

2018

día SIG

ISSN : 2469-0856

Prólogo

Hace más de una década que la cátedra de SIG (LECA, FCF, UNSE)¹ viene realizando el Día del SIG o GIS Day como se lo denomina en su origen. Un evento cobertura global, que reúne a los entusiastas de los Sistemas de Información Geográfica.

Este año 2018 se realizó nuevamente en la Sala Anexa del Paraninfo de la UNSE. Se cumplió nuevamente con una consigna importante para las actividades de la Universidad, difundir las ciencia y tecnología, poner al alcance del público diverso sus actividades, tanto en la Jornada realizada como los trabajos contenidos en el presente eBook, que se difunde libremente a través de dominio de la UNSE.

En el evento se reunieron docentes-investigadores, estudiantes y becarios de la FCF y otras Facultades de la UNSE, asociados con autores de otras Instituciones ligadas al estudio del ambiente, las ciencias forestales y agronómicas, presentando diversas aplicaciones. La presencia de la empresa de servicios GeoAgro by TEK dio el marco a las aplicaciones comerciales y desarrollos en el sector agropecuario.

Desde la UNSE se presentaron temáticas que tienen que ver con la vegetación, la tierra, el agua y el fuego. Los trabajos tienen que ver con el desarrollo de actividades de investigación en proyectos oficializados por la UNSE y otras instituciones a las que pertenecen los autores, forman parte de tesis doctorales en curso de realización, de becas de estudiantes avanzados, como también de tesis finales de graduación universitaria, revisiones de temas de interés, entre otros.

Agradecimientos a todas las personas que participaron y a las instituciones que las apoyaron las diversas etapas para que sea posible realizar esta actividad, que se materializa en el presente eBook.

Prof. Dr. Hugo Raúl Zerda
Cátedra SIG (LECA, FCF, UNSE), SIGL@b

¹ LECA: carrera Licenciatura en Ecología y Conservación del Ambiente; FCF: Facultad de Ciencias Forestales; UNSE: Universidad Nacional de Santiago del Estero.

2018 día SIG

14 de noviembre de 2018
Universidad Nacional
de Santiago del Estero

1. Biomasa forrajera aérea de alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) derivada de índices de vegetación RGB. José Luis Tiedemann. Contacto: tiedemannjl@gmail.com	04
2. Proxydetección en cultivos bajo riego. Estudios de caso en la provincia de Santiago del Estero. Gylles Hayrault. Contacto: gilles@unse.edu.ar	12
3. Modelos de distribución de especies: una revisión sintética de los diferentes métodos. Cristian Savino. Contacto: savinocristian@gmail.com	24
4. Innovar en el Agro: Eficiencia etapa por etapa. Danel Leiva y Victoria Soda. Contacto: dleiva@geoagro.com	35
5. Exploración de tendencias fenológicas de ambientes ribereños mediante series temporales de MODIS. Estudio de caso ríos Horcones y Urueña en la provincia de Santiago del Estero. Ernestina Bonacina y Hugo Raúl Zerda. Contacto: ernebonacinam@gmail.com	41
6. Aplicaciones SIG a la representación de la Distribución Espacial de Valores de Concentración de Arsénico en Aguas Subterráneas. Jorge Prieto Villarroya, Miguel Ángel Moyano; Rocío Carreras; Héctor Daniel Farías. Contacto: jorgeprieto.ma@gmail.com	52
7. Detección de cuerpos de agua con imágenes radar. Mariangel Arias Ferreyra, Claudia Notarnicola y Marcelo Scavuzzo. Contacto: maryangelarias@hotmail.com	58
8. Calidad de servicio ecosistémico en área periurbana. Marta Evelia Izzo, Guido Lorenz y Valeria Ceirano. Contacto: martaizzo@gmail.com	67
9. Análisis de la severidad del fuego mediante información satelital multiespectral y multitemporal. Estudio de caso en el Departamento Capital, provincia de Santiago del Estero, Argentina. Álvaro Marcelo y Hugo Raúl Zerda. Contacto: navarretealvarom@yahoo.com.ar	74

Biomasa forrajera aérea de alfalfa (*Medicago sativa L.*) derivada de Índices de vegetación RGB

José Luis Tiedemann

Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero

Contacto: tiedemannjl@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue cuantificar la productividad de biomasa forrajera aérea de la variedad de alfalfa (*Medicago sativa L.*) G969, y relacionar y modelar su productividad con índices de vegetación RGB. La productividad media acumulada de dos cortes fue de 3.65 tn ms ha⁻¹. Se encontraron fuertes y significativas relaciones inversas (-0.92; p<0.01) entre la biomasa aérea y los Índices de Vegetación *r*, *REI*, *T* y *SUM*. Todos los modelos lineales resultantes tuvieron elevado y significativo poder explicativo (R^2_{Aj} 0.81; p<0.01). Todos los Índices RGB posibilitaron de manera simple, cuantificar la productividad de biomasa aérea de variedades de alfalfa. Los modelos obtenidos toman relevancia por su potencial utilidad para predecir la productividad de biomasa forrajera de variedades de alfalfa.

Palabras clave: números digitales, productividad, cámaras digitales.

1. Introducción

Las características espectrales de la vegetación verde (0,4µm y 2,5µm), captadas por sensores remotos y cercanos en las regiones del espectro solar posibilito inferir propiedades biofísicas de la vegetación verde (Tucker, 1979). Las relaciones entre dos o más regiones del espectro, en especial la roja e infrarroja, son ampliamente conocidas como Índices de Vegetación (Bannari *et al.*, 1995).

Los Índice de Vegetación fueron ampliamente utilizados para determinar parámetros como: el índice de área foliar (Tucker & Sellers, 1986), la radiación fotosintéticamente activa absorbida (Asrar *et al.*, 1984), la tasa fotosintética y concentración de clorofila (Tucker, 1979) y la productividad primaria neta global (Field *et al.*, 1995) entre otros.

El desarrollo de las cámaras digitales RGB estándar impulsó, de manera simultánea, el desarrollo de software para procesamiento y análisis de imágenes digitales (Ahrends *et al.*, 2008). Las cámaras digitales actuales pueden considerarse sensores cercanos de teledetección de alta resolución espacial y temporal, poseen un sistema cartesiano de captura de colores en el espacio rojo (R), verde (G) y azul (B), donde los números digitales RGB (DN) posibilitan registrar eventos de la vegetación (Sakamoto *et al.*, 2012). Estas fueron utilizadas por Kawashima & Nakatani (1998) para determinar relaciones entre las fracciones roja, verde y azul y el contenido de clorofila de cultivos agrícolas. A su vez, Przeszlowska *et al.* (2006) valoraron la exactitud y precisión de métodos de medición indirecta en paraderas de *shortgrass* comparándolos con métodos tradicionales de corte. Ellos utilizaron imágenes derivadas de cámaras digitales para determinar áreas con vegetación fotosintéticamente activa o Índice de Área Verde (IAV). Sonnetang *et al.* (2012) utilizaron el índice Exceso de Verde para formular un set de recomendaciones para el monitoreo de ecosistemas boscosos mediante cámaras digitales. A nivel local, Tiedemann (2018 y 2018a) utilizó, respectivamente, los índices *r* y *rgb* reflex para

relacionar y modelar productividad de biomasa forrajera de variedades de trigo y alfalfa.

Con base a lo expuesto en este trabajo se pretende cuantificar la productividad de biomasa forrajera aérea de la variedad de alfalfa (*Medicago sativa L*) G969 y, relacionar y modelar su productividad mediante Índices de Vegetación RGB.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El ensayo se realizó el área de riego del Río dulce, en un establecimiento JB (Lat -27.73°; Log -63.89°), ubicado en la colonia El Simbolar, Santiago del Estero, Argentina (**Fig. 1**). En la colonia predominan los Aridisoles, son suelos secos en parte del año y salinos con napa freática alta; presentan un horizonte superficial con bajo contenido de materia orgánica, textura franca y débil estructuración (Angueira, 2015). La precipitación media anual es de 550 mm, la evapotranspiración anual se ubica entre los 900-1,100 mm, con déficit hídrico todo el año, en un promedio de 550 mm. La temperatura media anual histórica es de 27.7°C, (Boletta, 2006).

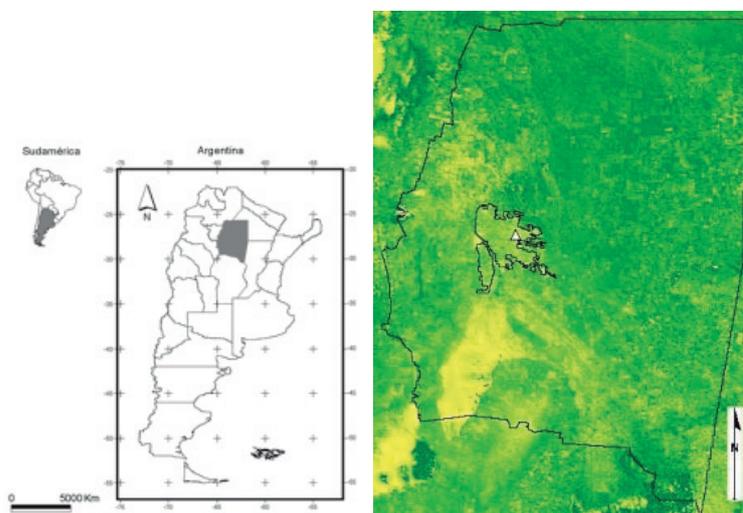


Figura 1. (Izquierda) Argentina en Sudamérica y Santiago del Estero en Argentina; (Derecha) área de riego del río Dulce de Santiago del Estero y ubicación del establecimiento en el área de riego (triángulo blanco, Latitud -27.73°; Longitud -63.89°).

El ensayo comprende la variedad comercial GAPP G969 (USA) grupo de latencia nueve, implantada con sistema de siembra al voleo, en abril de 2017, logrando una densidad efectiva y homogénea de 350 pl m². A fines de agosto y septiembre se realizaron dos cortes mediante muestreo aleatorio simple, tomando ocho muestras de biomasa forrajera aérea verde de 1m² corte⁻¹. Los cortes fueron realizados en prefloración, a una altura superior a los 10 cm del suelo (Gardner, 1974). La biomasa aérea verde fue pesada en terreno. De cada muestra se extrajo sub muestras (~50gr c/u) para determinar biomasa forrajera seca mediante horno microondas (Crespo *et al.*, 2007). La biomasa forrajera seca fue acumulada (PBA) y expresada en toneladas de materia seca por hectárea (tn ms ha⁻²). La PBA fue relacionada con los índices

RGB mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r). En base al r , fueron generados modelos lineales y no lineales. Los modelos resultantes fueron seleccionados mediante el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Aj}) y de la observación de gráficos de dispersión (residuos vs. predichos) (Balzarini *et al.*, 2008). Se verificaron supuestos de normalidad mediante Shapiro-Wilks modificado y homogeneidad de varianza con Prueba de F (Balzarini *et al.*, 2008).

2.2. Programación técnica de la cámara y fotografía

Las imágenes digitales fueron obtenidas mediante el sensor CMOS de 23.5 x 15.6 mm, 24,1 megapíxeles efectivos, cámara reflex Nikon D7100, lente AF-S NIKKOR 18-300 mm f/3.5-5.6G ED VR (Nikon Corporation, Tokyo, Japón), el tamaño de fotograma de 2.304 × 1.536 píxeles en formato RAW (Nikon Electronic Format). La cámara fue montada en un trípode vertical con nivel, ubicado en la parte central de cada área de corte, a 0.5m de distancia del top del follaje, con un ángulo de inclinación de 0° (Rasmussen *et al.*, 2007). Las imágenes fueron realizadas previo al corte, entre las 10.00 hs y 14.00 hs, con cielo despejado (Inoue *et al.*, 2015). El balance de blancos fue corregido con la carta de reflectancia 18% Gray Balance (Fig. 2). El sensor CMOS fue calibrado a partir de una imagen de referencia cromática estándar. Las imágenes RAW fueron almacenadas en formato TIFF (Tagged Image File Format) estandarizadas a 8 bit (Min 0; Max 255). Las imágenes fueron clasificadas mediante el clasificador desarrollado por Yen *et al.* (1995), dando el valor uno a la biomasa forrajera aérea verde o vegetación fotosintéticamente activa (Baret *et al.*, 2010) y cero al resto del *background*. Los números digitales (ND) fueron extractados de cada parcela con un polígono digital de muestreo (Sonnetag *et al.*, 2011) (Fig. 2). Con los ND de cada muestra fueron confeccionados los Índices de Vegetación RGB (Tabla 1).



Figura 2. Izq. Imagen de alfalfa central con tarjeta para balance de blancos. Der. Imagen binaria con polígono vector de muestreo (rojo).

Tabla 1. Índices de Vegetación RGB.

<i>Index Total</i>	$r + g + b$	Saitoh <i>et al.</i> (2012)
<i>Index red</i>	r	Gillespie <i>et al.</i> (1986)
<i>Index Red Excess</i>	$REI = 1.4 * r - g$	Meyer & Camargo Neto (2008)
<i>Index SUM</i>	$r + g$	Tucker (1979)

Siendo: r = ND red (rojo), g = ND Green (verde) y b = ND blue (azul).

3. Resultados y Discusión

No fueron encontradas evidencias en todas las variables analizadas para rechazar supuesto de distribución normal ($W^* 0.95$; $p > 0.05$) e igualdad de varianzas ($F 1.27$; $p > 0.05$).

La productividad media de biomasa forrajera acumulada de los dos cortes fue de $3.65 \text{ tn ms ha}^{-1}$ (Desv. Est = 0.9). En la Tabla 2, se presentan los coeficientes de correlación entre biomasa e índices RGB. Todos los índices tuvieron fuertes y significativas relaciones inversas con la productividad de biomasa forrajera de alfalfa ($r -0.88$; $p < 0.01$). Similares resultados obtuvo Tiedemann (2018) quien determinó fuertes relaciones inversas ($r -0.99$; $r -0.88$) y directas ($r 0.96$) entre la biomasa forrajera de variedades de trigo y el Índice *Total* y *r*. A su vez, Inoue *et al.* (2015) encontraron significativas ($p < 0.05$) relaciones lineales directas entre el canal rojo ($R^2 0.81$) y verde ($R^2 0.82$) con la biomasa verde aérea de las pasturas.

Tabla 2. Correlación de Pearson y probabilidades entre ND, RGB y PBA (tn ms ha^{-1}).

	tn ms ha^{-1}	r	REI	Total	SUM
tn ms ha^{-1}	1.00	0.01	0.01	0.01	0.01
r	-0.92	1.00	0.00	0.00	0.00
REI	-0.92	1.00	1.00	0.00	0.00
Total	-0.92	1.00	1.00	1.00	0.00
SUM	-0.92	1.00	1.00	1.00	1.00

En la **Fig. 3**, se presentan los modelos lineales seleccionados en base al R^2_{Aj} . En todos los gráficos de dispersión (residuos vs. predichos) se observan patrones aleatorios. Todos los modelos tuvieron elevado poder explicativo ($R^2_{Aj} 0.81$; $p < 0.01$).

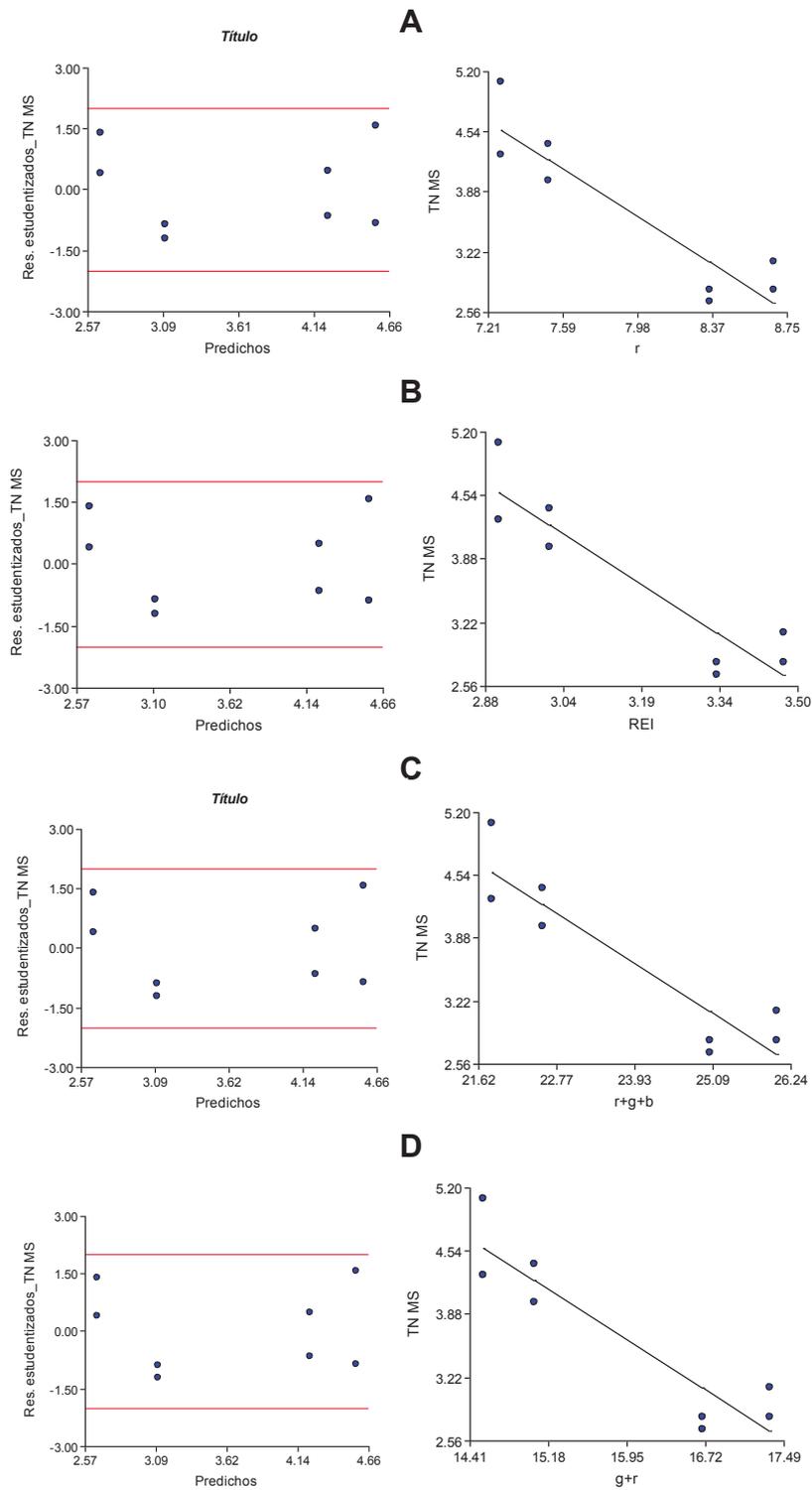


Figura 3. Modelos de regresión y gráficos de dispersión entre Biomasa (tn ms ha⁻¹) e Índices RGB. A) Índice *r*, B) *REI*, C) Índice *Total* y D) Índice *SUM*.

Los modelos lineales resultantes fueron los siguientes

- A) $Tn Ms Ha_{G969} = -1.35 * r + 14.41$ ($R^2_{Aj} 0.81; p < 0.01$)
- B) $Tn Ms Ha_{G969} = -3.39 * REI + 14.44$ ($R^2_{Aj} 0.81; p < 0.01$)
- C) $Tn Ms Ha_{G969} = -0.45 * T + 14.43$ ($R^2_{Aj} 0.81; p < 0.01$)
- D) $Tn Ms Ha_{G969} = -0.68 * SUM + 14.42$ ($R^2_{Aj} 0.81; p < 0.01$)

Los resultados concuerdan con los de Tucker (1979) quien determinó que la fracción roja y la infrarroja cercana tienen, respectivamente, relación no lineal inversa y directa con la biomasa verde. En este sentido, Tiedemann (2018) obtuvo modelos lineales directos e inversos entre la biomasa de variedades de trigo y los Índices de r y $Total$, el R^2_{Aj} de los modelos osciló entre 0.71 y 0.99. A su vez, Tiedemann (2018a) obtuvo fuertes relaciones lineales inversas entre el Índice r y biomasa de alfalfa ($R^2_{Aj} 0.81; p < 0.01$).

5. Conclusiones

- Todos los Índices RGB utilizados posibilitan de manera simple, cuantificar la productividad de biomasa aérea de variedades de alfalfa.
- Los modelos obtenidos toman relevancia por su potencial utilidad para predecir la productividad de biomasa de las variedades de alfalfa.

6. Agradecimientos

Al criadero GAPP (www.gapp.com.ar) por el aporte de material genético alfalfa grupo 9 G969 para los ensayos

7. Referencias

Ahrends, H. E., R. Brügger, R. Stoëckli, J. Schenk, P. Michna, F. Jeanneret, H. Wanner, and W. Eugster. (2008). Quantitative phenological observations of a mixed beech forest in northern Switzerland with digital photography, *J. Geophys. Res.*, 113, G04004. Disponible en: doi:10.1029/2007JG000650.

Angueira C. Relevamiento de suelos utilizando las nuevas técnicas de Geomática: un caso en Santiago del Estero, Argentina. (2015). Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, España, 335p.

Asrar G.; Funchs M.; Kanemasu E.T. & Hatfield J.L. (1994). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76:300-306. 1984.

Balzarini M. G; Gonzalez L; Tablada M; Casanoves F; Di Rienzo J.A; Robledo C.W. (2008). Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.

Bannari A., Morin D. & Bonn F. (1995). A Review of Vegetation indices. *Remote Sensing Review*, 13:95-120.

Baret F; de Solan B; Lopez-Lozano R; Kay; Weiss M. (2010). GAI estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5° zenith angle: Theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat crops Agricultural and Forest Meteorology 150:1393–1401.

Crespo J. R; Castaño J. A y Capurro J.A. (2007). Secado de forraje con el horno microondas: Efecto del secado sobre el analisis de calidad. Agricultura Técnica, 67:210-218.

Field C. B., Randerson J. T. & Malmstriik C. M. (1995). Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing. Remote Sensing Environment. 51: 74-88.

Gardner A. L. Producción y utilización de pasturas. (1974). En: curso de producción animal para extensionistas, INTA Balcarce. Ed. GARDNER A. L. Proyecto FAO ARG 527, EERA INTA Balcarce, 162pp.

Gillespie A. R; Kahle A. B; Kahle A. B and Walker R.E. Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI Contrast Stretches. Remote Sens. Environ. 20:209-235, 1986.

Inoue T; Nagai S; Kobayashi H. and Koizumi H. (2015). Utilization of ground-based digital photography for the evaluation of seasonal changes in the aboveground green biomass and foliage phenology in a grassland ecosystem. Ecological Informatics 25:1–9.

Kawashima S, Nakatani M. An algorithm for estimating growth and development on the pathway of floral development, chlorophyll content in leaves using a video camera. Annals of Botany 81:49–54, 1998.

Rasmussen J., Nørremark M. & Bibby B. M. (2007). Assessment of leaf cover and crop soil cover in weed harrowing research using digital images. Weed Research, 47:299-310.

Sakamoto T; Gitelso A. A; Nguy-Robertson A.L; Arkebauer, J; Wardlow B.D; Suyker A.E; Vermab S.B; Shibayama M. (2012). An alternative method using digital cameras for continuous monitoring of crop status. Agricultural and Forest Meteorology, 154-155:113–126.

Tiedemann JL. (2018). Productividad de biomasa forrajera aérea de variedades de trigo (*Triticum aestivum* L) y su relación con coordenadas cromáticas derivadas de cámara digital. Ecol. apl. 17: 61-68.

Tiedemann JL. (2018a). Productividad de biomasa forrajera aérea integrada de alfalfa (*Medicago sativa* L) y sensores cercanos. XIII Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de ingeniería del NOA. 13-14 Sep, SDE.

Tucker, C J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ. 8:127-150.

Tucker & Sellers P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sensing* 11:1395-1416.

Yen J; Chang F. and Chang S. (1995). A new criterion for automatic multilevel thresholding. *IEEE Transactions*, 4:370-378.

Proxydetección en cultivos bajo riego. Estudios de casos en Santiago del Estero

Gilles Ayrault ¹

¹ Instituto para el Desarrollo Agropecuario del Semiárido (INDEAS), Facultad de Agronomía y Agroindustrias (FAyA), Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE)

Contactos: gilles@unse.edu.ar

RESUMEN

Las parcelas agrícolas del área de riego del Río Dulce de Santiago del Estero presentan una variabilidad intra-parcelaria a nivel de condiciones edáficas que afecta la productividad y la rentabilidad de los cultivos. La proxidetección mide la radiación reflejada por la superficie vegetal y permite el acceso a ciertas características biofísicas, a través del uso de diferentes índices de vegetación, siendo el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) el más utilizado. Se presentan los resultados preliminares de tres cultivos: alfalfa, cítrico y viñedo. En alfalfa, se estudió la posible relación entre el crecimiento de las plantas con el NDVI. En cítrico, se investigó la relación entre la variabilidad intra-parcelaria edáfica, a través de la medición de la conductividad eléctrica aparente, y el NDVI de los árboles. En viñedo, variedades Petit Verdot y Syrah, se estudió la relación entre las lecturas de NDVI y el crecimiento vegetativo y el rendimiento del cultivo.

Palabras clave: NDVI, cítrico, viñedo

1. Introducción

El Sistema de Riego del Río Dulce de la provincia de Santiago del Estero comprende parte de los Departamentos Banda, Robles, San Martín, Sarmiento, Capital, Silípica y Loreto. El clima del área es semiárido con un balance hidrológico negativo durante todo el año, la temperatura media anual es de 21,5 °C, con inviernos relativamente fríos (mínima absoluta -7 °C) y veranos muy cálidos (máxima absoluta 47 °C).

