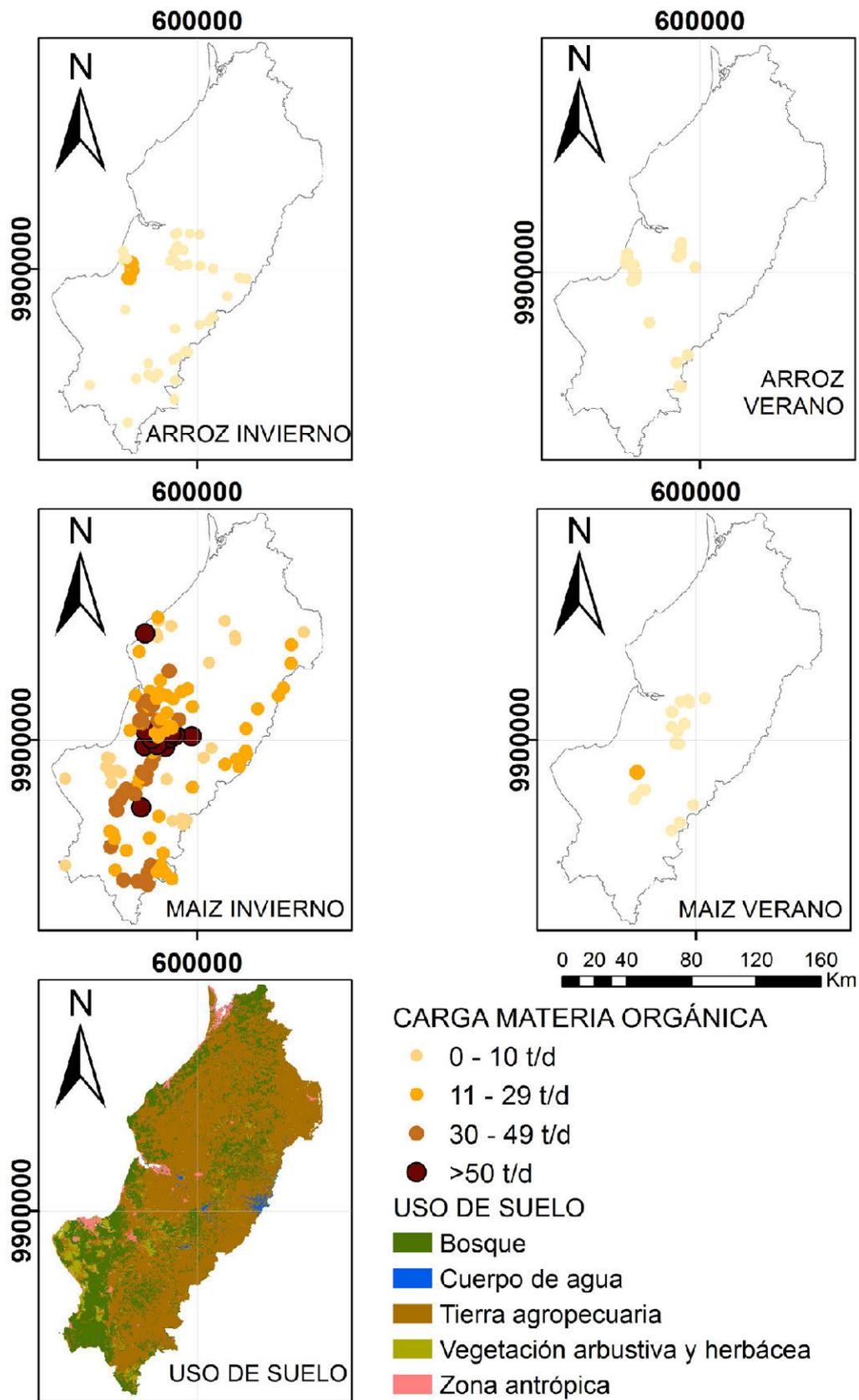
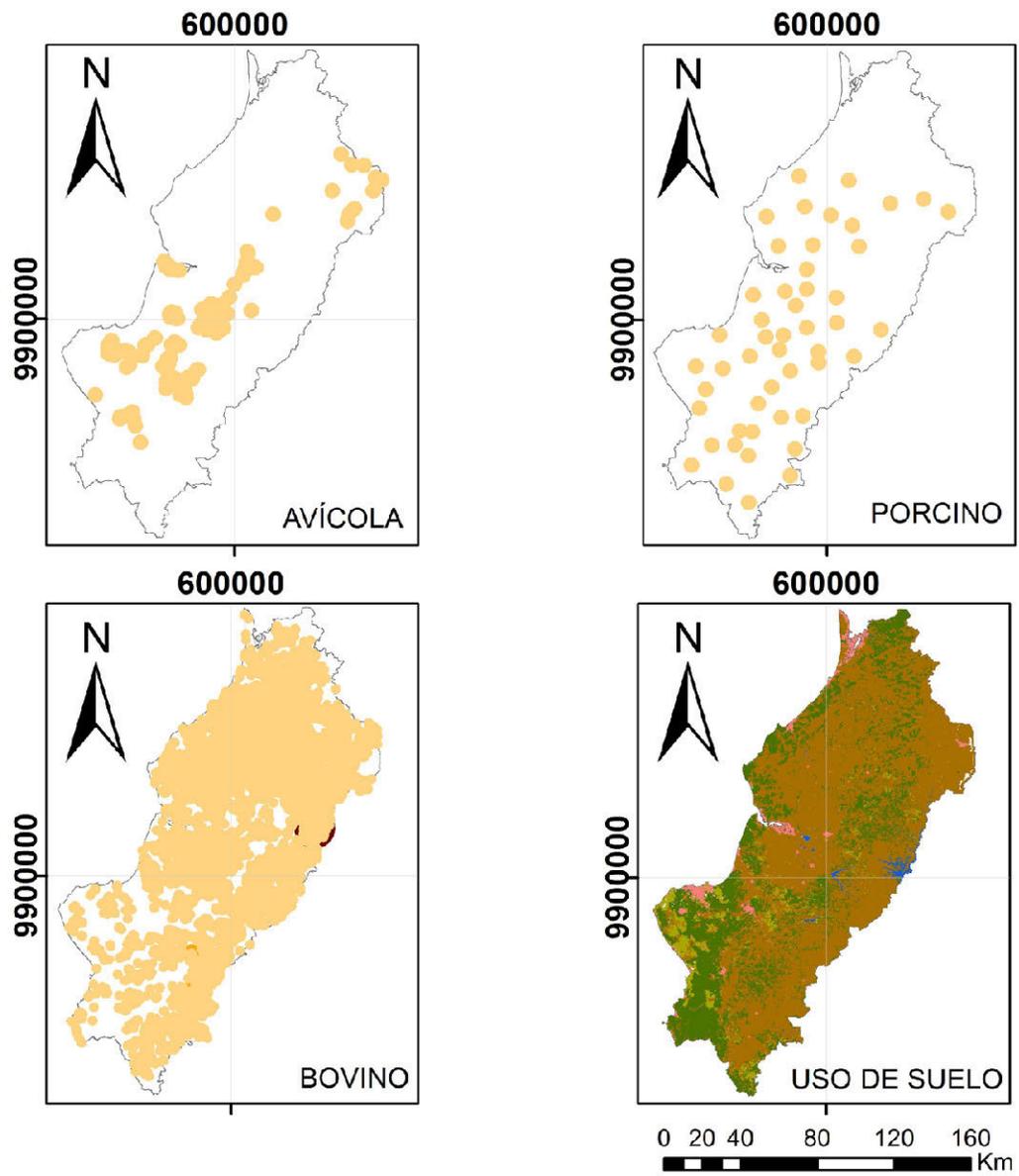