La estación de lluvias está concentrada entre los meses de octubre y marzo, y la estación seca entre abril y septiembre. La variabilidad de las precipitaciones es alta entre años y en un mismo año; las sequías y, sobre todo, los períodos temporarios de estrés hídrico, son frecuentes. Estos son períodos de sequía que pueden ser relativamente breves, pero afectan significativamente la producción cuando se producen durante los períodos críticos de los cultivos (Angella, 2015).

Los suelos del área bajo riego representan una amplia gama que va desde los minerales con desarrollo incipiente, hasta los hidromórficos, lixiviados, calcáreos, con potentes horizontes aluviales y elevados tenores de sales.

El principal tipo de riego utilizado es el superficial, y su eficiencia de aplicación es variable, con un promedio del orden del 40 % (Prieto *et al.*, 1994; Angella y Prieto, 2000; Angella y Salgado, 2013). Los riegos presurizados están actualmente poco

difundidos, pero se espera que su uso se incremente en el mediano plazo. La superficie regada por goteo se estima en 900 a 1.000 ha.

Las parcelas agrícolas presentan una variabilidad intraparcelaria a nivel de condiciones edáficas (textura, fertilidad, salinidad, etc.) la cual es una de las razones que afecta la productividad y la rentabilidad por unidad de superficie (Fig. 1 y Fig. 2). La base productiva del Área de Riego del Río Dulce está compuesta principalmente por algodón, alfalfa, cultivos frutihortícolas y maíz, y dicha producción es bastante menor que la que podría obtenerse (Angella, 2015).



Figura 1. Variabilidad intraparcelaria en el Área de Riego del Río Dulce.



Figura 2. Variabilidad intraparcelaria en un alfalfar (izq.) y una plantación cítrica (der.). Imágenes de Google Earth®.

La variación de las superficies absolutas y relativas de los diferentes cultivos a lo largo de los años ha sido producto de numerosos factores: producción destinada mayormente al consumo interno; la marginalidad del área desde el punto de vista comercial; escasas ventajas comparativas respecto a otras zonas de producción del país, por

productividad, localización, distancia a los mercados, incidencia en la oferta total, condiciones de ingresos a los mercados, contracción de la demanda nacional y la competencia de productos nacionales.

De esta situación se desprende, como en otras áreas del Noroeste Argentino (NOA), que muchas de las actividades productivas actuales carecen de rentabilidad, y no alcanzan para satisfacer los requerimientos mínimos de los productores, por lo que existe la imperiosa necesidad de disponer de alternativas de producción.

Por lo tanto, una gestión más precisa de las operaciones agrarias según sus condiciones edáficas permitirá mejorar la productividad de los cultivos. La agricultura de precisión contempla una producción más eficiente y con un menor impacto ambiental (Garnett *et al.*, 2013). Una de sus herramientas es la percepción remota o teledetección, la cual por medio del empleo de sensores remotos permite estudiar la variabilidad intra-parcelaria, ya que esta técnica permite obtener una imagen multiespectral, la cual está relacionada con la expresión vegetativa y la sanidad de las plantas. Esta información puede ser representada mediante una cartografía de la biomasa del cultivo, expresada normalmente como índices de vegetación, los cuales pueden ser relacionados con la variabilidad espacial del vigor, la calidad, el rendimiento e incluso con ciertos factores físico-químicos del suelo.

Esta tecnología tiene entre sus ventajas ser un método no invasivo, no destructivo, rápido y permite trabajar a diferentes escalas, desde plántulas hasta grandes áreas de cultivo lo que permite el registro de datos en tiempo real y obtener información cuantitativa sobre la variabilidad de los cultivos. Viene siendo utilizada en Santiago del Estero en general, y en la Universidad Nacional en particular, para el desarrollo de estudios relacionados con la ecofisiología vegetal, y las aplicaciones prácticas de la misma en la agricultura y en las ciencias forestales (Zerda, 1998; Zerda y Tiedemann, 2005; Speranza y Zerda, 2005; Angueira *et al.*, 2008; Zerda y Tiedemann, 2010; Tiedemann *et al.*, 2010).

Santiago del Estero posee una importante zona productora de alfalfa cuyo destino es principalmente para la producción de fardos. La variedad "Salinera INTA" fue desarrollada por el INTA Santiago del Estero en los años 80 para su difusión en áreas de riego del NOA por su excelente adaptación a las condiciones ambientales de las zonas productoras y a los suelos salinos.

La producción cítrica en el área de riego de Santiago del Estero llegó a ocupar más de 3.000 ha, habiendo sufrido una importante merma principalmente por problemas agroecológicos, genéticos, sanitarios y comerciales (Ochoa, 2002). Asimismo, el cultivo de la vid se ha mantenido permanentemente desde épocas antiguas y aunque principalmente la producción se centró en la uva de mesa también hubo aprovechamientos vitivinícolas (Ochoa, 2002), y hoy con la introducción de nuevos cultivares y varietales, así como el alcance a nuevas tecnologías, tanto de producción primaria como de procesos, se están desarrollando pruebas para determinar que "cepas" pueden tener una factibilidad, técnico-económica.

En esta presentación se presentan los resultados preliminares de tres cultivos en estudio:

- Alfalfa: se investiga la posible relación entre el crecimiento de las plantas de la variedad "Salinera INTA" con el índice de vegetación NDVI,

- Cítrico: En una plantación de pomelo se investiga la relación entre la variabilidad intra-parcelaria edáfica, tanto espacial como temporal, a través de la medición de la Conductividad Eléctrica (CE) y el índice de vegetación NDVI de los árboles, y
- Viñedo: se estudia la posible relación de la variabilidad espacio-temporal del índice de vegetación NDVI con el crecimiento vegetativo y el rendimiento de un viñedo con los varietales Petit Verdot y Syrah.

2. Materiales y Métodos

2.1. Alfalfa

Se realizó la siembra del alfalfar, Variedad Salinera INTA, en el Campo Experimental de la Facultad de Agronomía y Agroindustrias (FAyA), (27°52'22" S – 64°14'30" O), de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), durante el mes de Mayo 2017.

A posteriori, periódicamente, durante 2 "cortes" del cultivo, entre mediados de diciembre de 2017 y fines de febrero de 2018, se tomaron datos de reflectancia multiespectral utilizando el radiómetro de campo FieldScout CM 1000 NDVI Chlorophyll Meter (Spectrum Technologies, Inc.) (Fig. 3). Las lecturas se realizaron alrededor de las 14 h de días soleados, a 1 metro de altura respecto al canopeo, lo que corresponde a un diámetro del área medida de 10 cm, tomándose 6 lecturas en cada oportunidad.

Conjuntamente con las lecturas de reflectancia, se midieron la altura de las plantas (cm) hasta la realización del correspondiente corte. Asimismo, en el momento del corte se determinó materia fresca (Tn.ha-1) y materia seca (Tn.ha-1).



Figura 3. Radiómetro FieldScout CM 1000 NDVI Chlorophyll Meter.

2.2. Cítrico

En una plantación cítrica de 10,5 ha del establecimiento Colonia Jaime, ubicada sobre Ruta Nacional 34, Km 711 (Dpto. Robles – Santiago del Estero), se trabajó en un lote de Pomelo (0,75 ha) con variabilidad intra-parcelaria en las plantas presentes (Fig. 4).

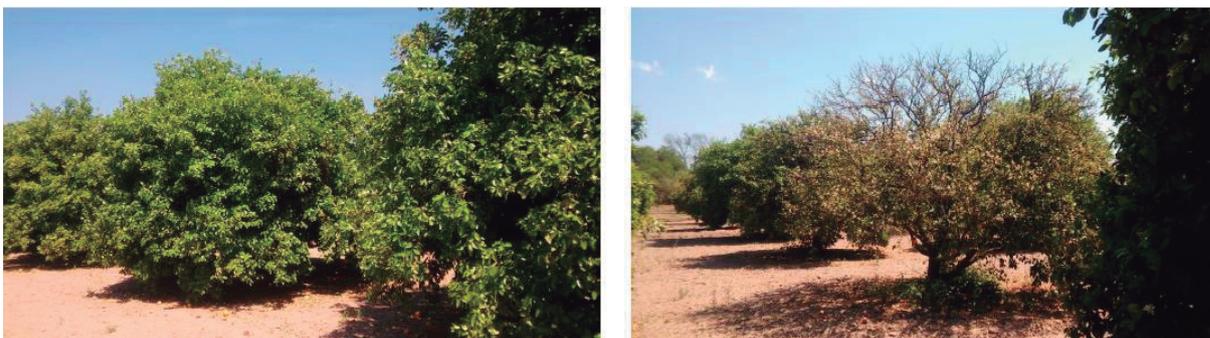


Figura 4. Variabilidad intraparciliar de los árboles de pomelo del lote en estudio

Para determinar la conductividad eléctrica (CE) del suelo se sacaron 2 muestras bajo el vuelo de la copa de cada árbol a través de un barreno a diferentes profundidades (0-30 cm y 30-60 cm), dejando secar las mismas 3-4 días en laboratorio, para luego tamizarlas y realizar diluciones de 8 gr de suelo tamizado en 20 ml de agua destilada, determinando la CE con un conductímetro Martini.

Para determinar los valores de NDVI de los árboles, se subdividieron verticalmente las copas en 8 sectores, realizando las lecturas a través del radiómetro de campo FieldScout CM 1000 NDVI Chlorophyll Meter (Spectrum Technologies, Inc.) (Fig. 3), en días soleados, alrededor de las 14 h, en forma vertical, a 1 metro de distancia respecto al canopeo del cultivo, lo que corresponde a un diámetro del área medida de 10 cm.

2.3. Viñedo

Este trabajo se realiza en los viñedos del Establecimiento María del Pilar en las cercanías de la localidad de Beltrán (Dpto. Robles, Santiago del Estero), perteneciente al área de riego del Río Dulce.

En los varietales Petit Verdot y Syrah, conducidos en espaldera, se realizaron las mediciones de los valores de NDVI, en 3 momentos: desde una etapa previa al envero hasta la cosecha, a través del radiómetro de campo FieldScout CM 1000 NDVI Chlorophyll Meter (Spectrum Technologies, Inc.) (Figura 3). Las lecturas se tomaron en días soleados, alrededor de las 14 hs, en 6 filas x 28 cepas de cada variedad, en forma vertical, a 1 metro de distancia respecto al canopeo del cultivo, lo que corresponde a un diámetro del área medida de 10 cm, tomándose 3 lecturas por cepa. Al momento de la cosecha, a principios de febrero, se determinó el rendimiento de uva (Kg. cepa^{-1}) como variable del vigor del cultivo.

3. Resultados

3.1. Alfalfa

Se encontraron diferencias en el desarrollo del alfalfar, entre los 2 cortes, debido a las mayores precipitaciones recibidas en el primero (Figura 5), obteniéndose una producción de materia seca en el primer corte de $3,4 \text{ Tn. ha}^{-1}$ y de $1,7 \text{ Tn. ha}^{-1}$ en el segundo.



Figura 5. Diferencias de desarrollo de los cortes.

Se observó una variabilidad temporal de los valores de NDVI entre ambos cortes (Fig. 6).

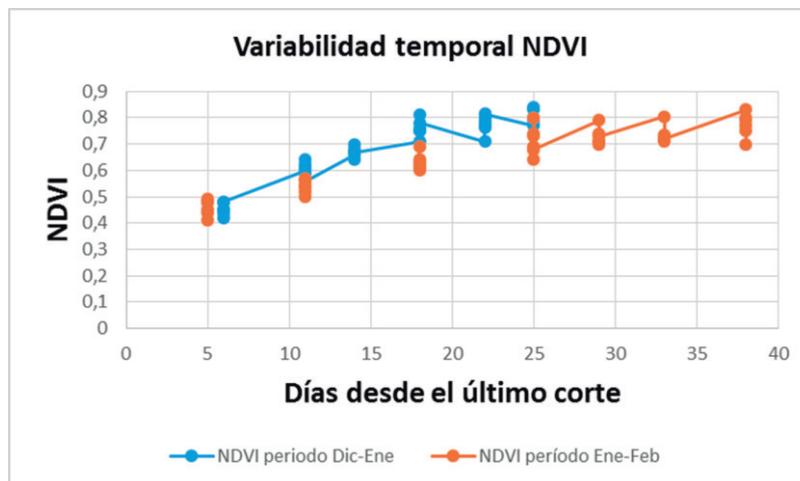


Figura 6. Variabilidad temporal del NDVI entre cortes.

Del análisis de los datos obtenidos, se determinó una relación entre las lecturas de NDVI y las mediciones de altura del cultivo, obteniéndose una correlación positiva considerable conforme los valores de Coeficiente de correlación de Pearson (R) (Fig.7). Asimismo, se observó que los valores de NDVI se vuelven poco sensibles cuando el cultivo alcanza una altura de 30-35 cm.

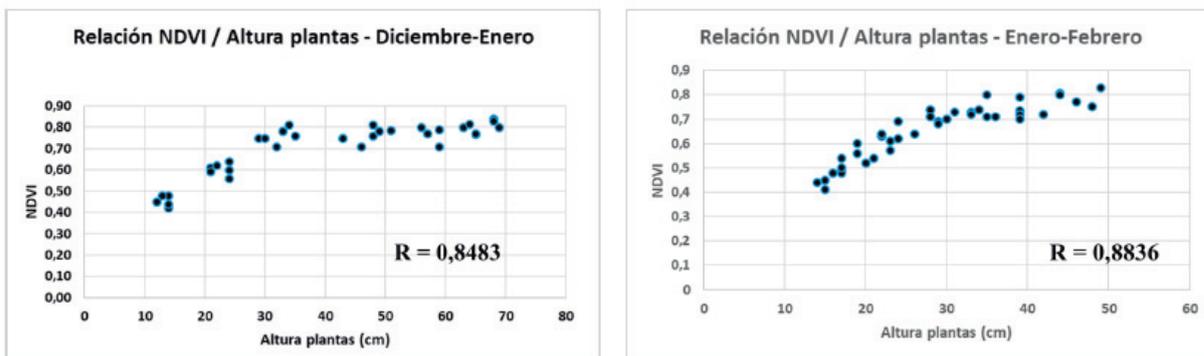


Figura 7. Relación NDVI / Altura plantas, en ambos cortes

3.2. Cítrico

Del análisis de los datos de NDVI, no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes sectores de las copas (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de NDVI de 8 sectores de las copas de pomelos de la fila 3.

Fila 3	Sector A	Sector B	Sector C	Sector D	Sector E	Sector F	Sector G	Sector H
1	0,68	0,58	0,61	0,76	0,77	0,79	0,83	0,73
2	0,84	0,82	0,73	0,80	0,85	0,82	0,81	0,80
3	0,84	0,75	0,64	0,81	0,84	0,84	0,82	0,81
4	0,82	0,79	0,84	0,82	0,84	0,87	0,77	0,79
5	0,79	0,74	0,80	0,79	0,84	0,83	0,76	0,78
6	0,69	0,82	0,85	0,81	0,83	0,83	0,82	0,82
7	0,75	0,79	0,80	0,85	0,76	0,72	0,71	0,68
8	0,79	0,81	0,80	0,83	0,78	0,84	0,83	0,78
9	0,75	0,72	0,84	0,80	0,80	0,82	0,81	0,84
10	0,82	0,83	0,81	0,85	0,83	0,83	0,82	0,79
11	0,63	0,80	0,80	0,86	0,84	0,84	0,82	0,81
12	0,81	0,77	0,82	0,85	0,83	0,76	0,75	0,78
13								
14								
15	0,83	0,77	0,80	0,78	0,82	0,81	0,84	0,78
16	0,78	0,80	0,80	0,85	0,82	0,78	0,76	0,84
17	0,81	0,82	0,81	0,82	0,83	0,78	0,84	0,75
18	0,80	0,82	0,85	0,86	0,84	0,77	0,79	0,86

Se determinó una variabilidad de los valores de NDVI de las copas de los árboles de pomelo (Fig. 8).

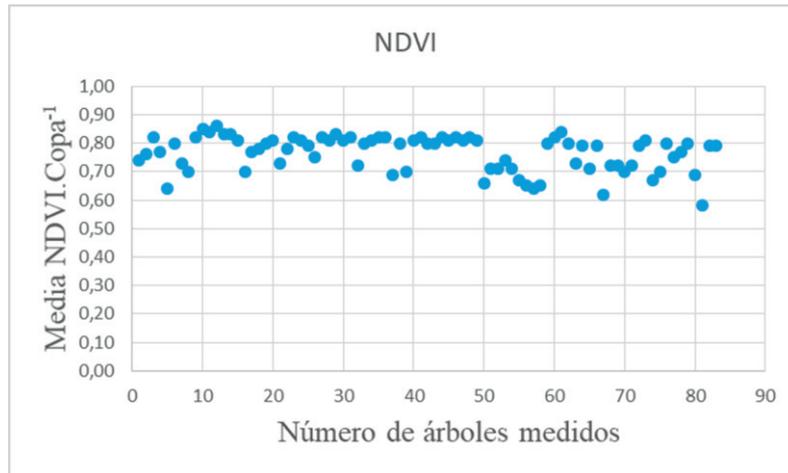


Figura 8. Valores medios de NDVI por árbol

Los valores de CE no expresan una elevada concentración de sales solubles en el suelo, aunque se observa un aumento en profundidad (Fig. 9).

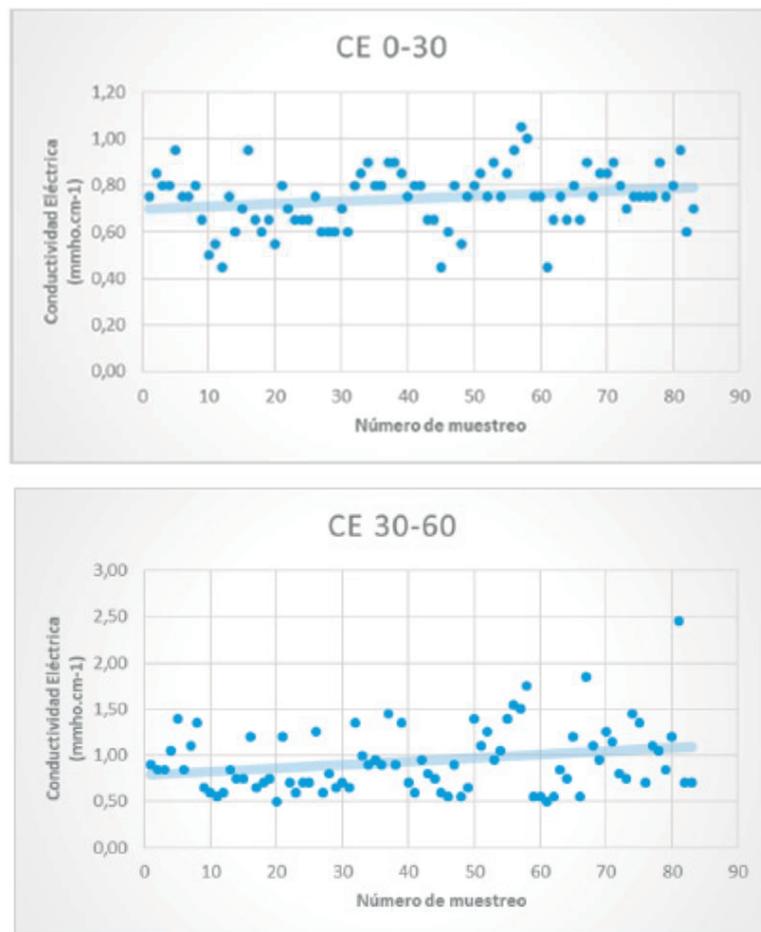


Figura 9. Valores de CE en lote de pomelo, a 0-30 cm y 30-60 cm.

Del análisis estadístico de los datos se determinó una importante relación entre los valores de NDVI de los pomelos y los de CE de sus correspondientes suelos (Fig. 10).

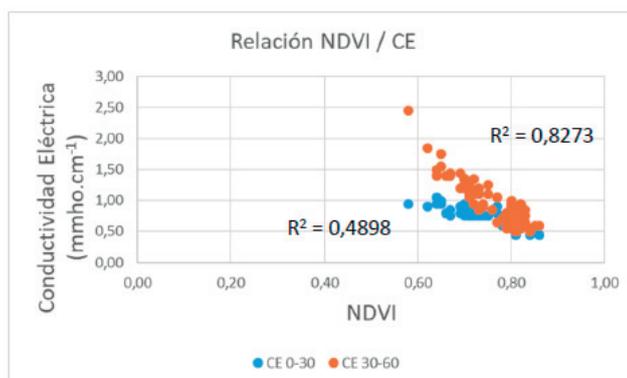


Fig. 10. Relación NDVI / CE en plantación de pomelo

3.3. Viñedo

Se observó un aumento del NDVI entre la primera y segunda lectura, en ambos varietales, volviéndose insensible llegando a la cosecha (Figura 11).

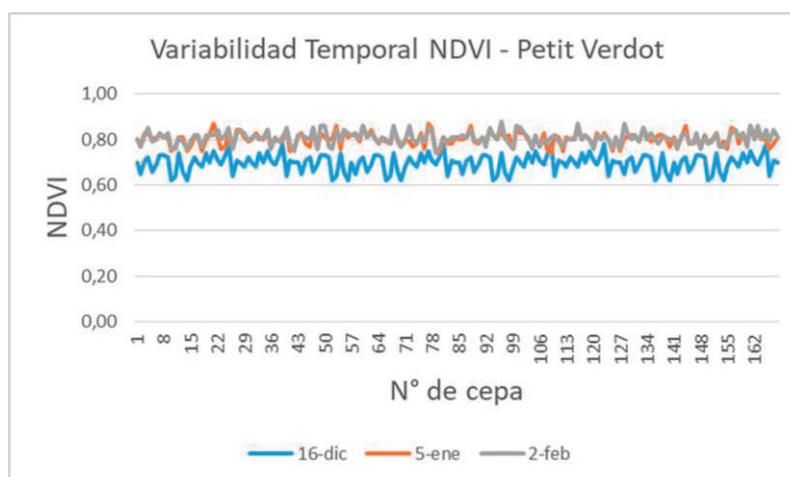


Figura 11. Variabilidad temporal del NDVI en el varietal Petit Verdot

Se registró una marcada variabilidad intervarietal en los valores de NDVI en las distintas etapas. En la Fig. 12 se muestran los valores de NDVI a cosecha (comparación de medias: Petit Verdot 0,808 - Syrah 0,7369).

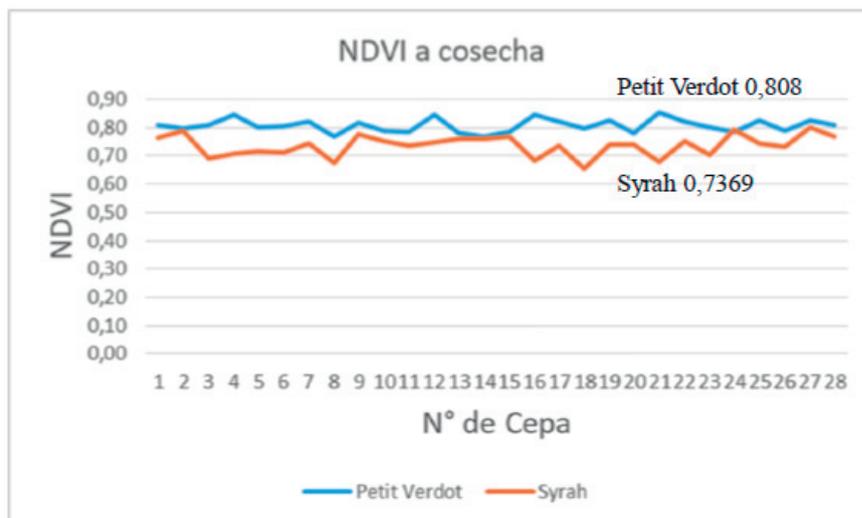


Figura 12. Valores de NDVI de los varietales Petit Verdot y Syrah, a cosecha

Respecto al rendimiento de uva, las diferencias fueron significativas entre los varietales: Petit Verdot $1,141 \text{ kg. cepa}^{-1}$ y Syrah $0,555 \text{ kg. cepa}^{-1}$. Asimismo, se determinó una correlación positiva considerable entre NDVI y Rendimiento, obteniéndose valores de Coeficiente de correlación de Pearson (R) para Syrah de 0,9548 y para Petit Verdot de 0,7956 (Fig. 13).

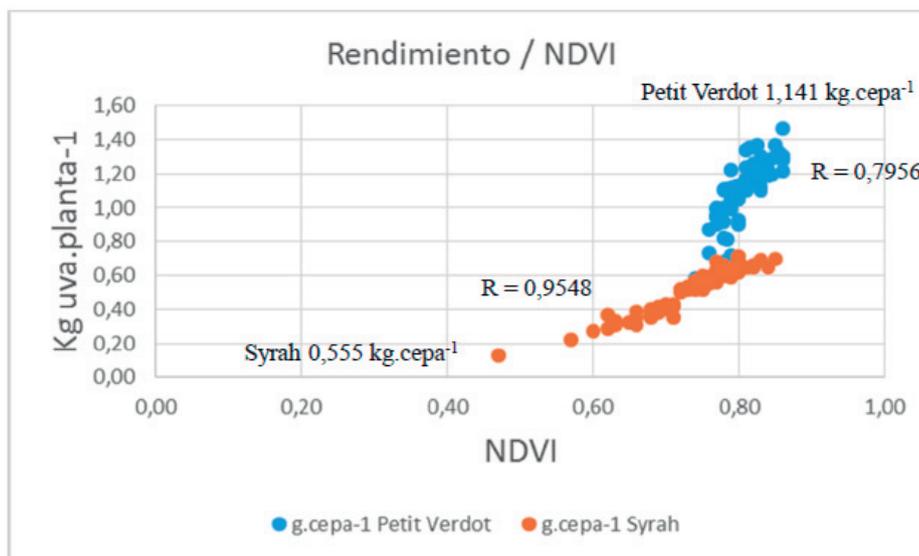


Figura 13. Relación Rendimiento / NDVI en los varietales Petit Verdot y Syrah

4. Conclusiones

4.1 Alfalfa

Si bien los resultados obtenidos de esta investigación son preliminares, del análisis de los datos se observa una correlación positiva considerable entre la altura de las plantas y el Índice de Vegetación NDVI.

Asimismo, el NDVI se volvió insensible cuando la alfalfa alcanzó una altura de 30-35 cm., principalmente en el "corte" Diciembre-Enero que tuvo mayores precipitaciones, ya que las mismas tienen una gran influencia en la producción forrajera del "corte".

4.2. Cítrico

Si bien los resultados obtenidos de esta investigación son preliminares, del análisis de los datos obtenidos se desprende la sensibilidad del índice de vegetación NDVI, determinándose una significativa correlación entre los valores de NDVI y CE, en la profundidad de 30-60 cm ($R^2 = 0,8273$). No se encontró variabilidad significativa entre los valores de NDVI obtenidos en los diferentes sectores de cada árbol, y aunque se observó una variabilidad temporal en los valores de NDVI la misma no fue significativa (datos no mostrados).

4.3. Viñedo

Si bien los resultados obtenidos de esta investigación son preliminares, y deberán ser revalidados en el futuro, del análisis de los datos obtenidos se desprende la sensibilidad del índice de vegetación NDVI, mostrando diferencias significativas en la expresión vegetativa y el rendimiento de la vid, variedades Petit Verdot y Syrah.

Referencias

Angella, G. (2015). Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Brecha de rendimientos y productividad del agua en los cultivos de maíz y algodón – Tesis Doctoral, Programa Biociencias y Ciencias Agroalimentarias, Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, España, 153 pág.

Angella, G. y D. Prieto (2000). Eficiencia de Riego en el Área de Riego del Río Dulce - Memorias del XVIII Congreso Nacional del Agua, ISBN 987-99083-4-1 (libro y CD ROM). Las Termas de Río Hondo, Santiago del Estero, Argentina, 12 al 16 de junio del 2000.

Angella, G. y R. Salgado (2013). Uso real y "teórico" del agua y su impacto en el funcionamiento de un distrito de riego - XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan, Argentina. ISSN N°: 1853-7685. 14 al 18 de octubre de 2013.

Angueira C., J. López, G. Barraza, S. Prieto, G. Angella, D. Prieto (2008). Estimación de cultivos mediante teledetección y SIG en el área de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina - Taller Internacional Red Riegos CYTED, 11 a 14 Noviembre 2008, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

Garnett, T., M.C. Appleby, A. Balmford, I.J. Bateman, T.G. Benton, P. Bloomer (2013). Sustainable intensification in agriculture: premises and policies - *Science* 341,33–34. doi:10.1126/science.1234485

Ochoa, L. H. (2002). El desarrollo del secano. Investigaciones y tecnologías aplicadas al semiárido salino – Ediciones Universidad Católica de Santiago del Estero – 269 pag.

Prieto, D.; R. Soppe y G. Angella (1994). Eficiencia de Uso del Agua de Riego en el Proyecto del Río Dulce, Santiago del Estero. Parte I: La Eficiencia Global del Proyecto - Primeras Jornadas Provinciales de Riego, p. 13-18; Santiago del Estero, Argentina, 7 y 8 de julio de 1994.

Zerda, H.R. (1998). Monitoring der Vegetations - und Landnutzungs - veränderungen durch Brandrodung und Übernutzung im Trocken-Chaco Argentiniens mit Satellitenfernerkundung und GIS – Cuvillier Verlag Goettingen, Alemania. 175 p., ISBN 3-89712-335-5. Tesis Doctoral Universidad de Göttingen, Alemania.

Zerda, H.R. y J.L. Tiedemann (2005). Monitoreo de las coberturas de la provincia de Santiago del Estero mediante índices de vegetación derivados de VEGETATION SPOT4. Actas de Resúmenes de las IV Jornadas de Ciencia y Tecnología, Santiago del Estero, Argentina. 27-28. 10.2005.

Zerda, H.R. y J.L. Tiedemann (2010). Dinámica temporal del NDVI del bosque y pastizal natural en el Chaco seco de la provincia de Santiago del Estero, Argentina – Revista Ambiencia, Guarapuava (PR) v. 6 n. 1 p. 13-24 Jan./Abr. 2010. UNICENTRO, Brasil. ISSN 1808 – 0251.

Modelos de distribución de especies: una revisión sintética de los diferentes métodos

Cristian Savino

Doctor en Ciencias Forestales. Instituto de Protección Vegetal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero

Contacto: savinocristian@gmail.com

RESUMEN

La utilización de modelos de distribución de especies en la actualidad se está generalizando con las múltiples ventajas aplicativas de los SIG y las posibilidades que brindan los sistemas computacionales con la aplicación de algoritmos estadísticos para inferir a partir de datos de presencia o presencia/ausencia, las áreas potencialmente idóneas para la presencia de un organismo en función de diferentes características ambientales. En este trabajo se hace una revisión sintética acerca de los métodos más difundidos para modelar la distribución espacial de los organismos debido a su permanente evolución en cuanto a su metodología y, especialmente sus diferentes aplicaciones en el campo de la ecología.

Palabras clave: modelos predictivos, análisis espacial

1. Introducción

Las primeras aproximaciones para modelizar la distribución de especies a partir de sus relaciones con variables ambientales tienen más de 50 años (Godron 1965). No obstante, debido al gran desarrollo alcanzado en los últimos años por los sistemas de información geográfica (SIG) y las técnicas estadísticas aplicadas se expandieron nuevas herramientas para la investigación en biología: los modelos de distribución de especies (MDE). Estos modelos están en pleno desarrollo dentro de la investigación aplicada,

Una especie tiene un área de distribución actual conocida solo parcialmente y que es inferida mediante datos constatables de localizaciones de la especie. El área de distribución actual está condicionada por factores ambientales, de forma que una especie no estará presente más que en ciertas combinaciones de valores de esas variables. El concepto de idoneidad representa lo adecuado o inadecuado que es un lugar para satisfacer las necesidades o requerimientos de una especie desde el punto de vista biológico: temperatura, precipitación, sustrato geológico y, en general, cualquier variable ambiental.

Las aplicaciones de este tipo de modelos son numerosas y continuamente aparecen artículos o proyectos con nuevos usos. Algunas de ellas son: el estudio de los patrones

de riqueza de especies (Wohlgemuth et al. 2008), de la distribución potencial de comunidades (Felicísimo et al. 2005), de hábitats amenazados (Mücher et al. 2009) y de especies en el pasado (Médail y Diadema 2009), el estudio del riesgo asociado a las especies invasoras (Herborg et al. 2009), la conservación de especies amenazadas (Parviainen et al. 2009), los efectos potenciales del cambio climático (Felicísimo et al. 2011), la definición de patrones de diversidad (Ferrier et al. 2007), el diseño objetivo de reservas (Early et al. 2008), estudios de conservación (Rodríguez et al. 2007), filogeografía (Waltari y Guralnick 2009), biogeografía (Richards et al. 2007), delimitación de regiones biogeográficas (Peters y Thackway 1998), localización de lugares donde pueden existir nuevas especies (Raxworthy et al. 2003), localización de nuevas presencias de especies raras (Williams et al. 2009), delimitación de lugares para futuros trabajos de campo (Guisan et al. 2006), reintroducción de especies amenazadas (Mártinez-Meyer et al. 2006), localización de corredores óptimos para la distribución de especies (Williams et al. 2005), conservación de especies raras (Parviainen et al. 2008), delimitación de puntos calientes de biodiversidad (Richardson et al. 2006), el contraste de hipótesis relacionadas con la teoría de la evolución (Peterson et al. 1999), los efectos de las actividades humanas en la distribución de especies (Seoane et al. 2006), la taxonomía (Gaubert et al. 2006) o la distribución potencial de enfermedades infecciosas (Peterson et al. 2002).

La construcción de modelos de distribución de especies es, esencialmente, un proceso de clasificación (Guisan y Zimmermann, 2000). La variable dependiente es dicotómica (presencia/ ausencia) y las independientes pueden ser cuantitativas (e.g., temperatura o elevación) o nominales (e.g., litología o uso del suelo). Los métodos implicados son clasificadores que deben generar un valor numérico para cada punto del terreno. Dicho valor refleja, directa o indirectamente, la idoneidad de presencia de la especie en función de los valores locales de las variables independientes.

En realidad, solo señalan la similitud ambiental de cada punto del terreno con las zonas de presencia actual de la especie. La "probabilidad de presencia" es, por tanto, una interpretación abusiva de la medida de similitud ambiental que debería ser interpretada, como mucho, como un valor de idoneidad para el desarrollo de la especie. Así, por ejemplo, es posible que el modelo delimite zonas potenciales muy alejadas geográficamente de las actuales; la probabilidad de encontrar la especie en ellas no es a priori alta, aunque potencialmente las condiciones ambientales fueran favorable (Mateo, et al. 2011).

Las variables ambientales comúnmente utilizadas son: (1) variables climáticas, generadas normalmente a partir de la interpolación de datos de estaciones climatológicas y utilizando la elevación como covariable (Hijmans et al. 2005, Soria-Auza et al. 2010, Felicísimo et al. 2011); (2) información sobre edafología, litología y geología, que representan la dependencia de la vegetación con el tipo de sustrato; (3) elevación y variables derivadas, tanto topográficas —pendiente, curvatura o rugosidad—, microclimáticas —radiación solar potencial— como hidrológicas —red de drenaje o flujo potencial—; (4) variables obtenidas mediante teledetección, como índices de vegetación, temperatura en superficie o clasificaciones de la cubierta del suelo (ver Bradley & Fleishman 2008), que han sido relativamente poco empleadas

aunque tienen un importante potencial (Muñoz et al. 2004, Zimmermann et al. 2007, Buermann et al. 2008, Saatchi et al. 2008, Tingley & Herman 2009); (5) finalmente, algunos modelos han tenido en cuenta variables de tipo demográfico y de ocupación del espacio, como índices de población, accesibilidad, densidad o proximidad a vías de comunicación, que son útiles como indicadores del grado de influencia antrópica (Pahari & Murai 1999, Cuesta et al. 2003, Kadmon et al. 2004).

Métodos de modelización

Según los datos de variable dependiente empleados, se pueden dividir en dos grandes grupos que se resumen en Tabla 1.

El primer grupo de métodos (los que solo usan registros de presencia) incluye un método de estilo de sobre (BIOCLIM) que caracteriza los sitios que se encuentran dentro del hiperespacio ambiental ocupado por una especie, y dos métodos basados en la distancia (DOMAIN y VIVE) que evalúan nuevos sitios en términos de su similitud ambiental con sitios de presencia conocida. Los Dos métodos basados en la distancia difieren tanto en su teoría supuestos y los procedimientos utilizados para el cálculo similitudes. También se incluye en este grupo a MAXENT que emplea sólo registros de presencia, pero genera a partir de ellos pseudoausencias (background).

El segundo grupo incluye la modelación a través de métodos de regresión. Los modelos lineales generalizados (GLM) y modelos aditivos generalizados (GAM) son utilizados extensivamente en modelos de distribución de especies Debido a su fuerte fundamento estadístico y capacidad de modelar de manera realista las relaciones ecológicas (Austin 2002).

Tabla 1. Diferentes tipos de modelos, según software de aplicación y datos de entrada

Método	Tipo de modelo	Datos	Software
BIOCLIM	Algoritmo de cubierta ambiental	P	DIVA-GIS
BRT	Árbol de decisión	P-A	R
GARP	Regla de algoritmos genéticos	P-A	Desktop Garp
DOMAIN	Distancias multivariadas	P	DIVA-GIS
GAM	Modelo aditivo generalizado: regresión	P-A	S-plus
GDM	Modelo generalizado de disimilitud	P-A	Arcview y S-plus
MAXENT	Máxima entropía	P	Maxent

P: presencia; **P-A:** presencia-ausencia

Desde una óptica orientada al tipo de técnica aplicada, la revisión más completa hasta el momento es de Elith et al. (2006), donde clasifica los métodos en tres grupos:

Técnicas discriminantes

Son aquellas que necesitan datos de presencia y ausencia para construir el clasificador. Pueden subdividirse a su vez en: (1) árboles de clasificación —CART, classification and regression trees— (Breiman et al. 1984) y la pléyade de técnicas derivadas, como random forest (Breiman 2001), boosted regression trees —BRT— (Friedman 2001, Elith et al. 2008) o mixture discriminant analysis —MDA— (Hastie & Tibshirani 1996); (2) técnicas de ordenación, como el análisis de correspondencia canónica —CCA— (Guisan et al. 1999); (3) redes neuronales —ANN, assisted neural network— (Pearson et al. 2002, Venables & Ripley 2002); (4) multivariate adaptive regression splines —MARS— (Friedman 1991); (5) modelos lineales generalizados —GLM, generalized linear models—, entre los que la regresión logística puede considerarse el método pionero (McCullagh & Nelder 1989), al que han seguido técnicas como support vector machines —SVM— (Vapnik 1995) o generalized regression analysis and spatial prediction o GRASP (Lehmann et al. 2003); (6) modelos aditivos generalizados —GAM, generalized additive models— (Hastie & Tibshirani 1986), BRUTO (Hastie et al. 1994); (7) regresión por cuantiles (Vaz et al. 2008); (8) estadística bayesiana (Termansen et al. 2006, Latimer et al. 2009); y (9) máxima entropía, entre los que destaca Maxent (Phillips et al. 2006, Phillips & Dudík 2008). Maxent genera sus propias ausencias, denominadas "background" por lo que no es necesario introducir datos de ausencia en el programa.

Técnicas descriptivas

Estas técnicas, que solo requieren datos de presencia, fueron las primeras utilizadas en modelización: (1) deductivas, como la opinión del experto, (2) envueltas geográficas o convex hull (Worton 1995); (3) envueltas ambientales, como BIOCLIM (Busby 1986, 1991), ANUCLIM (Houlder et al. 1999), BIOMAP (Nix and Switzer 1991), HABITAT (Walker & Cocks 1991) o FLORAMAP (Jones & Gladkov 1999); (4) métodos de distancias matemáticas, como DOMAIN, que utiliza la distancia de Gower (Walker & Cocks 1991, Carpenter et al. 1993) o Biomapper, ENFA, LIVES y MADIFA, que se basan en la distancia de Mahalanobis (Hirzel et al. 2002, Calenge et al. 2008); y, finalmente, (5) Expectation—Maximization Algorithm —EM— (Ward et al. 2008).

Técnicas mixtas

Emplean varias reglas, algunas de ellas descriptivas y otras discriminantes, a la vez que generan sus propias pseudo-ausencias; Desktop-GARP (Stockwell & Peters 1999) y OM-GARP (Elith et al. 2006) son los mejor y más ampliamente conocidos.

A partir de los modelos individuales obtenidos con diferentes métodos se pueden generar "modelos de consenso", en los que el modelo final indica el grado de coincidencia entre varios modelos (Araújo & New 2007, Marmion et al. 2009); BIOMOD (Thuiller et al. 2009) es una herramienta programada específicamente para la generación de modelos de consenso.

En los últimos años se llevaron a cabo varias revisiones comparando diferentes métodos que analizan la distribución de diferentes especies, como por ejemplo para *Buxus balearica* en el sur de España (Navarro-Cerrillo et al. 2011) en Fig. 1.

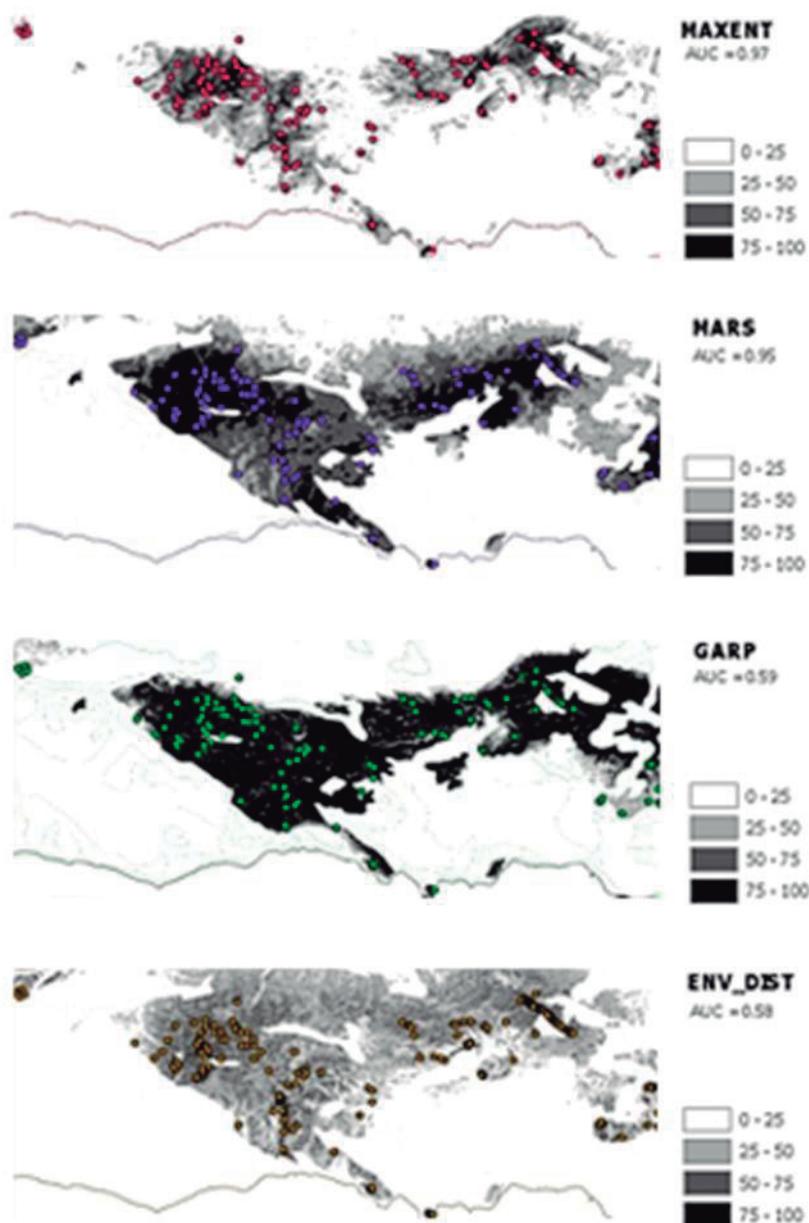


Figura 1. Distribución potencial de *Buxus balearica* usando Maxent, Mars, GARP y Env_Dist (Distancia ambiental).

Conclusiones

Los modelos de distribución de especies representan una información que sintetiza relaciones entre especies y variables ambientales que serían difíciles de interpretar o incluso de apreciar por otros medios. Es una técnica en evolución donde aún queda mucho trabajo por hacer desde el punto de vista metodológico, especialmente a la hora de incluir los factores espacial, temporal y biótico en su forma de operar. Los diferentes métodos que actualmente existen permiten a los investigadores la posibilidad de elegir de acuerdo a sus criterios y datos disponibles los más convenientes o fiables según sus propias experiencias, esto ha elevado el número de publicaciones de manera significativa, con resultados que alientan a construir modelos más realistas para una mejor comprensión de los sistemas ecológicos. A pesar de algunas limitaciones que aún existen, un elevado número de estudios ha demostrado su utilidad en campos en los que pocas técnicas nos pueden brindar ayuda para entenderlos, como predecir la presencia de especies aún no descritas (Raxworthy et al. 2003) o para modelar la distribución de especies en el pasado (Martínez-Meyer & Peterson 2006). Por lo tanto, estos modelos deben considerarse como un acercamiento útil y mejorable, y como una herramienta aplicable a otros problemas actuales como, por ejemplo, la previsión de los potenciales impactos del cambio climático en la distribución de las especies (Pearson & Dawson 2004).

Referencias

- Araújo, M.B. y New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution* 22: 42-47.
- Austin, M. (2007). Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling* 200: 1-19.
- Bradley, B.A. y Fleishman, E. (2008). Can remote sensing of land cover improve species distribution modelling? *Journal of Biogeography* 35: 1158-1159.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning* 45: 5-32.
- Breiman, L., Friedman, F., Olshen, R. y Stone, C. (1984). *Classification and regression trees*. Wadsworth and Brooks, Pacific Grove, CA.
- Buermann, W., Saatchi, S., Smith, T.B., Zutta, B.R. y Chaves, J.A. (2008) Predicting species distributions across the Amazonian and Andean regions using remote sensing data. *Journal of Biogeography* 35: 1160-1176.
- Busby, J.R. (1986). *Bioclimate prediction system (BIOCLIM). User's manual version 2.0*. Australian Biological Resources, Study Leaflet, Canberra, Australia

Busby, J.R. (1991). BIOCLIM: A bioclimate analysis and prediction system. En: Margules CR & MP Austin (eds) Nature conservation: Cost effective biological surveys and data analysis. CSIRO, Melbourne, Australia.

Calenge, C., Darmon, G., Basille, M., Loison, A. y Jullien, J.M. (2008). The factorial decomposition of the Mahalanobis distances in habitat selection studies. *Ecology* 89: 555-566.

Carpenter, G., Gillison, A.N. y Winter, J. (1993). DOMAIN: A flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation* 2: 667-680.

Cuesta, F., Peralvo, M.F. y Van Manen, F.T. (2003). Andean bear habitat use in the Oyacachi River Basin, Ecuador. *Ursus* 14: 198-209.

Early, R., Anderson, B. y Thomas, C.D. (2008) Using habitat distribution models to evaluate large-scale landscape priorities for spatially dynamic species. *Journal of Applied Ecology* 45: 228-238.

Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, S. (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129-151.

Elith, J., Leathwick, J.R. y Hastie, T. (2008) A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* 77: 802-813.

Felicísimo, A.M., Gómez, A. y Muñoz, J. (2005) Potencial distribution of forest species in dehesas of Extremadura (Spain). En: Schnabel S & A Ferreira (eds) Sustainability of agrosilvopastoral systems-dehesa. *Advances in GeoEcology* 37: 231-246. Catena Verlag, Reiskirchen.

Felicísimo, A.M., Muñoz, J., Villalba, C. y Mateo, R.G. (2011) Análisis de impactos y vulnerabilidad de la flora y vegetación españolas ante el cambio climático. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Madrid, España.

Ferrier, S., Manion, G., Elith, J. y Richardson, K. (2007) Using generalised dissimilarity modelling to analyse and predict patterns of beta-diversity in regional biodiversity assessment. *Diversity and distributions* 13: 252-264.

Friedman, J.H. (2001) Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics* 29: 1189-1232.

Friedman, J.H. (1991) Multivariate adaptive regression splines. *Annals of Statistics* 19: 1-141.

- Gaubert, P., Papes, M. y Peterson, A.T. (2006) Natural history collections and the conservation of poorly known taxa: Ecological niche modeling in central African rainforest genets (*Genetta* spp.). *Biological Conservation* 130: 106-117.
- Godron, M. (1965) Les principaux types de profils écologiques. CNRS-CEPE, Montpellier, Francia.
- Guisan, A., Weiss, S.B. y Weiss, A.D. (1999) GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143: 107-122.
- Guisan, A. y Zimmermann, N.E. (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147-186.
- Hastie, T., Tibshirani, R. y Buja, A. (1994) Flexible discriminant analysis by optimal scoring. *Journal of the American Statistical Association* 89: 1255-1270.
- Hastie, T. y Tibshirani, R. (1996) Mixture discriminant analysis. S (plus) routine, Statistics Department, Stanford University. En : <http://lib.stat.cmu.edu/S/> (Acceso: 30.09. 2017).
- Herborg, L.M., O'Hara, P. y Therriault, T.W. (2009) Forecasting the potential distribution of the invasive tunicate *Didemnum vexillum*. *Journal of Applied Ecology* 46: 64-72.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. y Jarvis, A. (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hirzel, A.H., Hausser, J., Chessel, D. y Perrin, N. (2002) Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology* 83: 2027-2036.
- Houlder, D., Hutchinson, M.F., Nix, H.A., y McMahon, J.P. (1999) ANUCLIM user's guide. CRES, Canberra, Australia.
- Jones, P.G. y Gladkov, A. (1999). FloraMap: A computer tool for predicting the distribution of plants and other organisms in the Wild. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.
- Kadmon, R., Farber, O. y Danin, A. (2004) Effect of roadside bias on the accuracy of predictive maps produced by bioclimatic models. *Ecological Applications* 14: 401-413.
- Latimer, A.M., Banerjee, S. y Mosher, E.S. (2009) Hierarchical models facilitate spatial analysis of large data sets: A case study on invasive plant species in the northeastern United States. *Ecology Letters* 12: 144-154.