Figura 4. Distribución en invierno y verano del contenido de materia orgánica de cereales en fincas en la provincia de Manabí expresado en toneladas por día (representado en círculos) y uso de suelo a nivel de la provincia de Manabí.



TONELADAS DE SÓLIDOS VOLÁTILES

- 0 - 10
- 11 - 29
- 30 - 49
- >50

USO DE SUELO MANABI

- Bosque
- Cuerpo de agua
- Tierra agropecuaria
- Vegetación arbustiva y herbácea
- Zona antrópica

Figura 5. Distribución de materia orgánica en toneladas por día de ganado avícola, bovino y porcino en Manabí (representado en círculos) y uso de suelo en esta provincia

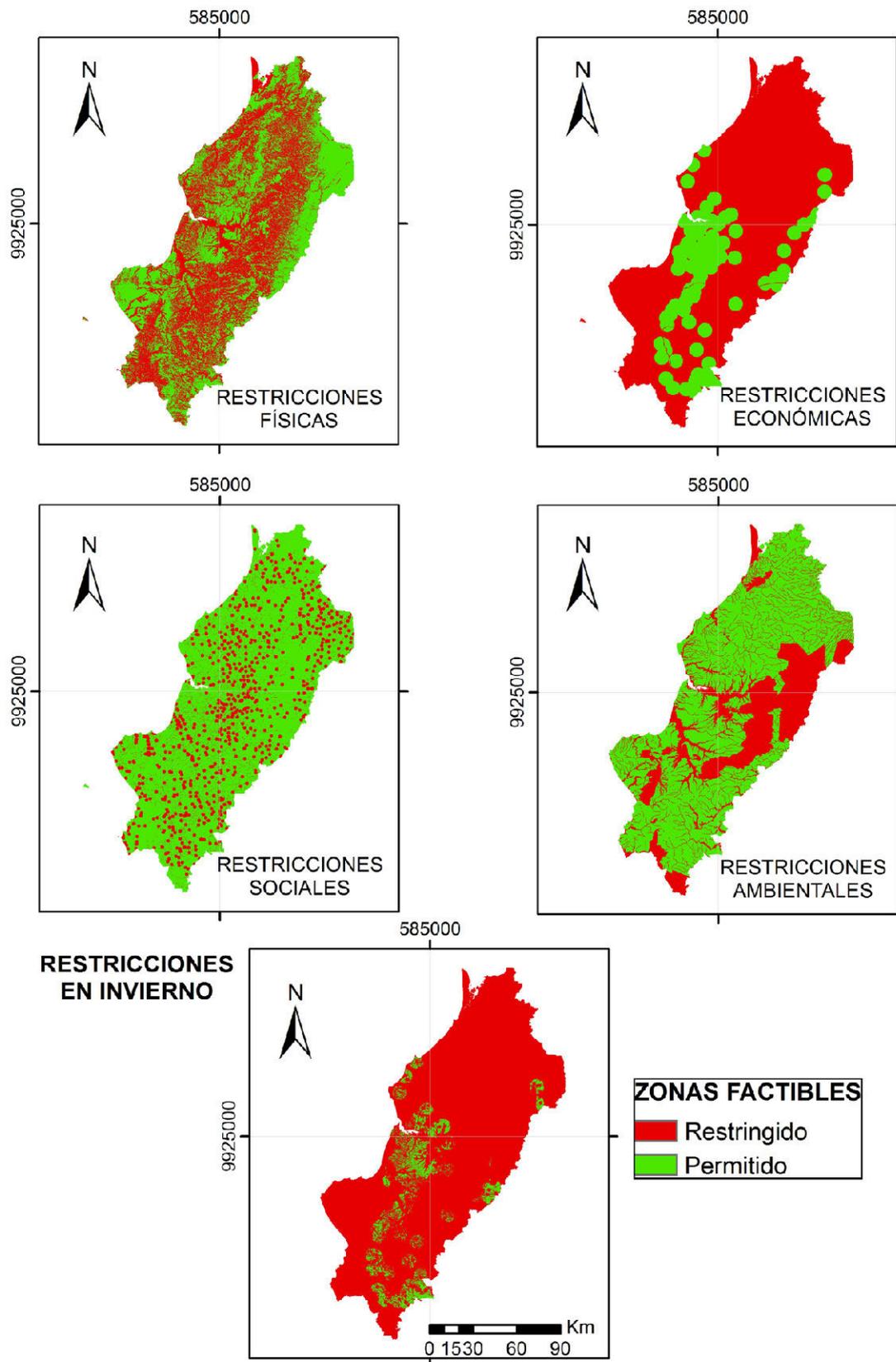


Figura 6. Zonas factibles en función de las restricciones físicas, económicas, sociales y ambientales para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia en época de invierno en Manabi

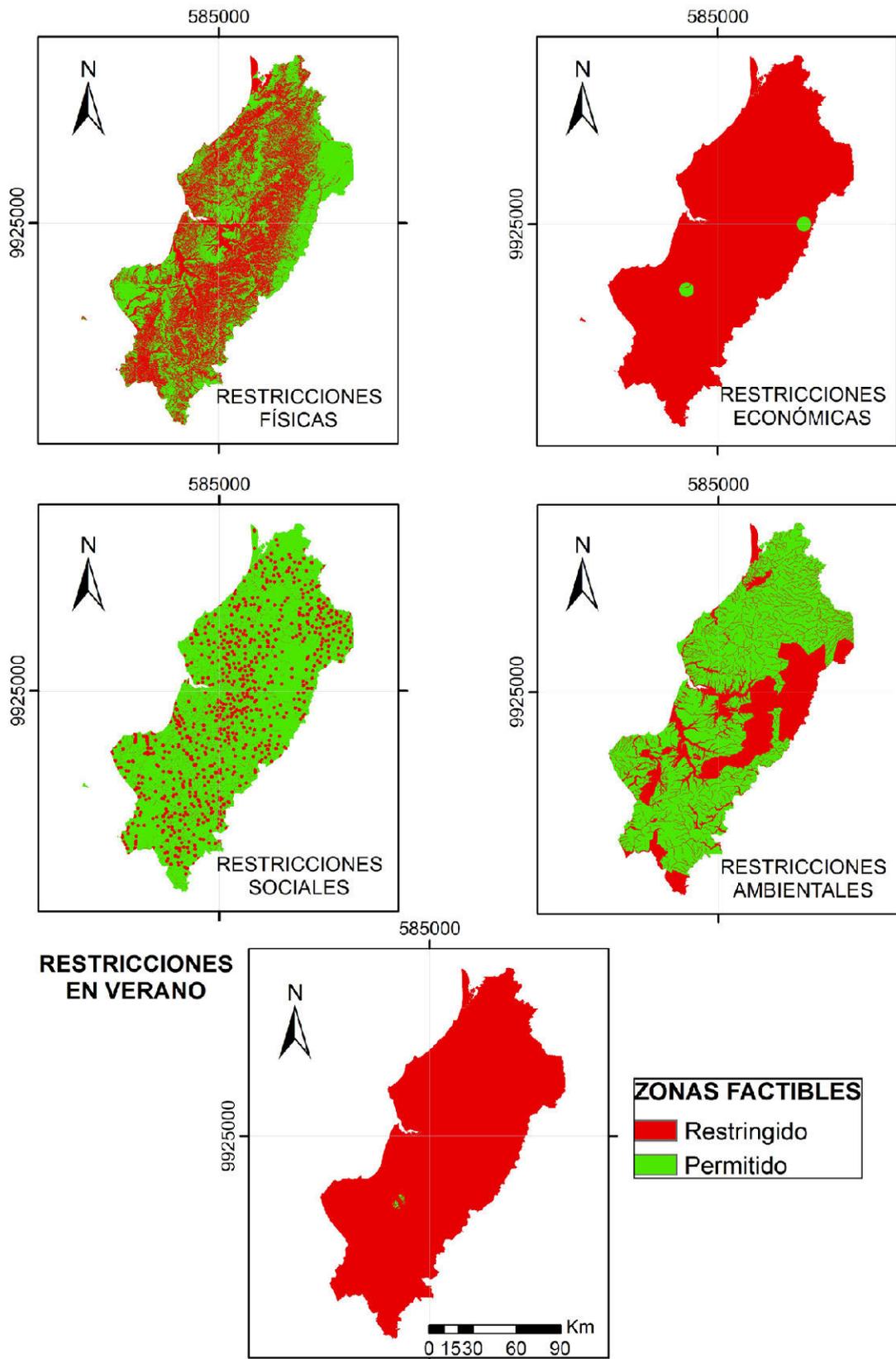


Figura 7. Zonas factibles en función de las restricciones físicas, sociales, económicas y ambientales para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia en época de verano en Manabí

IV. CONCLUSIONES

La provincia de Manabí es la más adecuada para la re-valorización de residuos agropecuarios a partir de co-digestión anaerobia, pues consta con la mayor superficie de labor agropecuaria a nivel nacional y su producción agropecuaria con respecto a cereales y ganadería es representativa del total nacional. Adicionalmente, en Manabí existe una mayor producción de materia orgánica de residuos provenientes del maíz en la época de invierno, los cuales sobrepasan las 50 toneladas de SV por día en las parroquias Sucre, Rocafuerte, Calceta y Junín. Mientras, que el ganado bovino lidera en producción total de materia orgánica en toda la provincia de Manabí, pues su distribución cubre casi toda la provincia. La razón radica que en producción ganadera, Manabí lidera a nivel nacional. El ganado bovino, en esta provincia ocupa zonas importantes de vulnerabilidad ambiental como cuerpos de agua y bosques, lo cual implica un estudio posterior enfocado a tratamiento que no considere este espacio físico en la provincia.

Con respecto a la importancia de los factores, la proximidad de las haciendas a las zonas factibles de implantación de sistemas de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia de residuos agropecuarios tiene un gran peso de importancia frente a los factores de proximidad a las vías de transporte y líneas de transmisión de energía porque la materia orgánica

que aporta cada hacienda debe estar lo más próxima posible a los sistemas de tratamiento para que haya una mayor generación de energía y aprovechar al máximo la materia orgánica.

Las zonas establecidas como factibles o de sustentabilidad para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia representan el 8% del área total de la provincia de Manabí en invierno y el 0,17% de la superficie de la provincia en época de verano. Esta gran diferencia se debe a que en época de invierno existe mayor facilidad y acceso a los recursos naturales como el agua y suelo agrícola, mientras que en verano se evidencia la disminución de zonas factibles por la baja producción agropecuaria.

El potencial de generación de energía a partir de biogás en las zonas factibles, correspondió a 8937,2 MW-h en la época de invierno. Mientras que en la época de verano la parroquia de Portoviejo aporta con 10,5 MW-h a la provincia de Manabí.