- Lehmann, A., Overton, J. y Leathwick, J.R. (2003). GRASP: Generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological Modelling* 160: 65-183.
- Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R.K. y Thuiller, W. (2009) Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions* 15: 59-69.
- Mccullagh, P. y Nelder, J.A. (1989). *Generalized linear models*. Chapman & Hall editores, Londres, Inglaterra.
- Martínez-Meyer, E., Peterson, A.T., Servín, J.I. y Kiff, L.F. (2006). Ecological niche modelling and prioritizing areas for species reintroductions. *Oryx* 40: 411-418.
- Médail, F. y Diadema, K. (2009). Glacial refugia influence plant diversity patterns in the Mediterranean Basin. *Journal of Biogeography* 36: 1-19.
- Muñoz, J, Felicísimo, A.M., Cabezas, F., Burgaz, A.R. y Martínez, I. (2004) Wind as a longdistance dispersal vehicle in the Southern Hemisphere. *Science* 304: 1144-1147.
- Navarro-Cerrillo, R.M.Hernández-Bermejo, J.E.Hernández-Clemente, R. (2011). Evaluación de modelos para evaluar la distribución de *Buxus balearica* en el sur de España. *Applied Vegetation Science*, 14(2), 256-267.
- Pahari, K. y Murai, S. (1999). Modelling for prediction of global deforestation based on the growth of human population. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 317-324.
- Parviainen, M., Luoto, M., Rytteri, T. y Heikkinen, R.K. (2008). Modelling the occurrence of threatened plant species in taiga landscapes: Methodological and ecological perspectives. *Journal of Biogeography* 35: 1888-1905.
- Parviainen, M., Marmion, M., Luoto, M., Thuiller, W. y Heikkinen, R.K. (2009). Using summed individual species models and state-of-the-art modelling techniques to identify threatened plant species hotspots. *Biological Conservation* 142: 2501-2509.
- Pearson, R.G., Dawson, T.P., Berry, P.M. y Harrison, P.A. (2002). SPECIES: A spatial evaluation of climate impact on the envelope of species. *Ecological Modelling* 154: 289-300.
- Peters, D. y Thackway, R. (1998). A new biogeographic regionalisation for Tasmania. Technical Report NR002, Commonwealth of Australia, Parks & Wildlife Service, Hobart.
- Peterson, A.T., Soberón, J. y Sánchez-Cordero, V. (1999). Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science* 285: 1265-1267.

Peterson, A.T., Sánchez-Cordero, V., Ben Beard, C. y Ramsey, J.M. (2002). Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico. *Emerging Infectious Diseases* 8: 662-667.

Phillips, S.J., Anderson, R.P. y Schapire, R.P. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.

Phillips SJ y M Dudík (2008). Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.

Raxworthy, C.J., Martínez-Meyer, E., Horning, N., Nussbaum, R.A., Schneider, G.E. (2003). Predicting distributions of known and unknown reptile species in Madagascar. *Nature Biotechnology* 21: 837-841.

Richardson, B.J., Zabka, M., Gray, M.R. y Milledge, G. (2006). Distributional patterns of jumping spiders (Araneae: Salticidae) in Australia. *Journal of Biogeography* 33: 707-719.

Rodríguez, J.P., Brotons, L., Bustamante, J. y Seoane, J. (2007). The application of predictive modelling of species distribution to biodiversity conservation. *Diversity and Distributions* 13: 243-251.

Saatchi, S., Buermann, W., Steege, H.T., Mori, S. y Smith, T.B. (2008). Modeling distribution of Amazonian tree species and diversity using remote sensing measurements. *Remote Sensing of Environment* 112: 2000-2017.

Seoane, J., Justribó, J.H, García, F., Retamar, J. y Rabadán, F. (2006). Habitat-suitability modelling to assess the effects of land-use changes on Dupont's lark *Chersophilus duponti*: A case study in the Layna Important Bird Area. *Biological Conservation* 128: 241-252.

Soria-Auza, R.W., Kessler, M., Bach, K., Barajas-Barbosa, P.M, Lehnert M. (2010). Impact of the quality of climate models for modelling species occurrences in countries with poor climatic documentation: A case study from Bolivia. *Ecological Modelling* 221: 1221-1229.

Stockwell, D. y Peters, D. (1999). The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science* 13:143-158.

Termansen, M, McClean, CJ y Preston, C.D. (2006). The use of genetic algorithms and Bayesian classification to model species distributions. *Ecological Modelling* 192: 410-424.

Tingley, R. y Herman, T.B. (2009). Land-cover data improve bioclimatic models for anurans and turtles at a regional scale. *Journal of Biogeography* 36: 1656-1672.

Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R., y Araújo, M.B. (2009). BIOMOD - A platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* 32: 369-373.

Vapnik, V. (1995). *The nature of statistical learning theory*. Springer-Verlag editores, Nueva York, Estados Unidos.

Vaz, S., Martin, C.S., Eastwood, P.D., Ernande, B., Carpentier, A. (2008). Modelling species distributions using regression quantiles. *Journal of Applied Ecology* 45: 204-217.

Venables, W.N. y Ripley, B.D. (2002). *Modern applied statistics with S-PLUS*. Springer, Nueva York, USA.

Walker, P.A. y Cocks, K.D. (1991). HABITAT: A procedure for modelling a disjoint environmental envelope for a plant or animal species. *Global Ecology and Biogeography Letters* 1: 108-118.

Waltari, E y Guralnick, R.P. (2009). Ecological niche modelling of montane mammals in the Great Basin, North America: Examining past and present connectivity of species across basins and ranges. *Journal of Biogeography* 36: 148-161.

Ward, G., Hastie T, Barry S., Elith J., y Leathwick J.R. (2008). Presence-only data and the EM algorithm. *Biometrics* 65: 554-563.

Williams, P., Hannah L., Andelman, S., Midgely, G., Araújo M. (2005). Planning for climate change: Identifying minimum dispersal corridors for the Cape Proteaceae. *Conservation Biology* 19: 1063-1074.

Williams, J, Seo, C., Thorne, J, Nelson, JK, Erwin, S. (2009). Using species distribution models to predict new occurrences for rare plants. *Diversity and Distributions* 15: 565-576.

Wohlgemuth T., Nobis, M., Kienast, F. y Plattner, M. (2008). Modelling vascular plant diversity at the landscape scale using systematic samples. *Journal of Biogeography* 35: 1226-1240.

Worton B.J. (1995). A Convex Hull-Based Estimator of Home-Range Size. *Biometrics* 51: 1206-1215.

Zimmermann, N., Moisen G., Frescino T. y Blackard J. (2007). Remote sensing-based predictors improve distribution models of rare, early successional and broadleaf tree species in Utah. *Journal of Applied Ecology* 44: 1057-1067.

Innovar en el Agro: Eficiencia etapa por etapa.

Danel Leiva ¹, Victoria Soda ²

¹ Especialista en Agricultura de Precisión; *Director Implementación Tecnológica GeoAgro by TEK* ² Especialista en Gestión de la Innovación y la Vinculación Tecnológica; Lic. en Comunicación Social; *Directora Departamento Comunicación GeoAgro by TEK*.

Contactos: dleiva@geoagro.com (1), vs@geoagro.com (2)

RESUMEN

Las tecnologías están modificando permanente e irreversiblemente la forma en la que vivimos y trabajamos. La producción agropecuaria no está exenta de esta realidad y de hecho ya existen cientos de plataformas web, apps y nuevas fuentes de información al alcance del productor. El gran desafío es comprender que la adquisición de tecnologías por sí solas no genera innovación real, sino que la clave está en integrarlas en los procesos cotidianos: garantizar su uso por parte de los equipos de trabajo para mejorar la eficiencia en cada etapa del ciclo productivo, mejorando los márgenes del negocio y haciéndolo cada vez más sustentable desde las perspectivas ambiental y económica. Para innovar con éxito es necesario planificar la incorporación de nuevas tecnologías, considerando siempre la forma en que éstas serán apropiadas e implementadas por los equipos de trabajo. Preguntarnos acerca de ¿cómo podemos mejorar la eficiencia? es el punto de partida que proponemos desde GeoAgro by TEK para acompañar estos procesos de cambio y mejora continua.

Palabras clave: tecnologías, implementación, mejores decisiones.

1. Introducción

La lluvia de novedades de Agricultura de Precisión y Agtech nos obliga a hacer un balance y comenzar a preguntarnos cómo las incorporamos, por dónde empezar, ya que el conocimiento generado a partir de la modernización del agro es la llave del futuro de los negocios e incluso es la condición de supervivencia de muchas empresas. Esta nueva era digital nos propone desafíos agronómicos y académicos de carácter nunca antes vistos y la velocidad en la que suceden los cambios agrava aún más la situación. Los procesos de cambio disruptivo que se vienen dando en otras áreas de la actividad económica, cultural, de entretenimiento, etc. (Fig. 1), nos ponen frente a la exigencia de medir -o al menos imaginar-, los riesgos de no innovar.

El principal cambio tiene que ver con buscar mejorar la rentabilidad, ya que nos entrega un éxito a corto plazo que es el impacto económico y eso se logra incorporando tecnologías que nos ayuden a mejorar la eficiencia y manejar nuestros riesgos.



Figura 1. La nueva era digital como una gran ola disruptiva, que viene a modificar las reglas de juego.

2. La clave para innovar

El gran problema de adopción de las Agtech se debe al choque de dos modelos organizacionales diferentes. Por un lado, los viejos esquemas de dirección y control, con estructuras rígidas, verticalistas y de mayor resistencia al cambio. Por el otro, organizaciones más flexibles, colaborativas, resilientes, con mayor capacidad de adaptación y asimilación de herramientas, contextos y condiciones diferentes.

En este ese marco, es evidente que la tecnología lleva un ritmo exponencial pero las personas y las organizaciones han quedado desenchajadas respecto a la velocidad de crecimiento. Es allí donde el planteo que debemos hacernos y ayudar o motivar a hacer es: ¿Qué es lo que quiere la gente del trabajo? ¿Cómo se transforman las organizaciones? ¿Hacia dónde van los nuevos modelos de negocios y con ello los nuevos trabajos? Profesionalmente debemos prepararnos y considerar formar nuestro discurso asumiendo estas premisas como fundamentales para lograr ser exitosos en los cambios que requiere la innovación en el agro.

Hay una nueva agricultura con las tecnologías como protagonistas, siendo actores claves las empresas en términos de equipos de trabajo, las personas que integran las mismas, el medio ambiente y el contexto social (Fig. 2). Se busca minimizar el impacto de los recursos sobre el contexto general, lo cual obliga a que los sistemas sean más eficientes y logremos identificar los factores de variabilidad presentes en los campos.

Las decisiones se deben tomar lote a lote, ambiente por ambiente, momento a momento en el desarrollo de un cultivo y hay que asumir que los problemas y resoluciones a gran escala van a dejar de existir teniendo cada día una agricultura compleja desde la interpretación y la gestión de las respuestas encontradas.

La clave:
Involucrar al equipo de trabajo en el proceso de cambio!
 Innovar no es solo incorporar tecnologías.

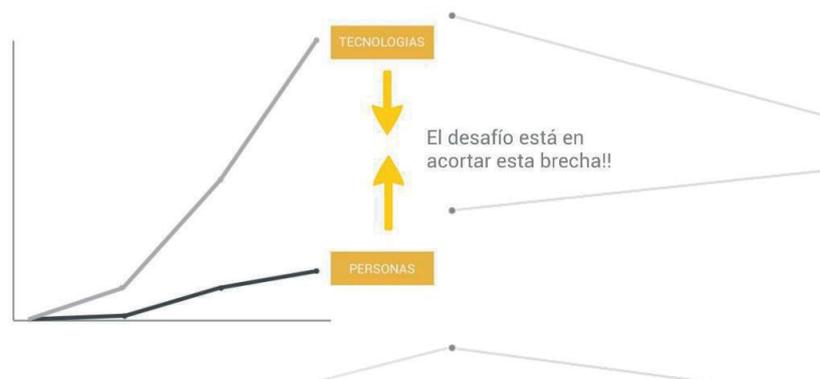


Figura 2. Evolución de tecnologías y adopción de las personas

Las empresas que realmente quieran innovar deberán rediseñar procesos y acciones ejecutando de forma efectiva decisiones a campo.

Desde GeoAgro entendemos que la incorporación de tecnologías no garantiza innovación y que más bien es un proceso en el cual, si la decisión empresarial acompaña las acciones, la madurez del equipo va haciendo que campaña tras campaña se logre mejorar procesos. Nuestro modelo propone la implementación de un método de seguimiento, guiado por especialistas que acompañan a los grupos de trabajo en la definición de las metas claves (preferentemente no más de 3 por campaña), las actividades necesarias para alcanzarlas, instancias de control de avance y puestas en común de resultados parciales y finales periódicamente. Este seguimiento se realiza a través de talleres (reuniones presenciales) de inicio, seguimiento y cierre y reuniones remotas quincenales o mensuales.

El desafío es adoptar tecnologías en primera medida e inmediatamente atreverse a adaptarlas para el rediseño de procesos críticos y cruciales para la empresa. La búsqueda de la eficiencia puede (y debe) ser un hecho transversal a todas las etapas en el transcurso agrícola.

3. Eficiencia etapa por etapa

La mayoría de las Agtech nos permiten ir hacia sistemas más eficientes y el gráfico de etapas agrícolas nos ayuda a reconocer oportunidades para rediseñar procesos (Fig. 3).



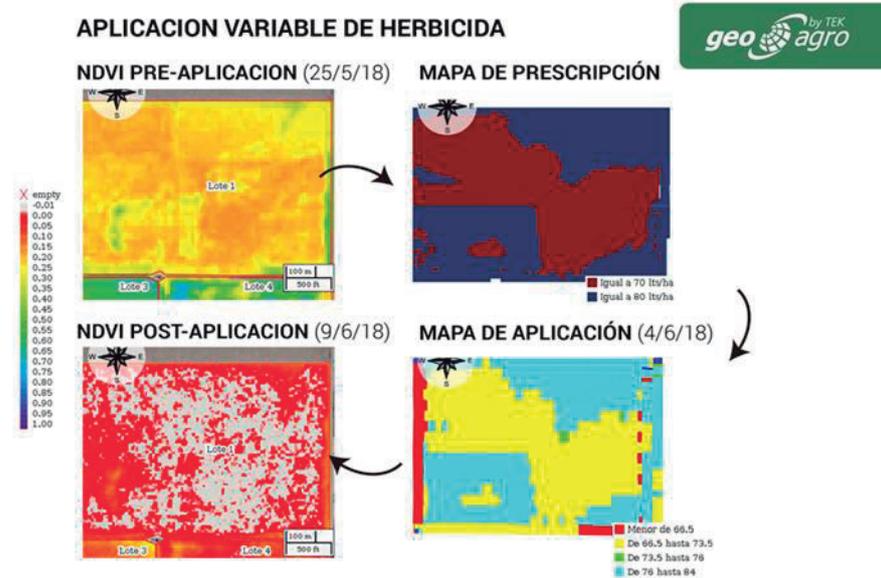
Figura 3. Uso efectivo de AGTECH: Eficiencia en cada una de las etapas agrícolas.

En GeoAgro trabajamos con dos grandes grupos de tecnologías de innovación, que pueden atravesar todas las etapas del ciclo productivo:

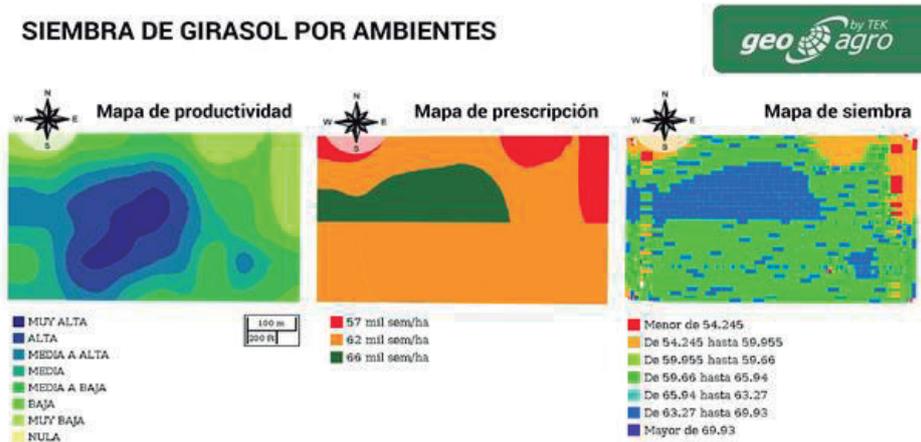
- **el monitoreo satelital de cultivos**, que implica utilizar índices verdes (NDVI) de actualización periódica para realizar seguimiento de cultivos, planificar recorridos dirigidos por los lotes, llegar a tiempo frente a ciertos sucesos que requieren actuar con celeridad, etc.
- **el manejo por ambientes**, que implica identificar la variabilidad ambiental y tratar a cada sector de los lotes de acuerdo a su potencial productivo. Nos especializamos en acompañar esta nueva forma de decidir, buscando reemplazar los valores promedios de los lotes (sabiendo que históricamente aplicamos lo mismo a los lotes y encontramos respuestas diferentes) y es ahí donde nuestro expertise de más de 10 años acorta la brecha entre las opciones de trabajo logrando minimizar errores y garantizando el éxito y lo realizable en las nuevas estrategias agronómicas.

A los fines de clarificar el enfoque, aportamos a continuación algunos ejemplos de mejora en la eficiencia de procesos en tres de las siete etapas del ciclo productivo:

- **Pre-siembra:** el monitoreo satelital es una herramienta muy valiosa para realizar seguimiento de barbechos y control de malezas. Ver los lotes “desde arriba” permite llegar a tiempo y realizar aplicaciones sectorizadas de herbicida, como se observa en la siguiente figura. Este ejemplo también incluye el control de calidad de aplicación y el seguimiento de la evolución posterior del lote.



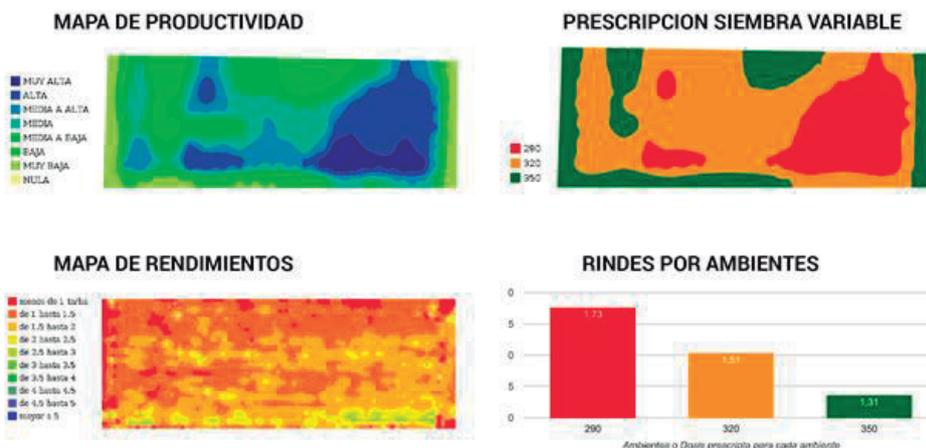
- **Siembra variable:** En base al mapa de productividad histórica se pueden caracterizar ambientes y planificar aplicación de insumos en base al potencial productivo de cada sector del lote. En este caso se realizó una siembra variable en girasol (densidad) en la mitad superior del lote, dejando la otra zona con densidad fija para poder comparar resultados y sacar conclusiones. El mapa de siembra refleja la calidad de la labor realizada.



- **Análisis de campaña:** las plataformas tecnológicas disponibles permiten acumular información de las diferentes instancias de la campaña, para luego

realizar análisis y sacar conclusiones. En este ejemplo, se inicia el ciclo con mapas de productividad histórica del cual surge la prescripción de semilla de soja. El ciclo se cierra con el mapa de rinde, que permite chequear / validar la estrategia en cada ambiente. En este caso fue: a mayor productividad, menor densidad de semillas.

Análisis de campaña - Soja 2017/2018



4. Conclusiones

Uno de los puntos más críticos que percibimos es que las tecnologías están por delante de cómo pensamos o podemos resolver los problemas y es por ello que ponemos foco en el trabajo aplicado con las tecnologías como medio para poder alcanzar el rediseño de los procesos.

Logrando trabajar de forma acoplada o mancomunada las Agtech con la información generada y la transformación de esa información en conocimiento genuino de nuestros lotes vamos a lograr reducir los fracasos y aumentar la brecha potencial productiva. La experiencia obtenida hasta aquí nos indica que la clave para ser exitoso en este proceso es alinear los equipos de trabajo bajo unas metas claras planteadas con anticipación.

Agradecimientos

A todo el equipo de GeoAgro by TEK y a nuestros clientes amigos por confiar y permitirnos crecer, innovar es fácil, innovar juntos es mejor. Al mentor de líderes Rodolfo Di Pollina. A Victoria Soda por acompañar en la constante transformación de ideas en expresiones.

Exploración de tendencias fenológicas de ambientes ribereños mediante series temporales de MODIS. Estudio de caso ríos Horcones y Urueña en la provincia de Santiago del Estero

Lic. Ernestina Bonacina (1) y Dr. Hugo Zerda (2), SIGL@b – INPROVE, Facultad de Ciencias Forestales, UNSE.

Contacto: ernebonacinam@gmail.com (1), hzerda@unse.edu.ar (2)

RESUMEN

El término Big Data hace referencia a grandes volúmenes de datos, cuyo tamaño y heterogeneidad supera la capacidad que presentan las herramientas tradicionales de bases de datos de recopilar, almacenar, gestionar y analizar la información. Los productos satelitales son una importante fuente de datos que tienen un rol fundamental en la valoración del medio ambiente, explorándose aquí la disponibilidad de diversas bases de datos en la Web. El objetivo del trabajo fue aplicar las tecnologías de teledetección y los SIG para analizar la dinámica vegetal de las subcuencas de los ríos Horcones y Urueña, y su interacción con la incidencia de las lluvias. Para el análisis se utilizaron series temporales del índice de vegetación mejorado (EVI) derivados del instrumento MODIS de TERRA. Los resultados muestran que la dinámica de la vegetación responde a patrones de precipitación, aunque, los valores acumulados reflejaron una asociación más débil. La vegetación presente en la subcuenca del Urueña presentó mayor vigor vegetal bajo regímenes de lluvias similares.

Palabras clave: EVI, big data, percepción remota, SIG

1. Introducción

Diariamente se producen grandes volúmenes de datos de diversos tipos (textos, imágenes, audio, videos) y fuentes (web, teléfonos móviles, GPS, redes sociales, sensores). En este contexto, se comienza a hablar de Big Data, haciendo referencia a grandes volúmenes de datos, cuyo tamaño y heterogeneidad supera la capacidad que presentan las herramientas tradicionales de bases de datos de recopilar, almacenar, gestionar y analizar la información (De Battista et al. 2016).

Actualmente esta tecnología está aportando grandes beneficios en el cuidado del medio ambiente al proveer información y datos geolocalizados útiles para la planificación y gestión de los recursos naturales. A través de Internet es posible acceder a grandes bases de datos ambientales (Zerda 2014).

Las imágenes de satélite tienen un rol fundamental en la valoración del medio ambiente (Cornejo 2018), a través de su análisis es posible obtener la distribución espacial y temporal de variables claves para entender los fenómenos ambientales; éstas brindan una gran cantidad de datos sobre la superficie terrestre, producidas en una gama cada vez más amplia de resoluciones espaciales, espectrales, radiométricas y temporales (Blaschke 2010), con acceso de forma simple y a bajo costo o de forma gratuita a través de internet. A esto se suma su formato digital que permite combinarlos con softwares que facilitan la integración y el análisis de la información (Gatto 2007).

Los sistemas de información geográfica (SIG), son herramientas que permiten la captura, ingreso, almacenamiento y análisis de datos vinculados a una referencia espacial, también llamados datos geográficos (Vergés y Bocco 2003). Las nuevas tecnologías SIG trabajan con información digital, siendo los satélites su principal fuente de datos. A través de estos programas se hace posible la combinación de

distintos elementos en capas de información que permite establecer patrones y predecir comportamientos, generando información valiosa para tomar mejores decisiones. La disponibilidad de datos satelitales y su integración en sistemas de información geográfica (SIG), ha contribuido a la generación de una gran cantidad de información, llevando a cabo análisis complejos que combinan grandes volúmenes de información ambiental, y la producción cartográfica de alta calidad visual (Pernía y Elvecio 1999).

Numerosos programas de observación de la tierra como los de la serie NOAA, SPOT, Landsat, Terra, Aqua o Meteosat, han capturado imágenes de manera continua a lo largo de las últimas décadas proporcionando información para las distintas aplicaciones de la percepción remota. Actualmente son muchos los satélites que proporcionan enormes cantidades de datos (Moclán Soria 2016) que han resultado de importancia en estudios globales y regionales de biodiversidad, conservación de la naturaleza, impacto de la deforestación, monitoreo de la desertificación, entre otros (Blaschke 2010), permitiendo obtener patrones de comportamiento que el ojo humano no es capaz de percibir.

Bajo el actual contexto de cambio global existe un interés por entender la dinámica de los ecosistemas a diferentes escalas de tiempo, para poder entender la respuesta actual y futura de los ecosistemas ante los posibles cambios ambientales (Lasheras-Álvarez y Gil-Romera 2013). Numerosos estudios han evidenciado recientemente la existencia de una relación directa entre la precipitación acumulada y los índices de vegetación (García-Haro et al. 2014). Estos índices miden ópticamente el "verdor" del dosel de la vegetación, una propiedad compuesta de la clorofila foliar, el área foliar, la cubierta y arquitectura de dosel (Jiang et al. 2008), mediante los valores de reflectividad entre las bandas rojo e infrarrojo cercano. Con la utilización de estos índices es posible obtener información estacional de la vegetación a nivel de comunidad, con especies de plantas de diferentes fenologías, (López-Saldaña 2011), y realizar comparaciones espaciales y temporales consistentes del estado de la vegetación, posibilitando el monitoreo y caracterización de la cubierta vegetal terrestre desde el espacio (Jiang et al., 2008). Estos productos satelitales son de gran importancia para una amplia gama de aplicaciones, como el monitoreo de la vegetación, los estudios de sequía, las actividades agrícolas, el clima y los modelos hidrológicos.