Por lo tanto, este estudio geográfico preliminar en donde se identificó y cuantificó el potencial de generación de residuos agropecuarios en Manabí, abre oportunidades respecto a identificar las zonas factibles sustentablemente para la implantación de sistemas de co-digestión anaerobia, siendo una fácil herramienta de toma de decisiones en la gestión geográfica de los residuos agropecuarios.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue realizado con la colaboración del Grupo de Investigación en Tecnologías Ambientales (GITA).

REFERENCIAS

- Angelidaki, I. y Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109, 95-105.
- Al Seadi, T. (2000). Danish Centralised Biogas Plants-Plants descriptions. Bioenergy Department, University of Southern Denmark, 27pp.
- Álvarez, R. y Lidén, G. (2008). Anaerobic co-digestion of aquatic flora and quinoa with manures from Bolivian Altiplano. *Waste management*, 28(10), 1933-1940.
- Atandi, E. y Rahman, S. (2012). Prospect of anaerobic co-digestion of dairy manure: a review. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 127-135.
- Basnet, B. B., Apan, A. A., Raine, S. R. (2002). Geographic information system based manure application plan. *Journal of Environmental Management*, 64(2), 99-113.
- Batzias, F. A., Sidiras, D. K. y Spyrou, E. K. (2005). Evaluating livestock manures for biogas production: a GIS based method. *Renewable Energy*, 30(8), 1161-1176.
- COOTAD. Registro Oficial Suplemento 303 de 19-oct.-2010. TITULO II: Organización del territorio. Quito, Ecuador, 16 de enero de 2015
- ESPA-INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2015). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua- ESPAC 2015. Recuperado de: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/> (revisado: febrero, 2017).
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1996). Enseñanzas de la revolución verde: hacia una nueva revolución verde. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/003/w2612s/w2612s06.htm> (revisado: mayo, 2017).
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1996). Environmental Impact of Animal Manure Management. Recuperado de <http://www.fao.org/WAIRDOCS/LEAD/X6113E/x6113e00.htm#Contents> (revisado: abril, 2017).
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). El estado mundial de la agricultura y la alimentación: La ganadería a examen. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/012/i0680s/i0680s00.htm> (revisado: diciembre, 2016).
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2016). La Ganadería y el medio ambiente. Recuperado de <http://www.fao.org/livestock-environment/es/> (revisado: diciembre, 2016).
- FAOSTAT. (2016). Compare data [Gráfico]. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/en/#compare> (revisado: febrero, 2017).
- Flores, T. (2014). Evaluación del comportamiento del proceso de digestión anaerobia, de las aguas residuales del matadero municipal de Cochabamba Rada & Asociados S.A (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Cochabamba, Bolivia. 5-11.

- Gerber, P., Chilonda, P., Franceschini, G., Menzi, H. (2005). Geographical determinants and environmental implications of livestock production intensification in Asia. *Bioresource Technology*, 96(2), 263-276.
- Herrero, M., Gil, S. (2008). Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología austral*, 18(3), 273-289.
- Hristov, A.N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., Firkins, J., Rotz, A., Dell, C., Adesogan, A., Yang, W., Tricarico, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Dijkstra, J., Oosting, S. (2013). Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera - Una revisión de las opciones técnicas para la reducción de las emisiones de gases diferentes al CO₂. Editado por Pierre J. Gerber, Benjamin Henderson y Harinder P.S. Makkar. *Producción y Sanidad Animal* FAO Documento No. 177. FAO, Roma, Italia. 1-6.
- IGM-Instituto Geográfico Militar. (2013). Cartografía de libre acceso. Recuperado de: <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/> (revisado: diciembre, 2016).
- IGM-Instituto Geográfico Militar. (2014). Contextos históricos y políticos generales. *Atlas Geográfico de la República del Ecuador*, 2013, 19-28.
- IGM-Instituto Geográfico Militar. (2014). El medio ambiente. *Atlas Geográfico de la República del Ecuador*, 2013, 245-250.
- INEC-Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2016). Contador poblacional. Recuperado de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>
- Ishikawa, S., Hoshiba, S., Hinata, T., Hishinuma, T., Morita, S. (2006). Evaluation of a biogas plant from life cycle assessment (LCA). *International Congress Series*, 1932, 230-233.
- Jabeen, M., Zeshan, Yousof, S., Haider, M. R. y Malik, R. N. (2015). High-solids anaerobic co-digestion of food waste and rice husk at different organic loading rates. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 102, 149-153.
- Kalamaras, S. D., y Kotsopoulos, T. A. (2014). Anaerobic co-digestion of cattle manure and alternative crops for the substitution of maize in South Europe. *Bioresource Technology*, 172, 68-75.
- Lehtomäki, A., Huttunen, S., y Rintala, J. A. (2007). Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(3), 591-609.
- Lettinga, G. (1995). Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. *Antonie van Leeuwenhoek*, 67(1), 3-28.
- Li, R., Chen, S., y Li, X. (2009). Anaerobic Co-digestion of Kitchen Waste and Cattle Manure for Methane Production. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(20), 1848-1856.
- Ma, J., Scott, R., DeGloria, S., Lembo, A.J. (2005). Siting analysis of farm-based centralized digester systems for distributed generation using GIS. *Biomass and Bioenergy*, 28, 591-600.
- Menzi, H., Oenema, O., Burton, C., Shipin, O., Gerber, P., Robinson, T. y Franceschini, G. (2010). Impacts of Intensive Livestock Production and Manure Management on the Environment. *Island Press*, 1, 1-26.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP. (2003). Catálogo de Datos-Metadatos. Recuperado de: http://geoportal.agricultura.gob.ec/catalogo_datos/visualizador.html
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP. (2014). Censos y Encuestas: III Censo Nacional Agropecuario, Censos Sectoriales: avícola, florícola y Censo de Impacto de Invierno 2012. Recuperado de: <http://sinagap.agricultura.gob.ec/index.php/resultados-censo-provincial> (revisado: diciembre, 2016).
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP. (2016). Catálogo de Datos-Metadatos. Recuperado de: http://geoportal.agricultura.gob.ec/catalogo_datos/visualizador.html (revisado: enero, 2017).
- Montalvo, S y Guerrero, L. (2003). Tratamiento anaerobio de residuos. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Monteros, A y Salvador, S. (2015). Panorama Agroeconómico Del Ecuador Una Visión Del 2015. Dirección de Análisis y Procesamiento de la Información MAGAP, 1-16.
- Moya, R. (2006). Climas del Ecuador. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología -INAMHI-, 1-10.
- Osterberg, D., y Wallinga, D. (2004). Addressing Externalities from Swine Production to Reduce Public Health and Environmental Impacts. *American Journal of Public Health*, 94(10), 1703-1708.
- Pan, L., Yang, S.X., DeBruyn, J. (2007). Factor analysis of downwind odours from livestock farms. *Biosystems Engineering*, 96(3), 387-397.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Sims, J. T., y Wolf, D. C. (1994). Poultry Waste Management: Agricultural and Environmental Issues. *Advances in Agronomy*, 52, 1-83.
- Tufaner, F., y Avşar, Y. (2016). Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(9), 2303-2312.
- Villamar, C. A., Rivera, D., y Aguayo, M. (2016). Anaerobic co-digestion plants for the revaluation of agricultural waste: Sustainable location sites from a GIS analysis. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 34(4), 316-326.
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., y Jones, D. L. (2008). Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940.
- Zou, S., Wang, X., Chen, Y., Wan, H. y Feng, Y. (2016). Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion by ultrasonic pretreatment. *Energy Conversion and Management* 112, 226-235.

Consideraciones metodológicas para la elaboración de una prospección arqueológica utilizando herramientas SIG

Mora Miguel Angel

Ingeniería Catastral y Geodesia/
Facultad de Ingeniería/Universidad
Distrital Francisco José de Caldas
Carrera 8 # 40-62/Bogotá/Colombia
Mamora2011@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo pretende dar a conocer los procesos metodológicos que permiten asociar herramientas tecnológicas (software y hardware) y la disciplina de la arqueología y como la relación entre áreas diversas del conocimiento como la topografía, la geografía por mencionar algunas, pretenden mejorar los procesos arqueológicos mediante estrategias metodológicas, en las cuales, intervienen tanto procesos manuales como informáticos, divididas en fases que dan al ejercicio arqueológico herramientas para visualizar, organizar, archivar y actualizar información de tipo alfanumérica y geográfica permitiendo maximizar los resultados obtenidos en una prospección arqueológica, esto da un valor agregado a la recolección de información por parte del arqueólogo al relacionarla al espacio, generando de esta forma, datos con una mayor calidad, obteniendo análisis diversos de zonas de estudio intervenidas en diferentes lapsos.

Palabras clave: **Sistema de información geográfica, Prospección arqueológica, procesos metodológicos, arqueología, espacio.**

ABSTRACT

This work aims to present the methodological processes that allow to associate technological tools (software and hardware) and the discipline of archeology and how the relationship between different areas of knowledge such as topography, geography to mention some, try to improve the archaeological processes through Methodological strategies, in which both manual and computer processes intervene, divided into phases that give the archaeological exercise tools to visualize, organize, archive and update alphanumeric and geographic information allowing maximize the results obtained in an archaeological survey, this gives a Added value to the collection of information on the part of the archaeologist when relating it to the space, generating of this form, data with a greater quality, obtaining diverse analyzes of zones of study intervened in different periods.

*Keywords: **Geographic information system, Archaeological survey, methodological processes, Archeology, Space.***

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas los Sistemas de Información Geográfica son parte importante en el desarrollo de cualquier proyecto que tenga como aspecto primordial el territorio, la recopilación de información de tipo alfanumérica que se pueda asociar a una porción de espacio cada vez acoge más importancia toda vez que es imperativo no solo conocer la ubicación de un punto en el espacio si no darle a ese punto información representativa para diferentes áreas de conocimiento como lo dice (San Miguel Mate, 1992) "Pese a la multiplicación y mejora de los estudios basados en la prospección y los notables intentos por diseñar un esquema de trabajo para los proyectos de «Arqueología Territorial», se echa en falta en la generalidad de los trabajos un verdadero apartado en el que se recoja el planteamiento de la prospección y se realice un análisis de su desarrollo." Por tal motivo, las soluciones tecnológicas proporcionadas mediante herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) a una disciplina que se considera alejada de la ingeniería como es la arqueología¹, presenta la ventaja que el software actual es de fácil manejo para personas no especialistas, esto permite resolver problemas asociados al registro de la información y su posterior consulta, problemas que ha tenido la arqueología a lo largo de su desarrollo disciplinar, dejando claro que para este tema los sistemas de información geográfica solo son usados como una herramienta para la elaboración de cartografía básica; desde esa premisa el artículo presenta el SIG como una herramienta que traspasa la elaboración de cartografía, esto sucede al poder facilitar las soluciones a los temas inherentes al espacio que necesita resolver la arqueología en el momento de analizar la dimensión tridimensional de los ítems arqueológicos ya sea artefactos o ecofactos².

Es importante mencionar que el proceso de aseguramiento de la información obtenida en el desarrollo de las labores de arqueología en campo ha presentado falencias, posiblemente debido a la cantidad de información que se requiere y que a su vez se genera al momento de hacer una prospección arqueológica³, esto lo evidenció (Arroyo-Bishop, 1991, p. 1) donde manifiesta que la arqueología está obligada a gestionar grandes masas de información, y no solo la creación de esta si no que es necesaria la gestión y conservación de la misma. Debido a que no solo es información del material encontrado sino que también es necesario recolectar información inherente a las características del espacio en donde se realiza la prospección y por ende se ubica el material encontrado, por ejemplo, paisaje, tipo de suelo, profundidades de los hallazgos, entre otras, estas características en la actualidad son obtenidas de una forma manual y no permiten una estandarización de la información porque no se cuenta con alto nivel de aseguramiento o registro de la información. Obviamente esto ha supuesto un fuerte aumento del coste material y humano para poder cumplir los objetivos, limitando la capacidad de abarcar extensiones mayores. (Mayoral Herrera, Cerrillo Cuenca, & Celestino Pérez, 2009, p. 2)

Si bien, estos procesos se pueden generar de una forma manual, es necesario entender que si la información recopilada a lo largo de un proyecto arqueológico se almacena de una

manera organizada que permitirá un mejor resultado, además de ser actualizada continuamente; es en ese punto donde se presenta un problema entre las formas tradicionales de almacenar la información y la aplicación de nuevas herramientas metodológicas que permiten la recolección de información, el archivo de esta y su posterior consulta y actualización; permitiendo esto el tránsito entre la arqueología y la geografía. (Araneda, 2002). Este problema se abordó al definir los criterios metodológicos en la elaboración de una prospección arqueológica empleando las herramientas SIG. Este trabajo busca hacer aportes al proceso de almacenamiento y aseguramiento de la información.