Los sensores comúnmente utilizados para estudios de vegetación incluyen el radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR) a bordo de NOAA, el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) a bordo de Terra y Aqua, o los sensores VEGETATION 1 y 2 a bordo SPOT 4 y SPOT 5. Los índices más usados son: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Mejorada (EVI), y otros. El índice EVI, a diferencia del índice estándar NDVI, presenta una sensibilidad mejorada en regiones de biomasa alta y una capacidad de monitoreo de vegetación mejorada a través de un desacoplamiento del suelo y las influencias atmosféricas de la señal de la vegetación (Solano et al. 2010).

Los productos satelitales de Vegetation MODIS (NASA) han demostrado ser de gran utilidad en el análisis regional de la vegetación (González Loyarte y Menenti 2014), y están disponibles de forma gratuita con cobertura global y actualizaciones frecuentes.

2. Objetivo

Aplicar las tecnologías de la percepción remota y los SIG para analizar la fenología foliar de la vegetación presente en una sección del sistema de cuencas Horcones-

Urueña, correspondiente a la provincia de Santiago del Estero, con el propósito de caracterizar la dinámica de la vegetación y determinar su estacionalidad, en función a la incidencia de las lluvias, en base a datos de sensores remotos y modelación con SIG.

3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio

El área de estudio abarca las subcuencas de los ríos Horcones y Urueña ubicadas al noroeste de la provincia de Santiago del Estero (depto. Pellegrini) y, en parte, el sudeste de la provincia de Salta (depto. Rosario de la Frontera). En esta región se observa un gradiente hidrológico Subhúmedo-seco, en sentido oeste-este, a lo largo del cual se genera un de transición entre dos regiones fitogeográficas: la selva pedemontana de las Yungas y el Chaco Semiárido.

Gran parte la superficie bajo estudio se ubica en el distrito fitogeográfico chaqueño occidental, también denominado Chaco semiárido (Cabrera 1976), caracterizado por la presencia de vegetación de tipo boscoso con especies caducifolias y xerófilas adaptadas al déficit hídrico, cuya comunidad clímax es el bosque de *Schinopsis lorentzii* ("quebracho colorado santiagueño") y *Aspidosperma quebracho-blanco* ("quebracho blanco"); También están presentes los bosques hidrófilos formando galerías a lo largo de los cauces temporales, los vinales, cactáceas, palmeras y especies halófilas (Giménez y Hernández 2008). El clima, según la clasificación climática de Köppen, es cálido semiárido BShw con la temperatura media anual superior a 18 °C, y las precipitaciones concentradas en los meses de primavera-verano, con un claro período seco en invierno hasta el inicio de la primavera. El déficit hídrico se mantiene durante todo el año (Cirelli, Pérez Carrera, y Moscuza). Hacia el Noroeste de Santiago del Estero la curva de precipitaciones supera la isoyeta de 600 mm, al estar influenciado por las características climáticas de las Yungas, particularmente en el régimen estival de las lluvias (Frediani 1992).

Una menor superficie atraviesa el distrito fitogeográfico de la Selva pedemontana de las yungas (Cabrera 1976), que ocupa los sectores entre los 400 y 700 msnm en el piedemonte y serranías de escasa altitud. La Selva de Palo Blanco (*Calycophyllum multiflorum*) y Palo Amarillo (y *Phyllostylon rhamnoides*) y la Selva de Tipa (*Tipuana tipu*) y Pacará (*Enterolobium contortisiliquum*) son las unidades florísticas más características (Brown et al 2009). En esta región el clima es subtropical con estación seca, temperaturas elevadas durante gran parte del año, lluvias concentradas durante la época estival (noviembre a marzo) y un déficit hídrico entre los meses de junio y noviembre (Brown y Malizia 2004).

Tanto la región del chaco semiárido, como de la selva pedemontana, han experimentado una profunda transformación de bosques en zonas de expansión agropecuaria, provocando alteraciones en la densidad, forma y continuidad espacial de la cobertura vegetal. El paisaje resultante es un mosaico de bosques y arbustos (clase: cobertura natural) y cultivos.

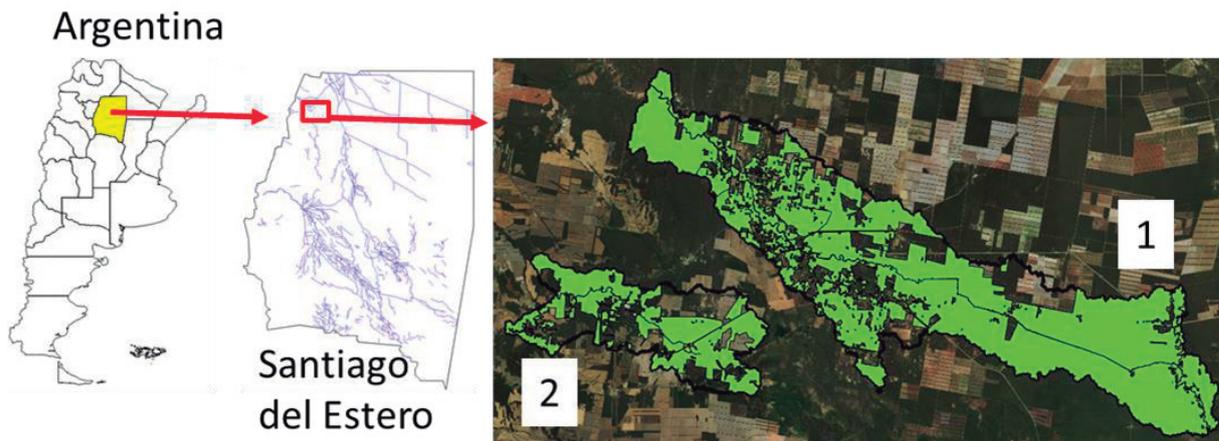


Figura 1. Área de estudio: cobertura natural (verde) en las subcuencas de los ríos Horcones (1) y Urueña (2).

3.2. Índice de vegetación mejorado (EVI)

El análisis del comportamiento espacio-temporal de la fenología foliar de la vegetación natural se inició con la selección de puntos de muestreo.

Estos puntos fueron escogidos aleatoriamente de una red de unidades muestrales dispuestas equidistantemente unas de otras (3 km) sobre una capa vectorial de cobertura natural previamente elaborada. Las muestras tomadas para cada subcuenca estuvieron conformadas por 16 puntos para la subcuenca del río Horcones y 8 puntos para la subcuenca del río Urueña, siendo el tamaño de muestra proporcional a la extensión superficial de las subcuencas. Cada punto representa un pixel del cual se obtendrán la serie histórica del índice vegetativo.

Para este estudio se utilizaron datos capturados por el sensor MODIS. El producto empleado fue MOD13Q1 que ofrece índices de vegetación producidos cada dieciséis días, para un píxel con resolución espacial de aproximadamente 250m. Los datos fueron descargados del sitio SATVeg (2018), el índice utilizado fue el índice de vegetación mejorado (EVI) cuyos valores oscilan entre 0 y 1, con valores cercanos a 1 indicando un mayor vigor de la vegetación (Jiang et al. 2008). El EVI se calcula según Solano et al. (2010) mediante:

$$EVI = G \cdot \frac{IRC - Rojo}{IRC + C1 * Rojo - C2 * Azul + L}$$

Este índice incorpora un valor “L” para realizar un ajuste en relación al canopy, un valor “C” como coeficiente de resistencia de la atmosfera, y un valor correspondiente a la banda azul (B). Teniendo en cuenta estos coeficientes se realiza una corrección del índice normal reduciendo los ruidos producto de la interferencia de la atmósfera, el canopy y la saturación (CONAE 2016).

De los puntos seleccionados se obtuvieron series históricas del Índice de Vegetación Mejorada, para un período de 17 años, que va desde el año 2000 al 2017. Las series fueron suavizadas usando el filtro Savitzky-Golay (grado 4) disponible en la plataforma SATVeg (2018).

Con el software estadístico INFOSTAT se calcularon estadísticas básicas (media, desviación estándar, máximos y mínimos) y coeficientes de correlación de Pearson (r) con la finalidad de detectar el grado de asociación entre EVI y la precipitación

acumulada mensual. Los valores EVI anuales y mensuales fueron sometidos a un análisis ANOVA para detectar las diferencias significativas entre ellos, con un nivel alfa = 0.05. Los datos fueron procesados en una planilla Excel, para la estimación de valores medios, acumulados, y para la presentación de resultados en formato de tablas y gráficos.

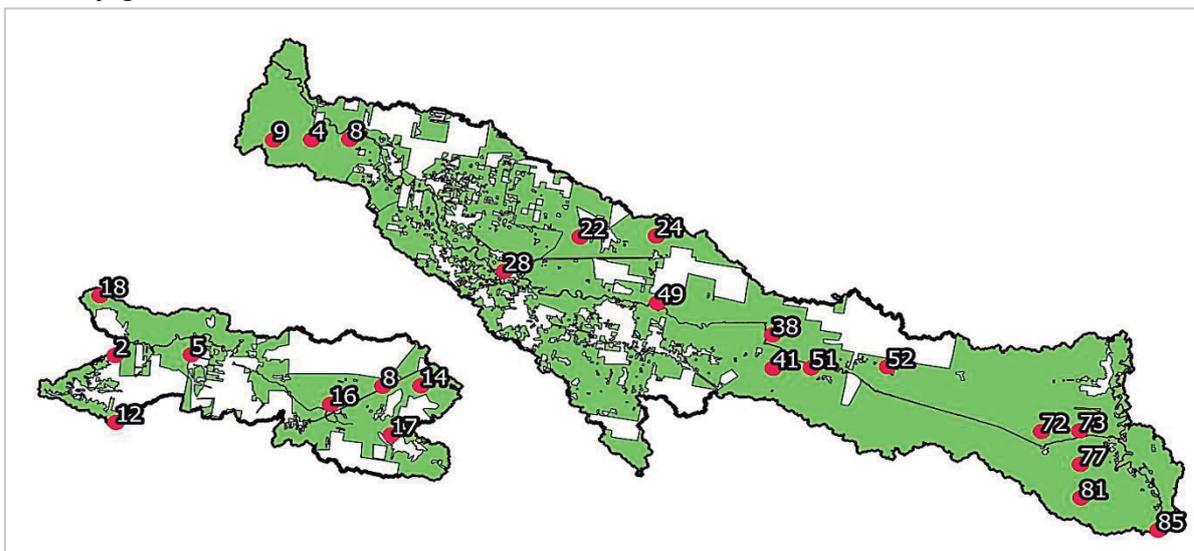


Figura 2. Puntos seleccionados sobre la capa de cobertura natural (verde), para el análisis de la fenología foliar.

3.3. Precipitación mensual acumulada

Las series históricas de precipitación mensual acumulada se obtuvieron del laboratorio virtual LAF (2018) del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil, a través de una interface de visualización de las series temporales de precipitación pluviométrica (mm/mes) derivadas del programa TRMM.

El producto utilizado se denomina 3B43 V6 “Multisatellite Precipitation Analysis” y tiene una resolución espacial de 0,25° x 0,25° (~27 Km x 27 Km) y una resolución temporal mensual (Collischonn et al 2007).

Los datos fueron procesados a posteriori en una planilla Excel, para la estimación de valores acumulados y, para la presentación de resultados en formato de tablas y gráficos.

4. Resultados y discusión

A pesar de la heterogeneidad del ambiente, las series EVI mostraron patrones unimodales similares, reflejando una fenología vegetal marcadamente estacional. La actividad foliar alcanzó su plenitud entre los meses de enero y febrero, y su mínimo entre los meses de agosto y septiembre.

Se pudo apreciar variaciones en los valores del índice para las distintas formas de vegetación; las coberturas boscosas más densas y las coberturas boscosas cercanas a los sistemas fluviales, presentaron los mayores valores de EVI; los puntos más alejados de los cuerpos de agua tuvieron una menor variación en la dinámica vegetal, en contraste con aquellos situados en zonas húmedas, las cuales mostraron menor estabilidad.

En la cobertura vegetal de la subcuenca del río Urueña se destacó un punto (nº17) con variaciones anómalas del índice vegetativo, producto de un posible cambio de uso del suelo o cambios ambientales que alterasen la actividad vegetal. Esto destaca la importancia del uso de series temporales de índices vegetativos para el

estudio de la dinámica vegetal regional, y la identificación de procesos de degradación y de cambios de uso del suelo (Fig.3).

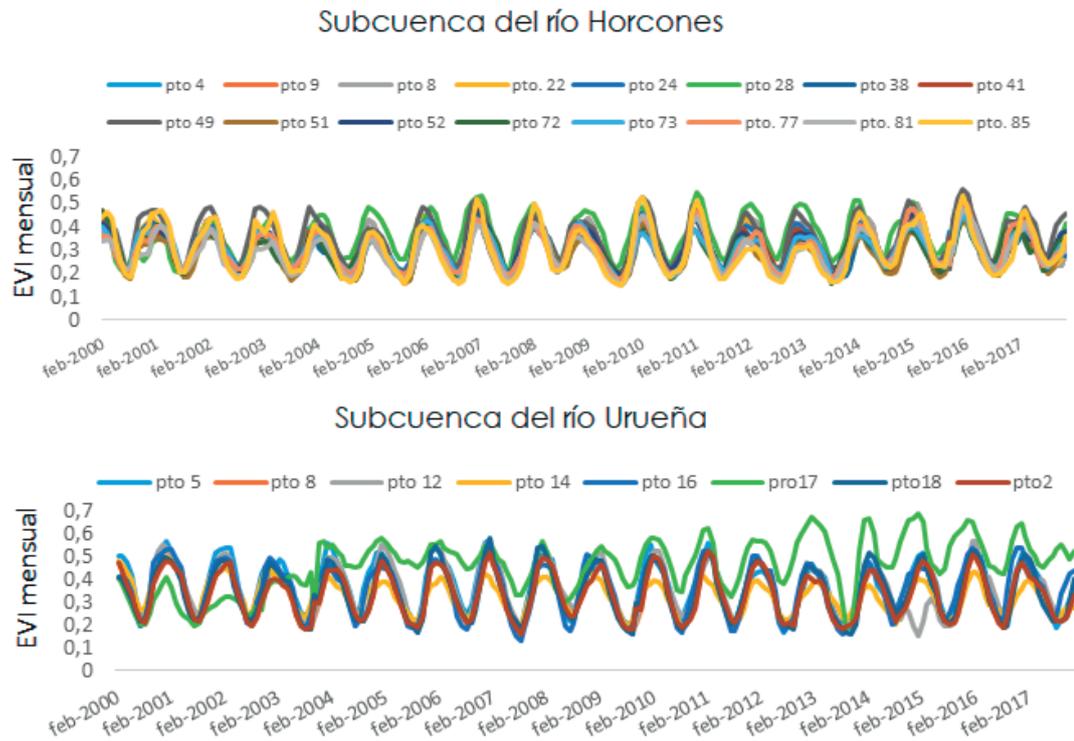


Figura 3. Serie temporal de EVI, período 2000-2017.

La Fig. 4 muestra el ciclo intra-anual de EVI, conformado por valores mensuales medios, obtenidos al promediar los valores mensuales de todos los puntos a lo largo de los 17 años. La media de la cobertura natural osciló entre 0.2 y 0.5, con los valores más altos concentrados en la estación húmeda, reflejando una alta actividad fotosintética durante los meses lluviosos, y los valores más bajos en la estación seca, debido al menor vigor de la vegetación causado por el déficit de agua, y la consecuente pérdida de follaje de las especies caducifolias.

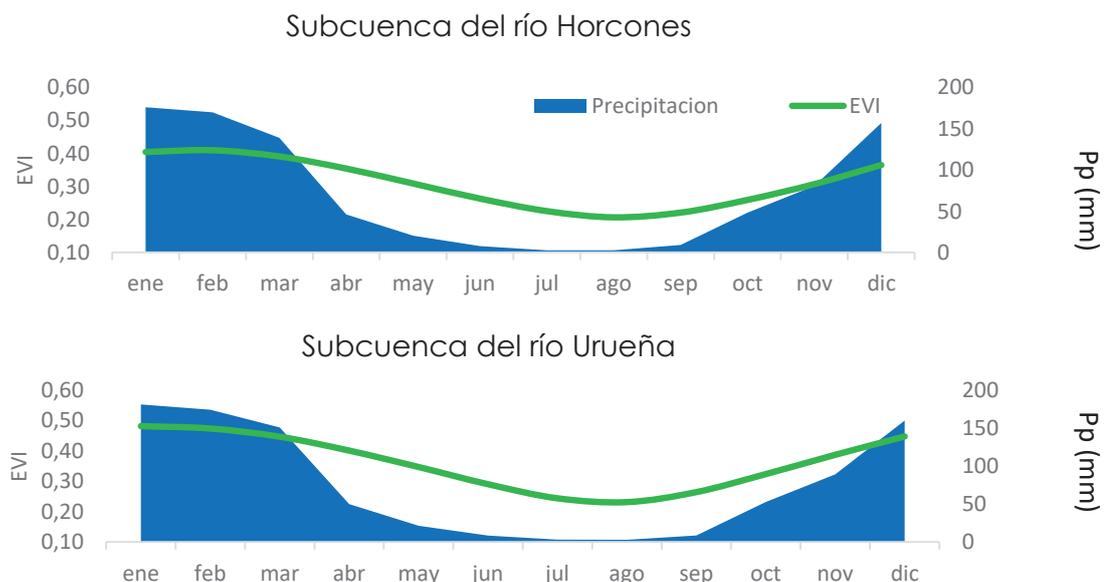


Figura 4. Ciclo intra-anual de EVI de la cobertura natural de las subcuencas de los ríos Horcones y Urueña.

Al aplicar el análisis de la varianza a las series mensuales se verificó, previa aplicación del test de distribución normal y de varianzas homogéneas, la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el vigor de la vegetación en los meses húmedos (enero, febrero y marzo) y los más secos (julio, agosto, septiembre) (Fig. 5). En general existe una asociación fuerte y positiva entre el EVI mensual y la precipitación acumulada mensual ($r = 0,90$ y $r = 0,94$ para la subcuenca del Horcones y la del Urueña, respectivamente).

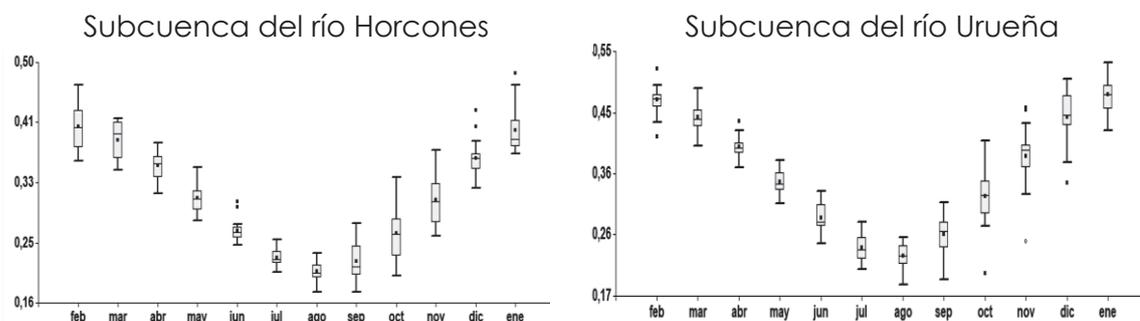


Figura 5. Variación intra-anual de EVI.

Se encontró una fuerte relación entre el índice EVI mensual y la precipitación acumulada mensual ($r = 0,77$ y $r = 0,88$ para la subcuenca del Horcones y la del Urueña, respectivamente), lo que demuestra la gran sensibilidad de la cobertura vegetal al régimen de precipitaciones. Los años más secos se vincularon a una menor actividad fotosintética respecto a períodos más húmedos (Fig. 6). Sin embargo, el análisis de variancia no evidenció diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) entre los valores anuales de EVI (Fig. 7).

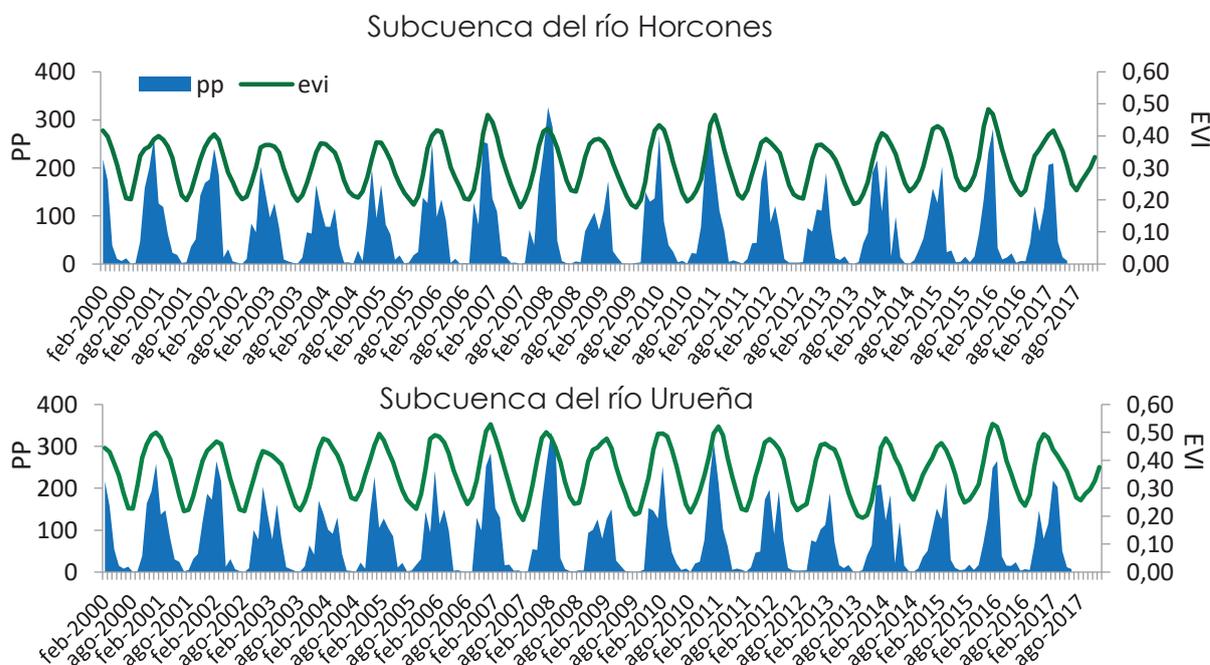


Figura 6. Serie temporal de EVI mensual y precipitación mensual acumulada (pp).

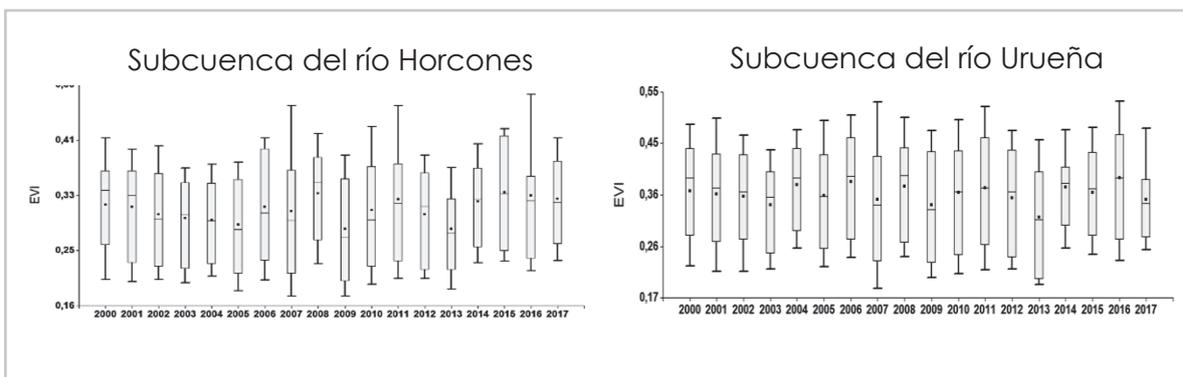


Figura 7. Variación intra e inter anual de EVI mensual.

En contraste, la relación entre los valores acumulados anuales de EVI y la precipitación fue baja ($r=0,25$ y $r=0,30$ para la subcuenca del Horcones y la del Urueña, respectivamente). En la gráfica se observa una tendencia negativa de la precipitación en el tiempo, con las lluvias de los últimos 6 años por debajo del promedio histórico (tabla 2). No obstante, las series EVI acumulado se mantuvieron prácticamente constantes. Esto podría reflejar la existencia de fuentes de humedad externas que podrían compensar la escasez de lluvia, como aguas profundas, permitiendo el desarrollo de la actividad vegetativa (Villagra et al. 2011).

Las diferencias en el vigor de la vegetación entre ambas subcuencas pueden asociarse al hecho de que, si bien las superficies se encuentran a poca distancia, estas podrían presentar pequeñas diferencias características, como el tipo de suelo y la cercanía a fuentes permanentes de humedad como ríos, lagunas o aguas freáticas, generando un microclima distinto que incide en la respuesta fenológica de las especies y en la composición y estructura de las mismas a lo largo del área circunscripta. En ello juega un papel importante las características de humedal de gran parte de la subcuenca del Urueña, con vegetación adaptada al anegamiento, y funcional durante gran parte del año debido a esta característica.