II. MÉTODO

Mediante estrategias de organización de la información se determinó los criterios para la recopilación de datos alfanuméricos que se podrán obtener en una prospección arqueológica. Esto se hizo utilizando herramientas SIG (Software y Hardware) con el fin de establecer las posibles fases dentro del proceso de una prospección. De esta manera, los criterios metodológicos al ser definidos permitan la estandarización de procesos, organización y recolección de la información. De esta manera, definir un criterio dentro del proceso de elaboración de una prospección arqueológica desde su planeación optimizaría cada uno de los procesos inherentes al trabajo mencionado y se obtendría un nivel de aseguramiento y almacenamiento del 100% de la información recolectada. Esta información es asociada a un punto geográfico lo que permite realizar diferentes análisis enmarcados en una zona geográfica. Asimismo, estas estrategias organizativas dieron la posibilidad de la elaboración de una ficha de trabajo constituida con criterios previamente establecidos relacionados con información paisajística; esto permitió la estandarización de los procesos de recolección de información arqueológica.

Simultáneamente, para identificar en el espacio la presencia de evidencias o modificaciones antrópicas sobre el terreno, la prospección de superficie como método de recogida de material arqueológico o de descubrimiento de yacimientos. Este método inicialmente debió considerar las variables físicas del área en donde se hizo la prospección; estas se registrarán en una ficha de campo. En la Tabla I. Ficha información arqueológica (Ver Anexo 1), se presentan algunos criterios utilizados. Este es uno de los objetivos trazados por (Fernández, 2001) "dar con un método iterativo que permita la recogida, digitalización y contextualización de la información planimétrica" De igual modo, se debe considerar el componente geográfico el cual determinará la ubicación de cada uno de los pozos de sondeo y finalmente, se asegura que la información capturada en campo como la información de posición de cada uno de los puntos se pueda almacenar y consultar.

Durante el desarrollo de esta metodología se hizo necesario describir conceptos importantes como el concepto del espacio, teniendo como referencia dos significados; el primero lo ve como el contenedor de todo, y el segundo, lo considera de manera correlacional de cosas u objetos que interactúan entre sí y con el mismo territorio. Es en ese preciso instante donde la

1 La arqueología, etimológicamente significa: arqueo-pasado, logia-conocimiento, entonces tenemos el conocimiento Del pasado pero a partir de la cultura material (conversación personal con el antropólogo Jorge Huertas).

2 Los artefactos, son aquellos objetos realizados o modificados por el hombre y los ecofactos, son restos orgánicos y medioambientales como parásitos, polen, sedimentos, huesos, entre otros. Son aquellos productos naturales, pero que el hombre llevó a un lugar determinado. Por ejemplo, un tronco de árbol sin tallar que usarían como poste.

3 La prospección arqueológica es una técnica que se emplea para la revisión del suelo mediante la realización de sondeos para identificar el potencial arqueológico de un área o polígono.

herramienta SIG entra en juego al recopilar la información que aportan las evidencias encontradas por los arqueólogos y darles un contexto espacial; este tipo de análisis e inferencias se consigue elaborando una distribución espacial planteada dentro de una metodología de recolección de la información y asignando lo que se denomina una geometría al proceso arqueológico dependiendo de la etapa del proceso⁴ en la cual se utilice el SIG. El proceso metodológico descrito hasta el momento se dividió en tres fases que se describirán a continuación:

1 FASE DE PRE-CAMPO

En esta fase se revisa la información secundaria y cartográfica concerniente al área del proyecto, con el objetivo de realizar un análisis del paisaje, enfocándose en áreas adecuadas para el asentamiento de poblaciones humanas. Como bien lo expresa Amado Reino en su artículo La aplicación del GPS a la Arqueología. Trabajos de prehistoria cuando habla de la importancia de los GPS "La posibilidad de apoyo en esta tecnología puede tener lugar en diversos momentos de la práctica arqueológica. La primera de ellas es el propio apoyo en las labores de topografía y levantamientos planimétricos de las fases preliminares de una intervención arqueológica. En este momento el GPS no sólo aportará una gran precisión, sino que también dotará de agilidad al trabajo permitiendo unos rendimientos excelentes en un tiempo inferior al que sería necesario con la topografía clásica. (Amado Reino, 1997, p. 6). Como parte de la información necesaria para el adecuado desarrollo del proyecto se elabora un formato de recolección de datos en campo, el cual, permite la estandarización de la información recuperada durante las labores ejecutadas.

Como parte de los trabajos a ser desarrollados en campo consisten en la localización de puntos de sondeos a lo largo del terreno, durante la fase de pre-campo, se debe desarrollar mediante un Software una serie de puntos geo referenciados con el objetivo de generar un corpus de información conciso y coherente compuesto principalmente de la codificación de cada uno de los puntos generados, ya que esto permitirá que exista cierta correlación entre la ficha de toma de dato e información alfanumérica y el punto que contiene la información geográfica. En la Figura 1, se presenta la información alfanumérica en el diseño de un esquema para una prospección arqueológica.