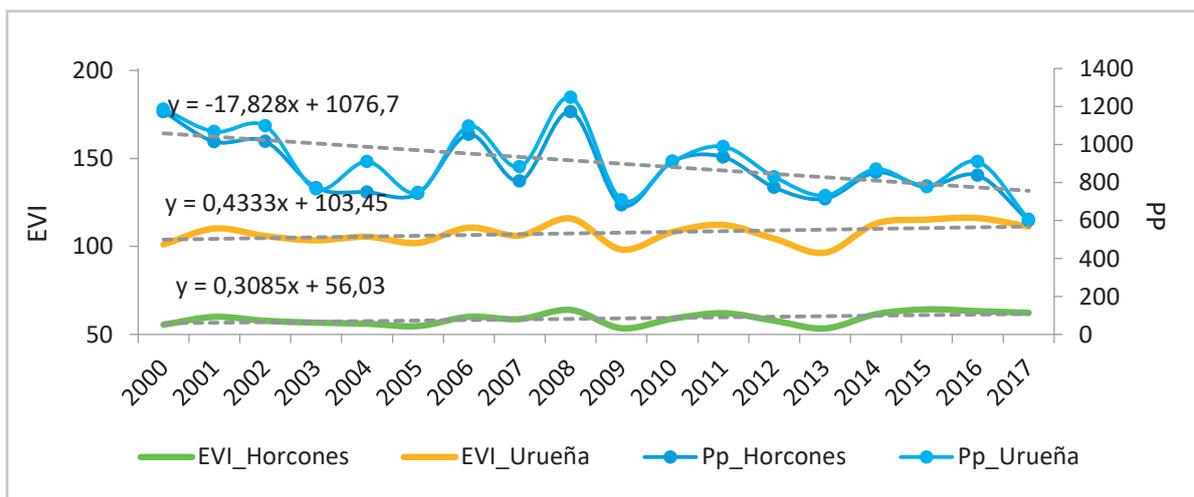


Figura 8. EVI acumulado anual, a nivel de subcuenca, y precipitación acumulada anual (PP).

Tabla 2. Medidas de resumen para EVI anual (período 2000-2017)

Subcuenca	Variable	Media	D.E.	Mín.	Max.
Horcones	EVI	58,96	3,48	53,47	64,28
Urueña	EVI	107,57	5,95	96,44	116,11
Horcones	PP	866,10	164,55	599,40	1172,73
Urueña	PP	907,34	176,67	605,60	1247,7

El mapeo de los valores acumulados de EVI permite visualizar espacialmente donde ocurre la mayor actividad fotosintética, y su relación con otros elementos del paisaje, como así también, dar una idea intuitiva del tipo de vegetación que podría conformar una determinada región, ya que valores altos indicarían zonas con vegetación más densa (Fig. 9).

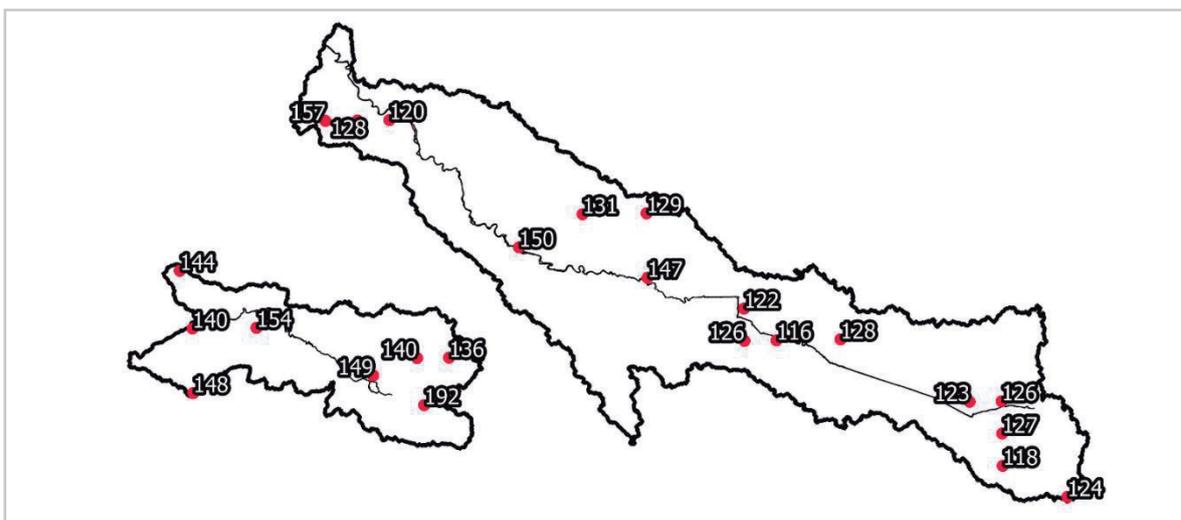


Figura 9. Distribución espacial de EVI acumulado (período 2000-2017) por punto de muestreo.

Conclusiones

Ante la insuficiencia de información actualizada y disponible a escala local para la realización de evaluaciones ambientales, la integración de la percepción remota y SIG proporcionó información valiosa sobre aspectos espaciales y temporales de distintos parámetros ambientales. Con este trabajo se muestra la potencialidad de la percepción remota para el estudio del estado de la vegetación de un área extensa y su relación con los regímenes de lluvias, a través de datos proveniente de sensores remotos, posibilitando el acceso a información de manera económica y eficiente.

El análisis de series temporales de índices de vegetación adquiridas mediante el sensor MODIS, permitió caracterizar el comportamiento de la vegetación y su dependencia con parámetros climatológicos, particularmente con la precipitación.

La cubierta natural, conformada por un mosaico de formaciones vegetales, mostró una gran sensibilidad al déficit hídrico. La dinámica de la cobertura vegetal respondió a la disponibilidad hídrica, alcanzando los valores mínimos durante la estación seca (entre junio y agosto), recuperando su vigor entre los meses de enero y marzo, durante la estación húmeda. Las precipitaciones de los últimos 6 años, estuvieron por debajo del promedio histórico de los últimos 17 años disponibles en

la serie de TRMM del LAF. Sin embargo, no provocó una caída de la actividad fotosintética.

La interacción vegetación-clima puede considerarse una herramienta útil para prever los efectos del cambio climático. Las anomalías encontradas en el comportamiento de la cubierta vegetal proporcionan una descripción representativa de la humedad del sitio, siendo una fuente importante de información para detectar situaciones de déficit hídrico prolongados.

Agradecimientos

Al programa de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, y al programa de becas para estudiantes avanzados, quienes financiaron el Proy. CICYT-UNSE 23B131, marco de ejecución de este trabajo.

Referencias

Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 65(1), 2-16.

Brown, A. D., Blendinger, P. G., Lomáscolo, T. y García Bes, P. (2009). Selvapedemontana de las Yungas: historia natural, ecología y manejo de un ecosistema en peligro. Buenos Aires: Ediciones del Subtrópico.

Brown, A. D. y Malizia, L. R. (2004). Las selvas pedemontanas de las Yungas. Ciencia hoy, 14(83), 52-63.

Cabrera, A. L. (1976). Enciclopedia Argentina de agricultura y jardinería: regiones fitogeográficas argentinas. Acme.

Cirelli, A. F., Pérez Carrera, A. y Moscuza, C. H. Evaluación De La Situación Ambiental Y Socioeconómica a través de Indicadores. Estudio De Caso: Santiago Del Estero, Argentina.

Collischonn, B., Allasia, D., Collischonn, W. y Tucci, C. E. M. (2007). Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. Revista Brasileira de Cartografia, 59(1).

CONAE (2016). Índices Espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI. Guía de Usuario v.1.

En:<https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf> Acceso: 27.04.2018

De Battista, A., Cristaldo, P., Ramos, L., Nunez, J. P., Retamar, S., Bouzenard, D. y García-Haro, F. J., Campos-Taberner, M., Sabater, N., Belda, F., Moreno, A., Gilabert, M. A. y Meliá, J. (2014). Vulnerabilidad de la vegetación a la sequía en España.

Giménez, A. M., y Hernández, P. (2008). Biodiversidad en ambientes naturales del chaco argentino. Vegetación del chaco semiárido, provincia de Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina.

Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K. y Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845.

LAF (2018). Laboratório de Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura e Floresta, Series View. INPE, Brasil. En: <http://www.dsr.inpe.br/laf/series/> Acceso: 27.04.2018

López-Saldaña, G. (2011). Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio.

González Loyarte, M. M. y Menenti, M. (2014). Fenología foliar regional a lo largo de un gradiente climático SW-NE en la Argentina.

Pernía, E., y Elvecio, J. (1999). Sensores espaciales para estudios ambientales, a las puertas del siglo XXI. *Revista Forestal Venezolana*, 43(2), 207-222.

SATVeg(2018). Sistema de Análise Temporal da Vegetação. EMBRAPA, Brasil En: <https://www.satveg.cnptia.embrapa.br> Acceso: 27.04.2018

Solano, R., Didan, K., Jacobson, A. y Huete, A. (2010). MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). *Vegetation Index and Phenology Lab, The University of Arizona*, 1-38.

Vergés, F. A. R., y Bocco, G. (2003). Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta ecológica*, (68), 43-54.

Villagra, P. E., Giordano, C., Álvarez, J. A., Bruno Cavagnaro, J., Guevara, A., Sartor, C., ... & Greco, S. (2011). Ser planta en el desierto: estrategias de uso de agua y resistencia al estrés hídrico en el Monte Central de Argentina. *Ecología austral*, 21(1), 29-42.

Zerda, H. R. (2014). Régimen de fuego 2013-2014 en Santiago del Estero, modelización espacial mediante SIG. *Día del SIG*.

Aplicaciones SIG a la representación de la Distribución Espacial de Valores de Concentración de Arsénico en Aguas Subterráneas

Prieto Villarroya, Jorge ^{1,2}; Moyano, Miguel Ángel ³; Carreras, Rocío ¹; Farias, Héctor Daniel ²

¹ Instituto de Estudios Ambientales y Desarrollo Rural de la Llanura Chaqueña, Universidad Nacional de Santiago del Estero

² Instituto de Recursos Hídricos IRHi. FCEyT - UNSE

³ MAAySP – Secretaría de Recursos Hídricos. Provincia de Córdoba

Contactos: jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar (1)

RESUMEN

El presente trabajo muestra la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica, y más específicamente de las técnicas de interpolación espacial, a la representación territorial de la distribución espacial de valores de concentración natural de arsénico en aguas subterráneas de las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Córdoba.

En el trabajo se indican las características de la información empleada, y se describe el método empleado (Kriging).

Como resultado se elaboraron mapas con la zonificación espacial de concentraciones de arsénico en tres estratos de profundidad (menor de 30 m, desde 30 hasta 80 m y más de 80 m) y cinco categorías o niveles (> 10 ug/l, 10 – 30 ug/l, 30 – 50 ug/l, 50 – 100 ug/l, > 100 ug/l) y se obtuvieron representaciones de aproximación a la impronta territorial en el espacio geográfico interprovincial a partir de datos de niveles puntuales de concentración de arsénico en aguas naturales.

Palabras clave: hidroarsenicismo, geoestadística, hidrología subterránea.

1. Introducción

Garantizar la accesibilidad a recursos hídricos, adecuados en cuanto a calidad, cantidad y disponibilidad para la población, constituye uno de los principales factores condicionantes para asegurar el desarrollo socio-económico de la población.

En este sentido, la región de Santiago del Estero padece históricamente dos problemas característicos, que en ocasiones se potencian entre sí, como son (1) la escasez de disponibilidad de agua y (2) la presencia de agua contaminada con elementos perjudiciales para la salud como es el caso del arsénico (As).

El Arsénico, representa uno de los principales contaminantes que se encuentra en los acuíferos de algunas regiones de la provincia, pudiendo llegar al agua por vía natural (desintegración y lixiviación de rocas procesos geoquímicos naturales) o por vía antropogénica (actividad de minería, productos plaguicidas, conservantes de madera).

La ingesta continuada de agua con sales de arsénico por un espacio de tiempo prolongado (crónico), que afecta a gran parte de la población (endémico) de una región (regional), deriva en la enfermedad conocida como HACRE (Hidro-arsenicismo Crónico Regional Endémico), caracterizada por la aparición, tras años de consumo, de lesiones características en piel y alteraciones sistémicas cancerosas y no cancerosas.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un valor guía de 10 µg/l que propone para el arsénico en aguas de consumo humano, si bien reconoce que este puede estar sobreestimando el riesgo real. En base a ello, el límite vigente actual para el parámetro arsénico en aguas de consumo humano en el Código Alimentario Argentino (CAA) es de 50 µg/l.

El tratamiento de aguas contaminadas con arsénico para consumo humano es un problema de difícil solución, sobre todo en poblaciones rurales dispersas o de baja densidad. Los principales factores limitantes son los costos de acceso a la tecnología, la complejidad de operación y la aceptabilidad social, en un contexto de herencia y creencias populares.

Es por ello, por lo que en este contexto resulta de especial importancia la generación de cartografía temática específica que permita realizar una caracterización territorial basada en la concentración de arsénico, para que a partir de ellas pueda zonificarse el territorio y priorizar posibles líneas de actuación.

2. Materiales

Se define como Modelo Digital del Terreno a la representación espacial de una variable cuantitativa y continua sobre una superficie bidimensional XY, por medio de un conjunto de valores Z (Fig. 1). El término, tiene aparentemente su origen en el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachussets, en la década de los años 50. En el trabajo pionero de Miller y Laflamme (1958) se establecen ya los primeros principios del uso de los modelos digitales para el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares. La definición del MDT que se menciona en sus trabajos es "una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas (x, y, z) conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario" (Felicísimo, 1994).

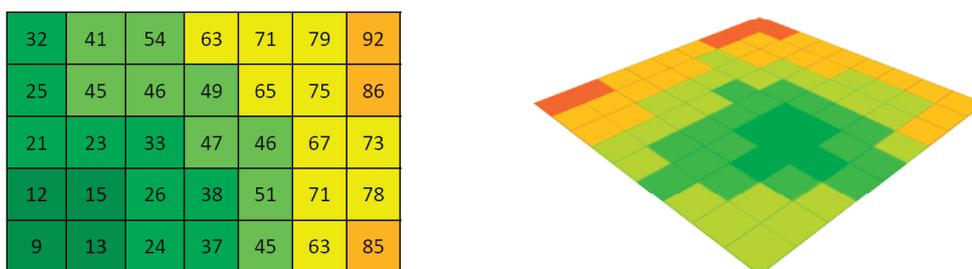


Figura 1. Definición conceptual de un Modelo Digital del terreno

Un modelo digital del terreno consiste en una malla rectangular de celdillas cuadradas o píxeles. Cada uno de los píxeles tiene asignado un valor numérico. Este número, es el utilizado para la modelización de un aspecto concreto del medio. El valor Z, puede corresponder a diferentes variables como puede ser la temperatura, cota, precipitación, concentración de un contaminante, etc.; en el caso del presente documento, el valor de la variable Z del MDT corresponde a Concentración de Arsénico.

La cartografía se ha elaborado en base a información de valores naturales de arsénico en las Provincias de Chaco, Santiago del Estero y Córdoba. Con la totalidad de la

información disponible se ha elaborado una Base de Datos alfanumérica con los siguientes contenidos:

- ID: Código identificador alfanumérico
- X: Coordenada X representada en el Sistema Posgar 94, Faja 4.
- Y: Coordenada Y representada en el Sistema Posgar 94, Faja 4.
- Z: Profundidad del pozo en el que se ha tomado la muestra (m)
- As: Valor de Concentración de Arsénico expresado ug/l
- DATO: Organismo de la administración pública en la que se originó el dato
- PROV: Provincia en la que se encuentra situado el dato.

La información, de carácter puntual, procede de un total de 2.858 datos de pozos y perforaciones, con la siguiente distribución por provincias:

Tabla 1. Distribución de la información espacial según provincia y estrato de profundidad (P)

Provincia	$P \leq 30 \text{ m}$	$30 \text{ m} < P \leq 80 \text{ m}$	$P > 80 \text{ m}$	Subtotal	Provincia
S. ESTERO	329	111	261	701	24,5 %
CHACO	756	105	116	977	34,2 %
CÓRDOBA	396	335	449	1.180	41,3 %
Subtotal	1.481	551	826	2.858	(100%)
Profundidad	51,8 %	19,3 %	28,9 %	(100%)	

Como consecuencia de la disponibilidad de información anterior, se muestra la representación 3D de la información disponible, en las tres provincias analizadas, y representando la profundidad e Z de cada uno de los valores (Fig. 2).

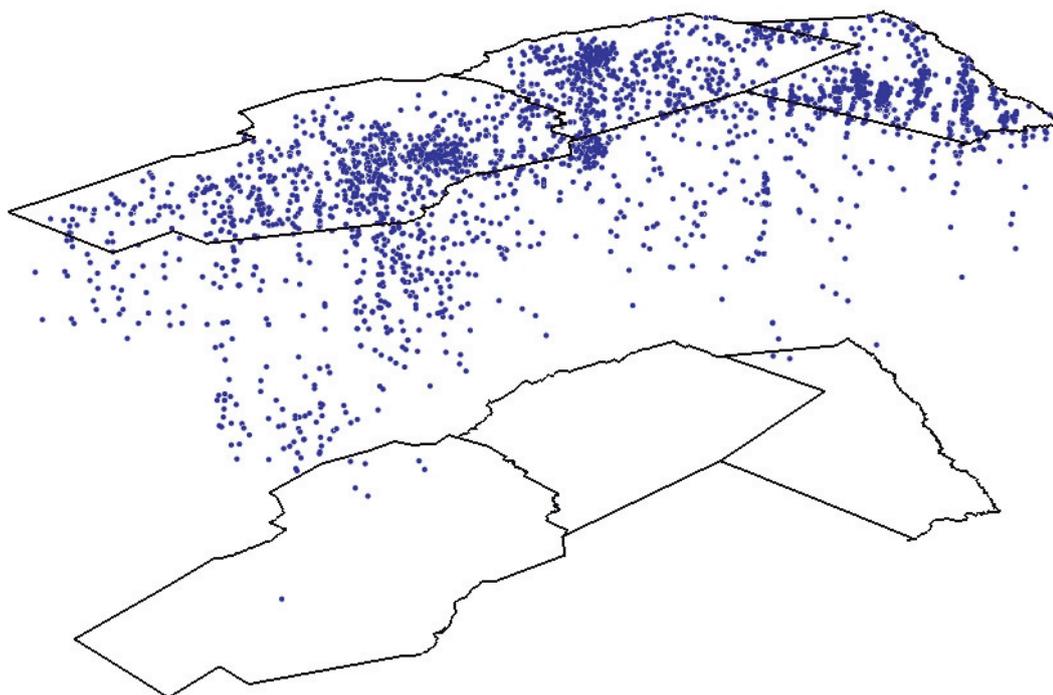


Figura 2. Representación 3D de la base de datos utilizada

3. Metodología

El procedimiento metodológico seguido ha sido desarrollado para el trabajo *“Impronta Territorial del Arsénico en el Espacio Geográfico Chaco-Santiagoño-Cordobés”* (Moyano, 2018) presentado en el XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología.

Se denomina interpolación a la obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto discreto de punto. La interpolación predice valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Puede utilizarse para predecir valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, tales como: elevación, precipitaciones, concentraciones químicas, niveles de ruido. En el caso del presente informe, los valores interpolados corresponden a valores Naturales de Concentración de Arsénico.

Para ello, se ha procedido al análisis y valoración de los datos obtenidos y al cálculo de estadísticos integradores para cada el conjunto de las ubicaciones medidas.

La utilización de modelos matemáticos da como resultado mapas en los que se obtiene el valor de concentración natural de arsénico, a diferentes profundidades de la zona estudiada.

El fundamento estadístico de la interpolación realizada se basa en las pautas marcadas por los manuales de referencia técnica de ESRI (2018).

En estadística la interpolación es usada para estimar valores desconocidos a partir de una serie de datos conocidos y ponderados. Cada técnica busca determinar una función que represente adecuadamente el fenómeno bajo estudio y así disminuir la cantidad de información a recolectar en campo.

Existen varias técnicas o métodos diferentes de interpolación espacial (Spline, Inverso del Cuadrado de la Distancia IDW, Kriging, etc....),

Las herramientas de interpolación IDW (Distancia inversa ponderada) y Spline son consideradas métodos de interpolación determinísticos porque están basados directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante.

Hay una segunda familia de métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como kriging, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

Tras una fase de pruebas, ensayos preliminares y testeos, se optó en el presente trabajo, por la elección del Método de Kriging como el más adecuado, por ser el método que mejores resultados ofrece en cuanto a error cuadrático medio EMC, unido a la opinión de expertos en hidrogeología consultados, que visualmente consideraban que la delimitación por zonas obtenidas con Kriging representaba mayor similitud con los valores regionales de distribución espacial de arsénico en base a su conocimiento de la región.

Los métodos de “Kriging” (o kriging), se encuentran respaldados por modelos matemáticos y estadísticos. Por ello, debido a su componente estadístico, incluyen un análisis de probabilidad. Debido a la componente probabilística, los valores no son completamente predecibles, de modo que las predicciones se encuentran asociadas al posible error asociado a la predicción.

El método de Kriging se basa en la autocorrelación espacial de las variables (no debe confundirse con el término correlación) es decir, la correlación de una variable con ella misma. Kriging es un estimador lineal insesgado que busca generar superficies continuas a partir de puntos discretos. Asume que la media, aunque desconocida, es constante y que las variables son estacionarias y no tienen tendencias. Permite transformación de los datos, eliminación de tendencias y proporciona medidas de error. Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación.

La fórmula general es:

$$Z(S) = \mu(S) + \varepsilon(S) \quad (1)$$

En el cual Z(S) es la variable de interés, $\mu(S)$ es una constante desconocida, $\varepsilon(S)$ son errores aleatorios de estimación y S son coordenadas espaciales (x, y).

En función de lo anterior, el método considera que la predicción del valor de un punto está dada por la siguiente expresión:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i) \quad (2)$$

En el cual $Z(S_0)$ es el valor predicho, λ_i es el peso de cada valor observado y $Z(S_i)$ es el valor medido en un lugar.

4. Resultados y conclusiones

La metodología aplicada permitió generar una superficie representando la distribución espacial del arsénico en las provincias de Chaco, Santiago del Estero y Córdoba, mediante una superficie continua que incorpora las propiedades estadísticas de los datos muestrales empleados.

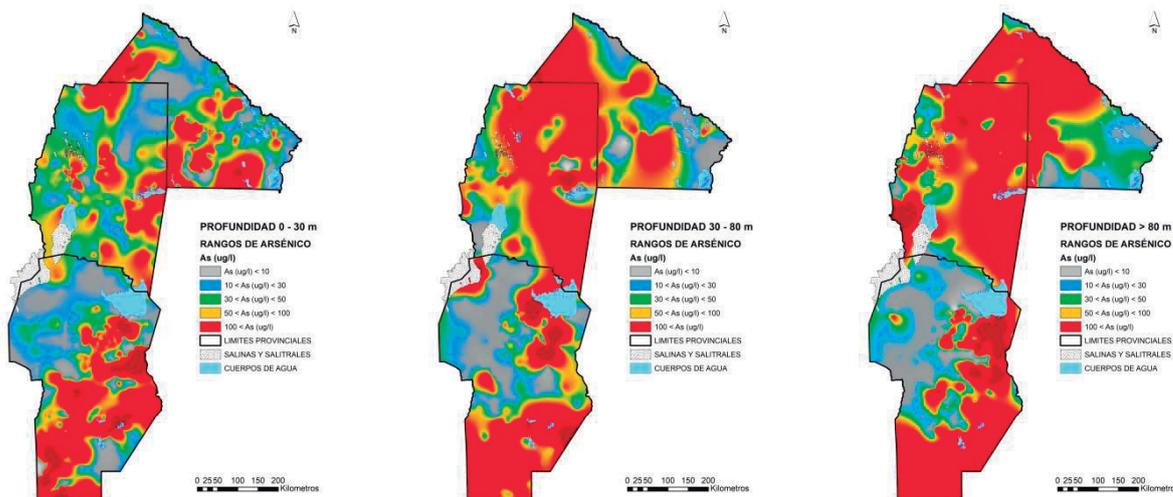


Fig. 3. Distribución espacial de arsénico en el estrato de profundidad < 30 m (izquierda), desde 30 a 80 m (centro), y mayor de 30 m de profundidad (derecha).

Referencias

Miguel A. Moyano; Delia Vera; Laura Noguera; Alfredo Martín; Claudia García; Jorge P. Villarroja; Dagni Schneider; Oriol Romero. (2018). Impronta territorial del arsénico en el espacio geográfico Chaco – Santiagueño – Cordobés. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología.

ESRI (2018). Environmental Systems Research Institute. Vista General del Conjunto de Herramientas de Interpolación Ráster.

En: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/kriging.htm>

Acceso: 01.11.2018

Felícísimo, A. M. (1994). Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales. INDUROT, Universidad Oviedo. Pentalfa Ediciones, España.

Detección de cuerpos de agua con imágenes RADAR

Mariangel Arias Ferreyra¹, Dra. Claudia Notarnicola², Dr. Marcelo Scavuzzo³

¹ Mgter. en Aplicaciones Espaciales en Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias; ² EURAC, European Academy of Bozen, Italy; ³ Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, IG-CONAE

Contactos: maryangelarias@hotmail.com (1), claudia.notarnicola@eurac.edu (2) scavuzzo@conae.gov.ar (3)

RESUMEN

La Cuenca del Río Salado tiene importantes funciones tanto ambientales como humanas en la provincia de Santiago del Estero, y abarca gran parte del territorio provincial. Se exploraron los datos SAR - SCANSAR - Huga Región de Cosmo SkyMed para determinar los cuerpos de agua presentes en la cuenca del río Salado, durante los meses de febrero a mayo del año 2014. Durante el período donde se registran altas precipitaciones, realizar estudios ambientales con imágenes ópticas se dificulta debido al cubrimiento de nubes. En el rango de las microondas, los efectos atmosféricos sobre la señal del radar es casi despreciable y por lo tanto muy útiles para monitorear fenómenos en épocas lluviosas. En comparación con los datos ópticos, los datos de SAR permitieron una adecuada discriminación entre las coberturas agua – superficie terrestre. Dentro del área de estudio no se registraron eventos de inundaciones de gran magnitud durante el período analizado.

Palabras clave: sensores activos, monitoreo, Chaco argentino.

1. Introducción

Los sensores satelitales son herramientas de gran utilidad, sobre todo cuando se trabaja en extensas regiones con variabilidades estacionales, de difícil acceso, costo y tiempo (Lanfri, 2011).

Los sistemas RADAR (Ratio Detection and Ranging), son sistemas activos, ya que son capaces de emitir su propio haz de energía y miden la onda reflejada. Operan en la porción del espectro electromagnético correspondientes a las microondas, de longitud de onda milimétricas, en teledetección, las mayores longitudes de onda utilizadas. La radiación electromagnética, a diferencia de otros tipos de ondas, se propaga en el vacío, a través de grandes distancias, útil para el sensoramiento remoto. Cada pixel en una imagen radar representa el coeficiente de retro-dispersión de esa área sobre el terreno, siendo el valor almacenado tanto mayor cuanto más intensa sea la señal de retorno. En el rango de las microondas, los efectos atmosféricos sobre la señal del radar es casi despreciable, pues trabaja a longitudes de onda muy superiores al tamaño habitual de la gotas de agua, lo que hace a ésta región espectral idónea para zonas o épocas lluviosas (Chuvienco, 2010). Los SAR (Synthetic Aperture Radars) son sistemas activos debido a que proporcionan su propia iluminación mediante pulsos de ondas electromagnéticas. Con el avance de la plataforma y un procesamiento especial en los ecos recibidos, los sistemas SAR simulan una antena de gran longitud para aumentar la resolución en la dirección del movimiento.

COSMO-SkyMed (Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation), es un SAR de la Agencia Espacial Italiana ASI y el Ministerio de Defensa de Italia. Opera en una constelación de cuatro satélites Radar de dimensión media y órbita baja, destinado para defensa civil y observaciones terrestres. Cada satélite está equipado con un Radar de Apertura Sintética (SAR) operando en banda X (de 2.4 a 3.75 cm / 12.5 a 8 GHz) del espectro electromagnético).

En la región del Chaco Seco, el 60% de las precipitaciones se concentran en el semestre cálido, período donde se registran inundaciones con mayor frecuencia que el resto del año (Boletta, 2001). Parte del período analizado se ubica dentro de dicho semestre, por lo que realizar estudios ambientales con imágenes ópticas se dificulta debido al cubrimiento de nubes.

Tanto los sensores activos como los pasivos, en el rango de longitudes de onda de las microondas, son sensibles a cuerpos de agua y adecuados para estudios multitemporales debido al funcionamiento en todas las condiciones meteorológicas, tanto diurnas como nocturnas; particularmente los radares de apertura sintética (Synthetic Aperture Radars: SAR) han sido reconocidos como importantes instrumentos para el monitoreo de superficies con agua (Lanfri, 2011). Los cuerpos de agua actúan como una superficie especular, y por lo tanto su respuesta es baja, por lo que lucen como áreas oscuras; a diferencia de la reflexión difusa dada por las superficies rugosas (ej. tierra) que hacen que tengan mayor respuesta en la señal. Estas diferencias en las señales de retorno del agua y la tierra posibilitan una adecuada discriminación entre las coberturas agua-tierra, características que hacen destacables a los sistemas radar (Lanfri, 2011; Belmonte & Camaño, 2009).

Los SAR, son utilizados en el monitoreo ambiental, agricultura, detección de claros en bosques, inundaciones, detección de manchas de petróleo en el mar, y planeamiento urbano (Belmonte & Camaño, 2009). En este sentido, los datos SAR, particularmente los productos Huger Region de COSMO SkyMed, abarcan grandes extensiones (200 km), ideales para un cubrimiento regional.

El objetivo planteado en el presente capítulo consistió en explorar los cuerpos de agua presentes en la cuenca mediante datos SAR - SCANSAR - Huger Región de Cosmo SkyMed, brindadas por la Comisión de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina, y la Agencia Espacial Italiana (ASI); dentro de un período en donde se registran altas precipitaciones.

2. Materiales

Las imágenes COSMO SkyMed fueron provistas por CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) en el marco de la maestría en Aplicaciones Espaciales y Respuesta Temprana a Emergencias. Debido al alcance regional que tiene la Cuenca del Salado, se escogieron imágenes con un cubrimiento regional. Dentro de los productos que posee COSMO SkyMed, se eligieron las ScanSAR - Huger Region cuyo ancho de barrido es de 200 km x 200 km aproximadamente, las cuales abarcan gran parte de la cuenca, para ello fueron necesarias 2 imágenes por cada mes de análisis (Fig. 1).



Figura 1. Cobertura de las imágenes Huger Region, modo ScanSAR.

Tabla 1. Modo de adquisición de las imágenes Scan-SAR modo Huger Region – COSMO SkyMed.

	COSMO Sky-Med – ScanSAR
Agencia espacial	ASI (Agencia Espacial Italiana)
Modo	Huger Region
Ancho de barrido	200 km
Tamaño del pixel	100m x 100m
Polarización	Single HH
Angulo de incidencia	40
Longitud de onda	Banda X ~ 3 cm
Nivel de procesamiento	1C
Pass	Descendente
Sistema de referencia	WGS84

2.1. Área de estudio

En Argentina, la Cuenca del Río Salado, nace en las estribaciones orientales de los Andes Salta-Catamarca, más precisamente en las altas sierras occidentales del borde de la Puna, por lo que su régimen presenta crecientes estivales provocadas por las lluvias en su alta cuenca. A medida que transita por su largo trayecto pasa de la región cordillerana hacia la región Chaqueña para finalmente desembocar en la región Pampeana (Fig. 2). En la provincia de Santiago del Estero se lo conoce como Salado o Cachimayo, significado quechua: kachi “sal”, y mayu “río”, nombre que se le atribuye debido a su gran concentración salina. La Cuenca del Río Salado es una vasta planicie sedimentaria de suave pendiente moldeada por la acción del río Salado que la atraviesa en sentido Noroeste-Sudeste, de carácter alóctono, es decir que no recibe afluentes en su recorrido (Burkart et al., 1999). Posee una superficie de 47.544 km².

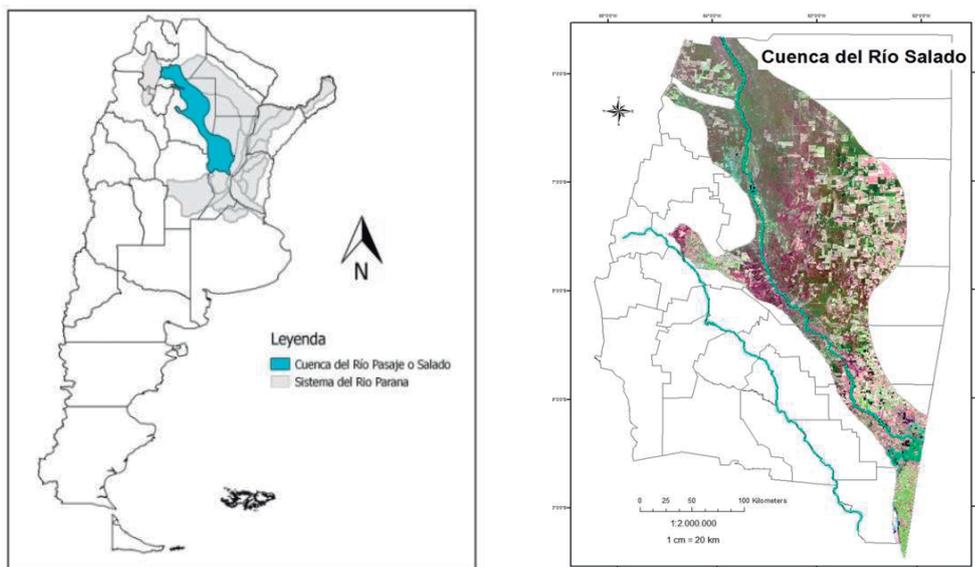


Figura 2. Ubicación del área de estudio - Cuenca del río Salado.

En su recorrido el río Salado, va dejando una serie de humedales a su paso, resultado de un cauce muy explayado y poco profundo. Entre los humedales se destacan, esteros, meandros, bañados y zonas inundables muy variables, de acuerdo a la época del año.

El clima del Chaco Seco, región a la cual pertenece la zona en estudio, es cálido, con registros de temperatura media mensual del mes más caliente (enero) de 28°C y del mes más frío (julio) de 16,3°. Las precipitaciones medias anuales aumentan de Oeste a Este, desde aproximadamente 500mm a 750mm. El 60% de las precipitaciones se concentran en el semestre cálido (octubre-marzo) (Boletta, 2001).

3. Métodos

Unas de las formas más comunes o tradicionales de detectar cuerpos de agua es la selección de umbrales sobre la intensidad de la imagen, los cuales requieren un método supervisado. Se utiliza esta técnica cuando hay una clara diferencia entre los objetos a extraer respecto al fondo de la escena (uniforme), es decir, similitudes entre los píxeles pertenecientes a un objeto y sus diferencias respecto al resto. Los cuerpos de agua actúan como una superficie especular, y por lo tanto su respuesta es baja (bajo coeficiente de retrodispersión), por lo que lucen como áreas oscuras; a diferencia de la reflexión difusa dada por las superficies rugosas (ej. tierra) que hacen que tengan mayor respuesta en la señal. Estas diferencias en las señales de retorno del agua y la tierra posibilitan una adecuada discriminación entre las coberturas agua-tierra, características que hacen destacables a los sistemas radar (Lanfri, 2011; Belmonte & Camaño, 2009). Para detectar umbrales generalmente se procede analizando el histograma de la imagen para un determinado objeto y su fondo distinto, entonces es de esperar que la representación de dicho histograma sea bimodal (Fig. 3).

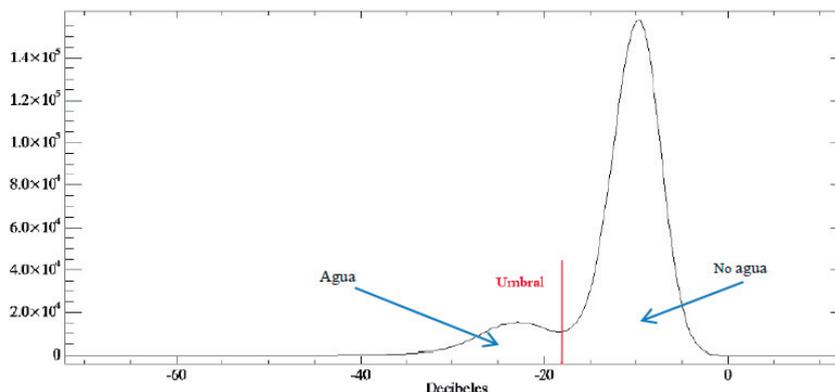


Figura 3. Ejemplo de un histograma de una imagen COSMO-SkyMed en decibels, mostrando el umbral entre los dos picos del histograma. Fuente: Adaptado de Lanfri (2011).

Se monitorearon los cuerpos de agua durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo del año 2014. En el procesamiento de las imágenes, se utilizaron dos tipos de softwares: El software SNAP, y el ENVI 4.7.

Para la detección de cuerpos de agua se procedió a realizar diferentes pasos metodológicos de preprocesamiento, en donde se calibraron las imágenes en forma automática con el software SANP, convirtiendo los datos de las imágenes de números digitales ND (amplitud) a potencia, y para ajustar los posibles cambios temporales en la ganancia de la antena y en las condiciones de saturación de la señal (Salvia & Barber, 2013). Otro paso necesario en el tratamiento previo de las imágenes es el filtrado del ruido. El ruido o Speckle es la interferencia a gran escala. Al ser los objetos reflectores irregulares, los rayos emitidos por el radar regresan al sensor habiendo recorrido distintas distancias y habiendo acumulado así diferencia de fase. El ruido, limita la capacidad para interpretar las imágenes SAR, ya sea, reduciendo la capacidad de distinguir bordes, la segmentación de la imagen, el reconocimiento y la clasificación de blancos, y al generar incertezas en la inversión de parámetros biofísicos (Salvia & Barber, 2013). Se escogió el filtro denominado “Refined Lee”. Luego se exportaron las imágenes como GeoTIFF. Las imágenes exportadas en formato GeoTIFF, previamente calibradas y filtradas contienen los valores de los datos en amplitud. Para poder clasificar las imágenes, es necesario normalizar los datos, este procedimiento se realiza convirtiendo los valores a Decibels.

En la fase de entrenamiento, se seleccionaron las muestras de entrenamiento de las clases agua – tierra. Mediante el módulo Regiones de Interés (ROI’s - Region of Interest), se detectaron submuestras del volumen de datos de la imagen sobre el que serán calculados los datos los valores de reflectancia (backscattering) de las clases “agua” y “no agua”, tomando cantidades similares y homogéneos de píxeles de cada categoría (Fig. 4 – a). Luego se analizaron los histogramas de todas las muestras para identificar el valor umbral de la distribución de los datos. Un histograma muestra con qué frecuencia aparece cada valor de la magnitud representada en una banda. En este caso, como muestra la Fig. 4 – b, para el conjunto de datos de dos muestras (agua – no agua), se observan dos picos. Se toma un valor aproximado entre los dos picos para calcular la separación de ambas clases, en este caso, el valor escogido es de -13 (Fig. 4 – c).

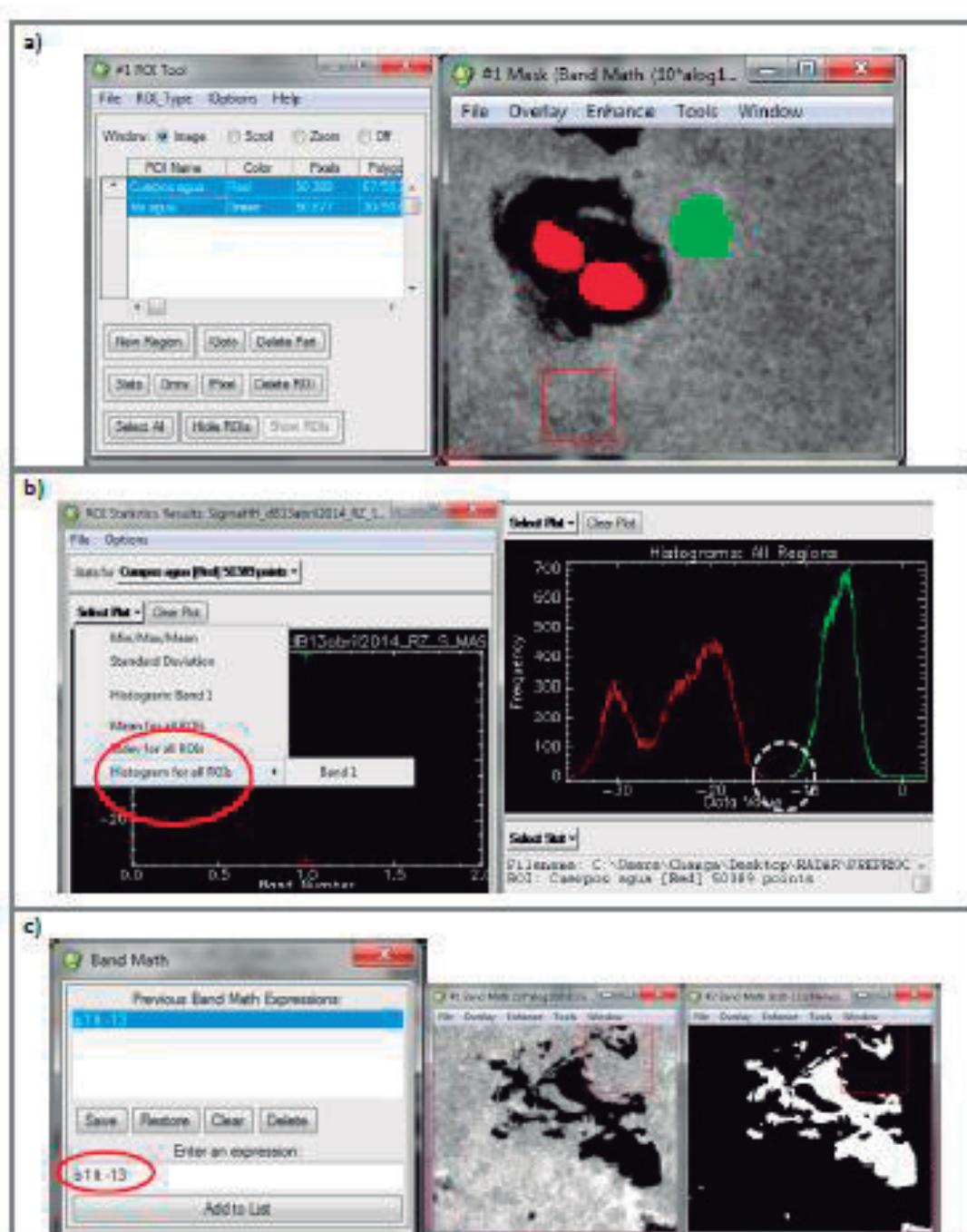


Figura 4. Procesamiento metodológico para la detección de cuerpos de agua.

4. Conclusiones

Los resultados de comparar los productos ópticos y radar de una misma área (Fig. 5) se destaca la transparencia de las coberturas nubosas de los datos radar.

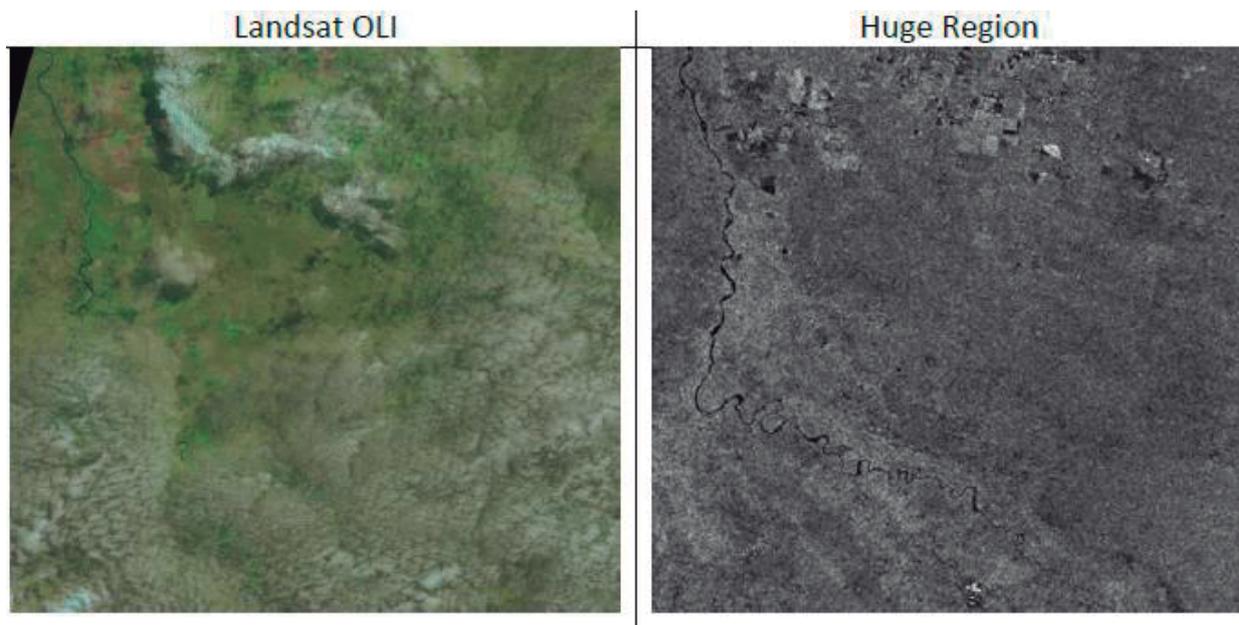


Figura 5. Comparación entre una imagen óptica y una radar de la misma escena

En la Fig. 6 se observa el alto contraste entre los umbrales que existen entre los cuerpos de agua (oscuros) y su entorno, y las diferencias en los valores del coeficiente de retrodispersión.

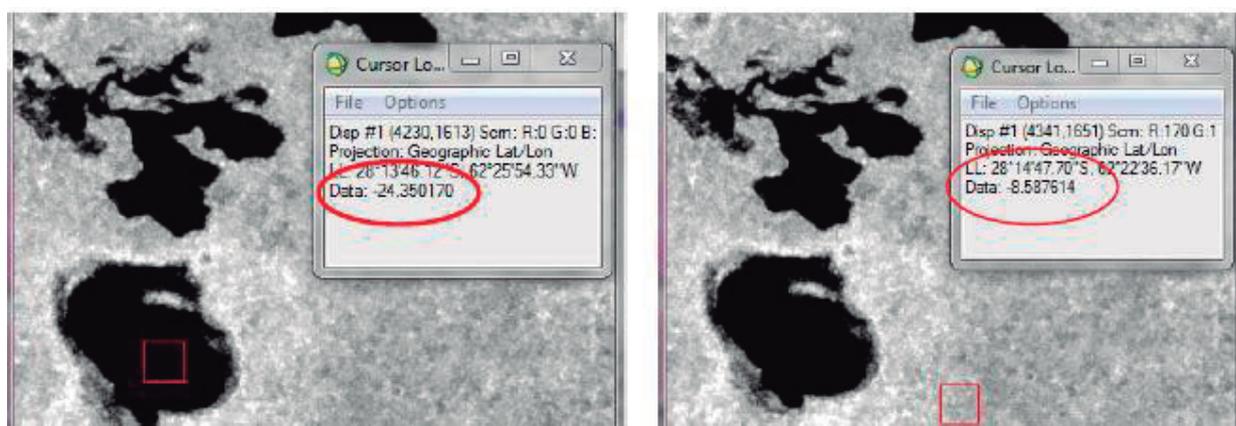


Figura 6. Comparación de los valores de reflectancia en dB. Valores “agua” y “tierra”.

En la Fig. 7 se muestran los cuerpos de agua que han resultado producto del procesamiento de las imágenes HUGE REGION – SCAN SAR durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo del año 2014.

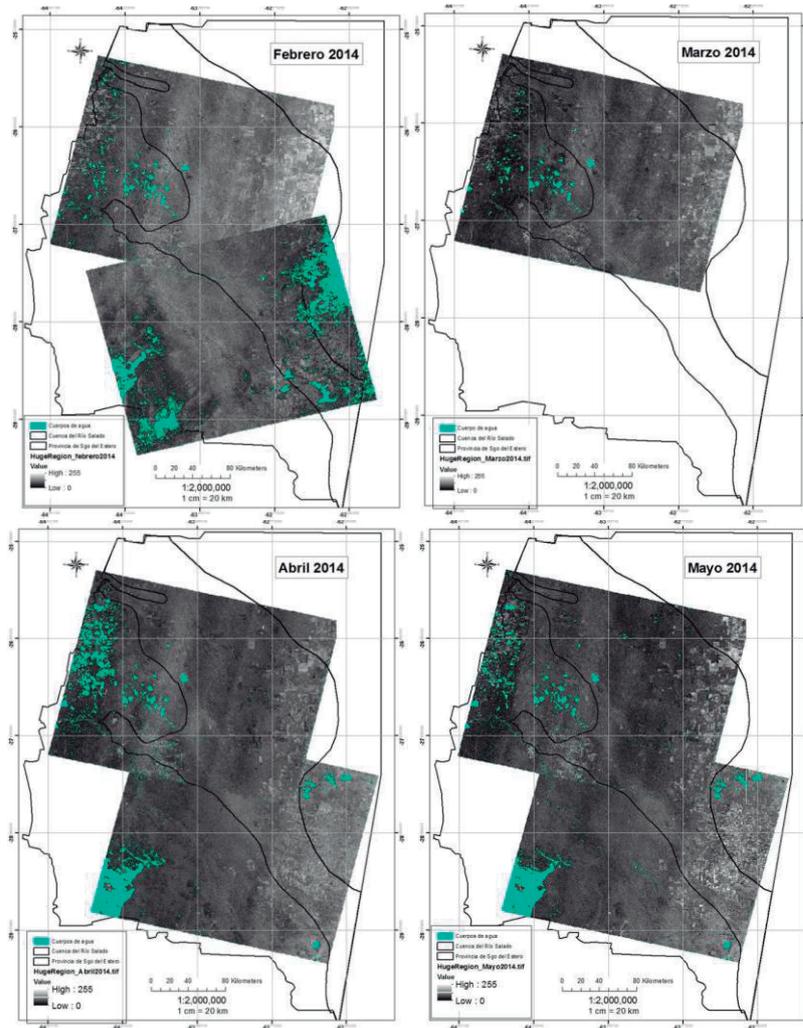


Figura 7. Mapas de cuerpos de agua presentes durante los meses febrero, marzo, abril y mayo del año 2014.

Durante los meses analizados no se identificaron grandes cambios de cuerpos de agua, o procesos vinculados a inundaciones (Fig. 7). Los eventos de inundaciones en áreas planas son producidos por la acumulación de precipitaciones, y su evolución es relativamente lenta (Belmonte & Camaño, 2009). Tanto las imágenes radar como las ópticas ofrecen distintas perspectivas de información respecto a la superficie terrestre. Cuando se desea monitorear eventos tales como las inundaciones, que generalmente coinciden con las épocas donde se producen las mayores precipitaciones, uno de los inconvenientes de trabajar con datos ópticos es la dificultad en la obtención de imágenes desprovistas de coberturas nubosas. Unas de las ventajas más significativas de los datos SAR es que la señal de las microondas atraviesan nubes y lluvia con un muy bajo o nulo deterioro de la señal (Panozzo, 2012). Para requerimientos de estudios de grandes extensiones, los sensores satelitales resultan ser herramienta de gran utilidad, incluso con compleja variabilidad estacional, reduciendo el costo y el tiempo (Lanfri, 2011). En este sentido, las imágenes Huga

Region utilizadas en el presente capítulo, tienen un cubrimiento regional, abarcando gran parte de la cuenca. Los resultados monitoreados entre los meses de febrero, marzo, abril y mayo no mostraron grandes variaciones en relación a la identificación de los cuerpos de agua.