2 FASE DE CAMPO

El inicio de las actividades de campo está determinado principalmente por la verificación de cada uno de los puntos cargados al dispositivo navegador y la posterior remarcación de cada uno de los puntos en el mismo. Esto se lleva a cabo con el objetivo de obtener datos como la altura y la ubicación real del pozo de sondeo, una vez se identifica el punto se procede a llenar la información requerida en la ficha de prospección arqueológica (Figura 1) y al registro fotográfico necesario para cada uno de los puntos que se encuentran dentro de la zona de trabajo. Es en este punto donde los SIG comienzan parte de su función primaria y es el almacenamiento de la información día a día, ya que cada ficha registrada es ingresada a una base de datos geográfica permitiendo el continuo crecimiento de información. Teniendo presente que mediante el uso de estas herramientas se puede visualizar el yacimiento arqueológico no como un punto si no como un espacio en el que se recuperan materiales u observan evidencias y que se reconoce como susceptible de ser delimitado sobre el terreno y el espacio (Amado Reino, 1997).

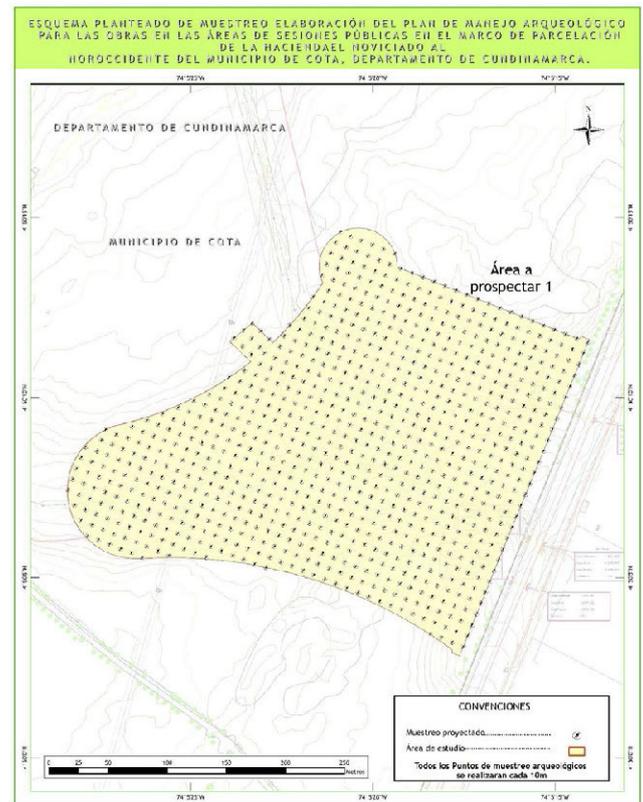


Figura 1 Esquema de prospección (Jorge Huertas, 2015)

3 FASE POST CAMPO

La última fase en los trabajos de arqueología, se lleva a cabo una vez se ha realizado el levantamiento de los datos en campo, donde, como se ha mencionado anteriormente se recoge información relacionada a las características del terreno, el paisaje y a la caracterización de las posibles áreas con evidencias culturales, al igual que la sistematización de las fichas de registro de información arqueológica correspondientes a cada arqueólogo. Por lo tanto, una vez sistematizada la información se procede a la integración de las bases de datos espaciales, esto se logra mediante la implementación de una base de datos geográfica modelada en un motor de bases de datos que permite la inserción de formularios para capturar la información y almacenarla de manera digital, con el fin de realizar el análisis de cada una de las variables consignadas en la ficha de registro, como es la textura del suelo, profundidad, color, tipo de horizonte, sondeos descartados, negativos y positivos, producto de la obtención de estas variables por cada uno de los pozos de sondeo realizados, se adquirirán datos concretos sobre la estructura y composición de los sitios arqueológicos o de aquellas áreas que no presentan evidencias culturales.

Esta información se obtiene mediante el uso de los sistemas de información geográfica asociando cada variable a dicho punto que representa el sondeo realizado y su interrelación con la toma de datos durante la visita a campo; es esta interrelación que puede generar la cartografía temática necesaria para entender los cambios en el paisaje, y las complejas distribuciones de las evidencias arqueológicas sobre áreas o extensiones de terreno considerables (Figura 2).

⁴ Prospección, monitoreo, rescate o diagnóstico, enmarcado en los programas de arqueología preventiva.

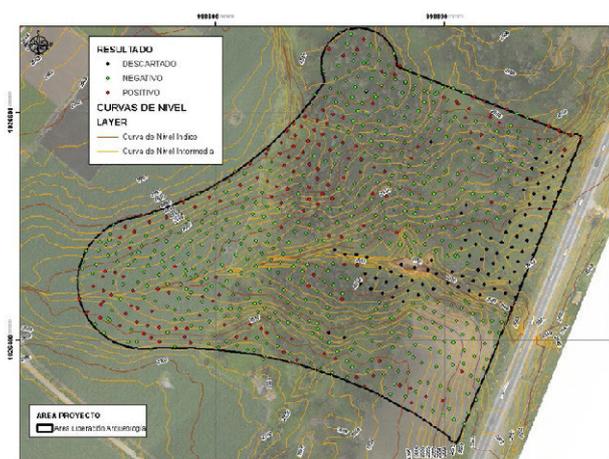


Figura 2 Distribución de sondeos positivos en una prospección arqueológica en El Noviciado-Cota (Jorge Huertas, 2015)

III. RESULTADOS

Uno de los resultados obtenidos dentro de los procesos de recolección de datos en las fases del trabajo arqueológico, es la planeación del trabajo, la recolección de información y el almacenamiento. El uso de esta herramienta tecnológica da la posibilidad de incorporar datos procedentes de trabajos de campo con GPS y la generación de triangulaciones, curvados y modelos tridimensionales los cuales se utilizan para realizar interpretaciones del paisaje. Esta información es utilizada por los arqueólogos para conocer cómo las poblaciones humanas hacían uso y control de los recursos, asimismo, cuáles eran las estrategias para la ocupación de un territorio.



Figura 3 Vista 3D prospección arqueológica en el noviciado Cota.(Jorge Huertas, 2015)

Además de contar con los diferentes datos asociados al terreno también se tiene acceso a la información de cada uno de los pozos de sondeos realizados esta información es la que se registró en la ficha, es decir, se tiene una ficha de registro por cada pozo de sondeo y a su vez esta puede ser ingresada en una base de datos con lo cual se obtiene información alfanumérica asociada a un punto geográfico y al tener varios puntos geográficos se puede tener una imagen clara de una zona determinada relacionando cada parte del registro a un punto geográfico por ejemplo color de suelo, textura, etcétera.

Los factores controlables se refieren básicamente a las unidades de documentación (o de observación), esto es, a las entidades espaciales que sirven de base para la inspección del terreno y de referencia para la contextualización del registro arqueológico documentado. En su diseño hay que tener en cuenta los siguientes aspectos: sus características intrínse-

cas, su distribución y, en tercer lugar, su realización.(Chapa Brunet, Uriarte González, Vincent García, Mayoral Herrera, & Pereira Sieso, 2003, p. 7) se plantea la asociación de cada una de las variables necesarias para realizar un buen trabajo o diagnóstico arqueológico.

Es importante resaltar que el uso de herramientas tecnológicas permite elaborar informes cada vez más complejos los cuales utilizan elementos geográficos anudados con elementos alfanuméricos, esta interacción permite un mayor análisis como lo muestra la (Figura 4).



Figura 4 Potencial arqueológico prospección arqueológica en el Noviciado Cota. (Jorge Huertas, 2015)

Esto se obtiene mediante un proceso realizado a la información vinculada a cada uno de los puntos tomados en la fase de campo en la cual al asignarle un valor numérico al resultado de los puntos (negativo, positivo, descartado) de la prospección luego por medio de un algoritmo de interpolación llamado el vecino natural se obtiene un producto raster. Este producto es la distribución de cada uno de los puntos de la prospección; Seguido a esto se obtienen polígonos de cada una de las áreas que determinan el potencial arqueológico. De esta manera, el uso de herramientas SIG permite calcular áreas y tomar determinaciones para el establecimiento de zonas de rescate o monitoreo arqueológico.

IV. CONCLUSIONES

Con la información recogida en campo relacionada a las características del terreno, el paisaje y a la caracterización de las posibles áreas con evidencias culturales. Se procedió a la integración de la información consignada en bases de datos espaciales. Estas bases contienen elementos geográficos asociados a cada uno de los pozos de sondeo que a su vez cuentan con la información alfanumérica; esto es lo que se denomina un sistema de información geográfico y todo con el fin de realizar el análisis de cada una de las variables consignadas en la ficha de registro, como es la textura del suelo, profundidad, color, tipo de horizonte, sondeos descartados, negativos y positivos. Producto de la obtención de estas variables, se adquieren datos concretos sobre la estructura y composición de los sitios arqueológicos o de aquellas áreas que no se presentan evidencias culturales. Generando de esta forma, una perspectiva del terreno y del paisaje que ayudan a la comprensión de la disposición de las evidencias arqueológicas en el espacio y el territorio, logrando establecer patrones en el uso y ocupación del paisaje por los grupos humanos en tiempos pasados, pero también obtener información sobre trayectorias socioculturales actuales.

Anexo 1.

Ficha información arqueológica

FICHA DE PROSPECCION ARQUEOLOGICA																																
PROYECTO																																
UNIDAD FUNCIONAL																																
MUNICIPIO																																
VEREDA																																
PREDIO																																
FECHA																																
POZO DE SONDEO																																
RESULTADO	POSITIVO							NEGATIVO							DESCARTADO																	
HORIZONTE	A					AB					B					C																
PROFUNDIDAD																																
COLOR																																
HUMEDAD	A			M			B			A			M			B			A			M			B							
GRANO	G			M			F			G			M			F			G			M			F							
TEXTURA	A	Ar	L	AAr	AL	LAr	A	Ar	L	AAr	AL	LAr	A	Ar	L	AAr	AL	LAr	A	Ar	L	AAr	AL	LAr	A	Ar	L	AAr	AL	LAr		
BIOTURBACIÓN	RF	RG	Lb	H	Lv	Bu	Md	Ot	RF	RG	Lb	H	Lv	Bu	Md	Ot	RF	RG	Lb	H	Lv	Bu	Md	Ot	RF	RG	Lb	H	Lv	Bu	Md	Ot
MOTEADO																																
DATOS DE RECUPERACION DE MATERIALES																																
NIVEL	CERAMICA					LITICO					CARBON					OTROS					ROTULO BOLSA											
1. (0 - 10 cm)																																
2. (10 -20 cm)																																
3. (20 -30 cm)																																
4. (30 -40 cm)																																
5. (40 -50 cm)																																
6. (50 -60 cm)																																
7. (60 -70 cm)																																
8. (70 -80 cm)																																
Observación General																																
UNIDAD FISIOGRAFICA																																

AGRADECIMIENTOS

Antropólogo Jorge Huertas
 Antropólogo Edwin Varela
 Consorcio OHL

REFERENCIAS

Amado Reino, X. (1997). La aplicación del GPS a la Arqueología. Trabajos de prehistoria, 54(1), 155-165.

Araneda, E. (2002). Uso de Sistemas de Información Geográficos y análisis espacial en arqueología: Proyecciones y limitaciones. Estudios atacameños, (22), 59-75.

Arroyo-Bishop, D. (1991). El sistema ArchéoDATA: hacia la creación de un Sistema de Información Arqueológica. Complutum, (1), 167-174.

Chapa Brunet, T., Uriarte González, A., Vincent García, J. M., Mayoral Herrera, V., & Pereira Sieso, J. (2003). Propuesta metodológica para una prospección arqueológica sistemática: el caso del Guadiana Menor (Jaén, España). Trabajos de prehistoria, 60(1), 11-34.

Fernández, I. F. (2001). Usos de un SIG, Sistema de Información Geográfico, en la construcción de una planimetría arqueológica para Tarragona (I). Revista d'arqueologia de Ponent, 111-121.

Jorge Huertas. (2015). Formulación del plan de manejo arqueológico para las obras en zonas de sesiones públicas en la hacienda el noviciado, vereda moya, municipio de Cota. Departamento de Cundinamarca.

Mayoral Herrera, V., Cerrillo Cuenca, E., & Celestino Pérez, S. (2009). Métodos de prospección arqueológica intensiva en el marco de un proyecto regional: el caso de la comarca de La Serena (Badajoz). Trabajos de prehistoria, 66(1), 7-26.

San Miguel Mate, L. C. (1992). El planteamiento y el análisis del desarrollo de la prospección: dos capítulos olvidados en los trabajos de arqueología territorial. Trabajos de prehistoria, 49, 35-49.