Agradecimientos

Al Dr. Hugo R. Zerda por brindarme año a año el espacio en las jornadas del Día del SIG. A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Referencias

Boletta, P. (2001). Utilización de información agrometeorológica y satelital para la evaluación de la desertificación en el Chaco Seco - Departamento de Moreno, Santiago del Estero. Tesis de maestría en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Burkart, R; Bárbaro, N; Sánchez, R; Gómez, D. (1999). Ecorregiones de la Argentina. Componente Política Ambiental. Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Programa Institucional Ambiental (PRODIA) y Administración de Parques Nacionales. Buenos Aires. Argentina.

Chuvieco, E. (2010). Teledetección ambiental, la observación desde el espacio. Nueva edición actualizada. Editorial Ariel. ISBN 978-84-344-3498-1. España.

Lanfri, S. (2011). Desarrollo de una metodología para la detección de cuerpos de agua mediante el análisis de imágenes SAR COSMO SkyMed y de DEMs. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Calidad de servicio ecosistémico en área periurbana

Marta Evelia Izzo¹, Guido Lorenz², Valeria Ceirano³

¹ Becaria CONICET/UNSE; ² Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero; ³ INTA Quimilí

Contactos: martaizzo@gmail.com (1), lorenz.guid@gmail.com (2), valeriaceirano@gmail.com (3)

RESUMEN

Las ciudades crecen a un ritmo constante, modificando el tipo de cobertura/uso del suelo, la biodiversidad y el paisaje del entorno, sin tener en cuenta la disminución de la calidad ambiental que trae consigo la urbanización. Los beneficios obtenidos del ambiente se ven afectados, entre ellos el de regulación climática. En la ciudad de Santiago del Estero las temperaturas en el año suelen llegar frecuentemente a un valor muy por encima de la temperatura de confort (entre 21 y 26°C). En este trabajo se determinó la calidad de capacidad de regulación climática local, se verificó los valores obtenidos mediante imágenes térmicas. Donde se verificó que el tipo de cobertura determina la calidad de servicio ecosistémico tan necesario en la ciudad, que sufre temperaturas muy elevadas parte importante del año. Por lo que es indispensable realizar un ordenamiento territorial a la hora de planificar el crecimiento de la ciudad.

Palabras clave: crecimiento urbano, regulación climática, Santiago del Estero.

1. Introducción

La población mundial se ha concentrado en áreas urbanas superando actualmente el 54% (Banco Mundial, 2017), alcanzando en América Latina el 60% y en Argentina el 80%, valores que en los últimos años se están incrementando (Di Pace, 2012). Desde hace varias décadas, científicos y planificadores han comenzado a preocuparse por el crecimiento urbano, dada la intensificación de la percepción de la pérdida de la calidad de vida en las ciudades (Matteucci, 2005). La urbanización contiene tres procesos que conllevan consecuencias espaciales diferentes. Ellos son: el crecimiento neto de la población urbana por natalidad, la migración de población rural a la ciudad y la expansión del área urbana (Matteucci y Falcón, 2012). Así, este componente de la expansión urbana trae consecuencias en el entorno vecino por el cambio de uso y en la calidad de vida de la ciudad por la pérdida de naturaleza y servicios ecosistémicos (SE) (Matteucci y Falcón, 2012). La expansión urbana trae consigo impactos en el uso de la tierra (Živanović Miljković, 2012) y en particular consecuencias directas sobre la biodiversidad de elementos del paisaje y de la cobertura natural (Matteucci y Falcón, 2012). En las áreas rurales o naturales, el cambio de uso de la tierra es reconocido como el principal factor de reducción de la biodiversidad y la diversidad de sistemas (Vitousek et al., 1997). La urbanización caótica es un fenómeno mundial, complejo y poco comprendido, donde confluyen gran número de factores a diversas escalas y diversos intereses de los grupos sociales intervinientes que generan conflictos (Matteucci y Falcón, 2012). Las fronteras urbano- rurales constituyen áreas de especial

interés para la ciencia y la gestión debido a las problemáticas ambientales y sociales que en ellas ocurren (Yu y Ng, 2007; Irwin y Bockstael, 2007). Uno de los desafíos contemporáneos más importantes es el desarrollo sostenible de las zonas periurbanas (Živanović Miljković, 2012). En Argentina, el avance de la zona urbana de las últimas décadas ha ocurrido con escasa regulación quedando librada a la especulación inmobiliaria (Di Pace, 2012), observándose la inoperancia del Estado para establecer y hacer cumplir normativas que mitiguen los conflictos entre desarrollos habitacionales y la conservación de funciones ecológicas imprescindibles para el bienestar de la sociedad (Matteucci y Falcón, 2012). Entre los efectos ecológicos más significativos se destacan la disminución de calidad o eliminación de servicios ambientales, la pérdida de tierras con vocación agropecuaria, la invasión de especies exóticas, la destrucción de vegetación ribereña y de fragmentos de ecosistemas, la contaminación de agua y aire, entre otros (Di Pace, 2012).

En los últimos años, la expansión de la urbanización se desarrolla sobre sectores de monte nativo que al desaparecer dejan de brindar SE que les son propios. Los usos del suelo, sus patrones de cambio y los SE que brindan, principalmente el de regulación térmica, dada las temperaturas de la ciudad que alcanzan hasta 50 grados de sensación térmica, deben ser analizados para comprender la dinámica de este tipo de paisaje particular. La planificación del uso del territorio se considera indispensable para asegurar el desarrollo armónico de nuestras sociedades, teniendo como metas mayor equidad social y el uso sostenible de los recursos naturales (FAO, 1976; Ministerio de Planificación Federal, 2012). Por considerarse que los bosques zonas de vacancia para construcción, más que sitios con valor de existencia por los beneficios que brindan los ambientes menos modificados, son poco valorados y tenidos en cuenta al momento de decidir.

2. Materiales y métodos

Se trabajó con imágenes satelitales Landast 8, resolución de 30 metros, procesadas y analizadas con software Grass Gis 7.4.0, en fechas indicadas en la Fig. 4. Los gráficos y mapas fueron realizados con el software de geoestadística R Studio. Se colocó sobre el área de estudio una grilla de muestreo de 1,47x 1,47 kms, con un total de 192 unidades de muestreo.

Se determinaron 11 subservicios ecosistémicos que brinda el sitio según la cobertura/uso del suelo mediante la metodología Koshke de experto (Koshke, 2012), donde se determinan trece servicios ecosistémicos del enfoque de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2005), los cuales se evalúan en: (a) un enfoque de transferencia de beneficios y (b) una evaluación cualitativa basada en entrevistas con expertos. Se desarrolla un marco de evaluación de criterios múltiples, sobre cómo se pueden agregar los servicios de ecosistemas para representar mejor la comprensión regional específica de los beneficios que los sistemas naturales deberían proporcionar a la sociedad. Analizando en este trabajo el servicio de regulación climática local: 1) se analiza la imagen según la respuesta espectral, determinando así los grupos según tipo de cobertura/ uso del suelo, 2) estos grupos se asocian a calidad de regulación climática local.

Aun así, se verificaron los resultados obtenidos mediante imágenes térmicas, determinando dentro de servicio de regulación, el de regulación climática local, considerado muy importante en la ciudad de Santiago, que tiene un clima subtropical con estación seca, y la media anual se encuentra muy por encima de la zona de confort.

2.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona sur periurbana-rural de la ciudad capital de Santiago del Estero, en provincia homónima. En esta ciudad está creciendo la urbanización a un ritmo constante, con toda la infraestructura que trae consigo.

Los límites del sitio a estudiar se encuentran marcados a 30 km desde el centro de la ciudad hacia el sur. Al este por el río Dulce, que delimita la ciudad de Santiago con el departamento Banda, y al oeste con el canal San Martín

El área presenta un marcado gradiente urbano/rural con diversidad de estructuras y procesos determinados por variados usos del suelo, cuyas modificaciones se van acelerando. El área total es de 380 km², con múltiples usos del suelo.

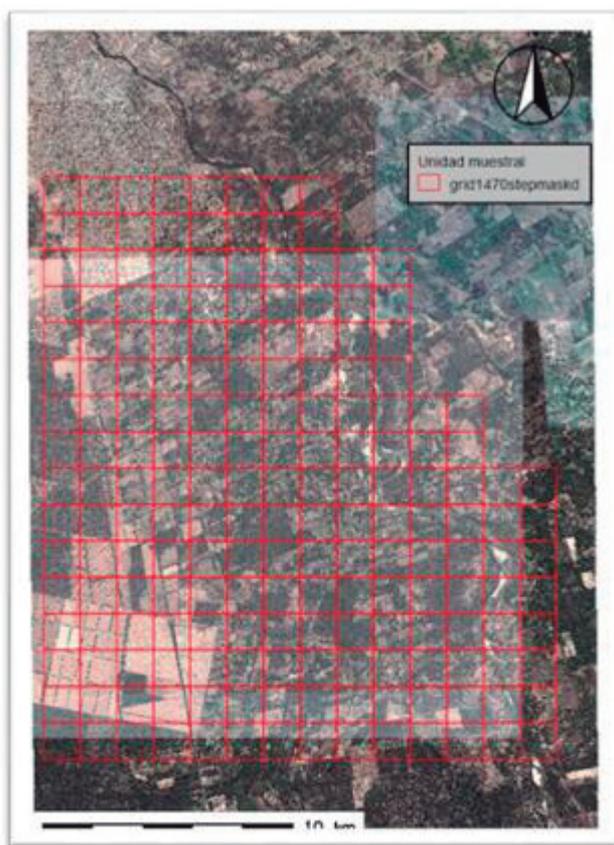


Figura 1. Área de estudio, ubicada en zona sur periurbana/rural de la ciudad de Santiago del Estero.

3. Resultados

Mediante una clasificación no supervisada en función de la firma espectral se determinaron las 7 categorías finales (Fig. 2).

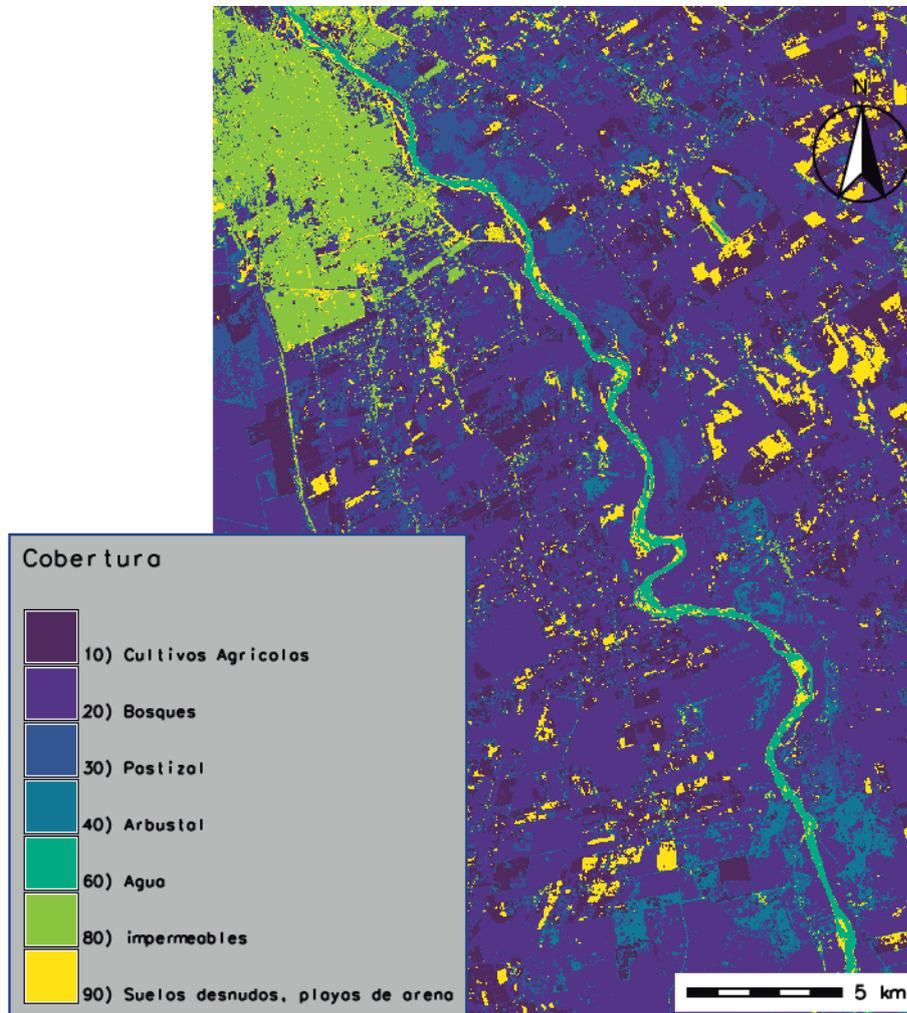


Figura 2. Mapa con clasificación según tipos de cobertura.

Se asociaron las coberturas a calidad de servicios. Son 11 los subservicios, agrupándolos para determinar 6 servicios ecosistémicos. De estos se tomó para este trabajo el servicio de regulación de clima local, se verificó el índice obtenido mediante imágenes térmicas

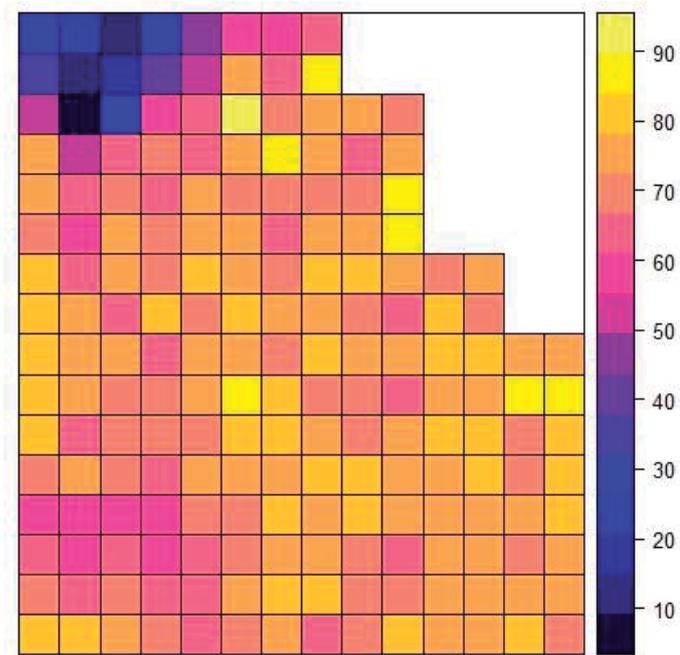


Figura 3. Mapeo de servicio de regulación climática local (valores de 0/100). El servicio de regulación.

Mediante las bandas térmicas se determinaron las temperaturas en Grados centígrados del sitio en diferentes épocas del año que se han captado las imágenes satelitales.

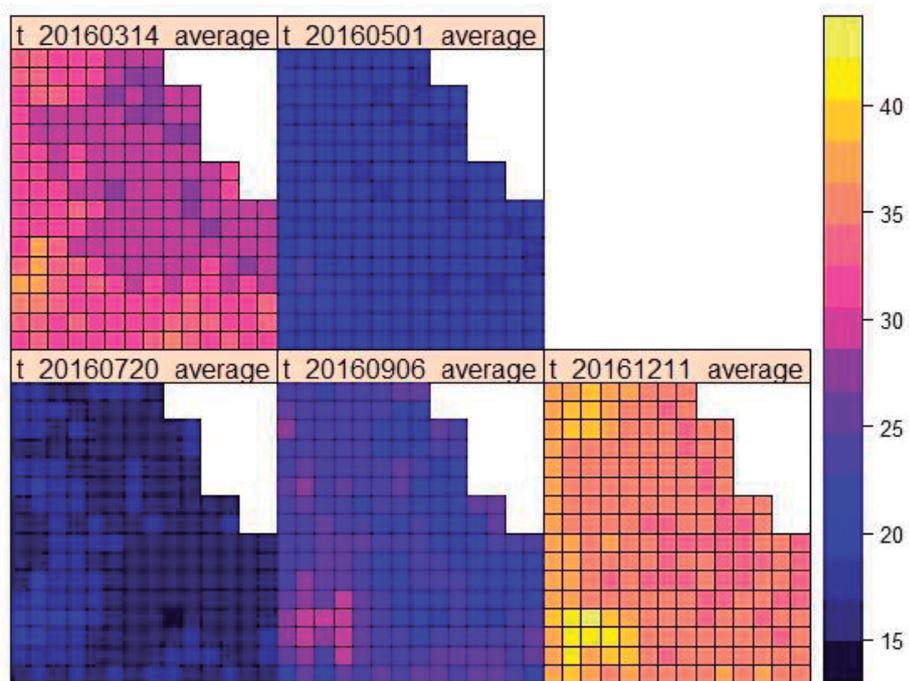


Figura 4. Mapas de temperatura media del área de estudio en cinco épocas del año.

Se ha determinado la relación de porcentaje de superficie boscosa con la temperatura, y la relación del servicio de regulación térmica con la temperatura.

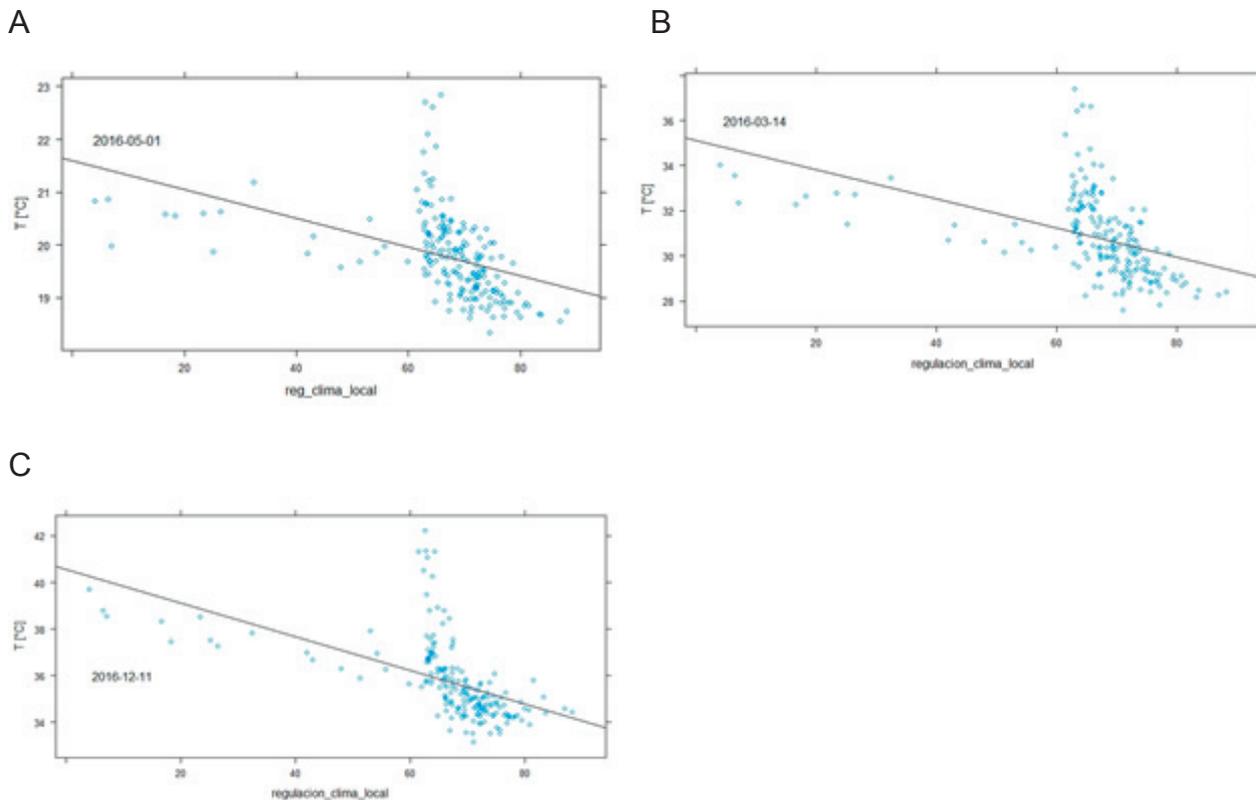


Figura 6. Curvas de relación entre temperatura (3 épocas diferentes del año) y servicio de regulación climática local).

Se puede ver en la curvas de la Fig. 6 que la mayor calidad de servicio de regulación climática local se da en temperaturas más bajas.

4. Conclusiones

La metodología aplicada pudo ser corroborada mediante otra técnica, comprobando que si es válida para esta zona de estudio.

Se corroboró así que las imágenes satelitales son una gran herramienta para el ordenamiento territorial urbano contemplando calidad ambiental

La expansión de las ciudades es algo inevitable, pero debe ser planificado a fin de poner un freno a la pérdida de calidad de servicios ecosistémicos.

5. Agradecimientos

Al Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques (INSIMA), a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Facultad de Ciencias Forestales – UNSE y al Dr. Hugo Zerda.

6. Referencias

Di Pace, M. (2012). *Ecología urbana*. Universidad Nacional General de Sarmiento. Buenos Aires.

FAO (1976). *A framework for land evaluation*. FAO Soils Bulletin, FAO, Rome.

Matteucci, S. (2005). De la ecología urbana a la urbanoecología. *Fronteras* 4(4): 18-30.

Matteucci, S. D. y M. Falcón (2012). Efectos de la urbanización sobre la biodiversidad. En: Athor J. (editor). *Buenos Aires. La historia de su paisaje natural*. Ed. Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Buenos Aires. Pp. 272 – 291.

Ministerio de Planificación Federal (2012). *Argentina 2016. Política y Estrategia Nacional de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Construyendo una Argentina equilibrada, integrada, sustentable y socialmente justa*. República Argentina, Poder Ejecutivo Nacional, Ministerio de Planificación Federal, Buenos Aires.

Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco, and J.M. Melillo (1997). Human domination of earth's ecosystems. *Science* 277:494– 499.

Yu X. J., and Ch. N. Ng. (2007). Spatial and temporal dynamics of urban sprawl along two urban–rural transects: A case study of Guangzhou, China URL: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.03.008> (6 julio 2017).

Živanović Miljković, J.,T. Crnčević, and I. Marić (2012). Land use planning for sustainable development of peri-urban zones. *SPATIUM International Review* 28:15-22.

Análisis de la severidad del fuego mediante información satelital multiespectral y multitemporal. Estudio de caso en el Departamento Capital, provincia de Santiago del Estero, Argentina

Navarrete Alvaro¹, Hugo Raúl Zerda²

Facultad de Agronomía y Agroindustrias - UNSE ¹ Facultad de Ciencias Forestales-UNSE²

Contactos: navarretealvarom@yahoo.com.ar (1), hzerda@unse.edu.ar (2)

RESUMEN

Los bosques del Chaco semiárido sufren los efectos de los cambios en el uso del suelo provocando la disminución de sus superficies y otros procesos como la fragmentación. El fuego en la provincia de Santiago del Estero se relaciona con estos eventos. La percepción remota permite estudiar el impacto del fuego en la vegetación. La respuesta postfuego depende de los tipos de vegetación y otros componentes del ecosistema. El cociente normalizado del área quemada permite evaluar la incidencia del fuego sobre la vegetación y la diferencia del cociente normalizado discriminar áreas quemadas, y la severidad de daños en la vegetación. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la severidad de la acción del fuego y la dinámica espectral de áreas quemadas mediante el índice multiespectral NBR. Los índices ofrecieron información de severidad del efecto del fuego para los casos en las áreas quemadas 1 y 2. En el caso del área 3, el índice NBR presenta un comportamiento de similaridad visual y espectral con áreas agrícolas cosechadas.

1. Introducción

Los incendios generan un gran peligro, cada año causan daños significativos en todo el mundo, desde el punto de vista ecológico, social, económico y humano; estos riesgos son especialmente elevados cuando las condiciones meteorológicas son extremas, con estaciones secas y calientes o fuerte vientos.

Una gran ventaja de la percepción remota es la capacidad de adquirir información en diversas regiones del EsEM (espectro electromagnético), mediante los sensores remotos que los sistemas satelitales captan del terreno. Mediante combinaciones de imágenes multiespectrales se puede incrementar la percepción de objetos, áreas o fenómenos en estudio, aumentando las capacidades del analista de imágenes, al utilizar bandas espectrales que abarcan porciones del (espectro electromagnético (EsEM) que el ojo humano no registra.

Más recientemente se ha utilizado el cociente normalizado del área quemada, el NBR (Normalized Burnt Ratio), para evaluar el estado anterior y posterior al efecto del fuego y evaluar su efecto sobre las coberturas del suelo (Bianchini et al., 2005).

La diferencia multitemporal de los valores del NBR obtenidos antes y después del fuego se conoce comúnmente como el delta NBR (dNBR). Esta diferencia, proporciona un índice escalado del grado de cambio causado por el fuego y, por tanto, de la severidad de los daños (Key & Benson 1999; Key & Benson 2005).

Los bosques del Chaco semiárido, sufren actualmente un proceso de fuerte deforestación debido a cambios en el uso del suelo, derivando en procesos de fragmentación (Zerda, 1998, Zerda, 2003; Zerda y Moreira, 2006; Zerda, 2014), lo cual genera la pérdida de hábitat, lleva a la reducción de las poblaciones locales de diferentes organismos y a un mayor aislamiento (Frate et al., 2015). El fuego en la provincia de Santiago del Estero, está relacionado con la deforestación en: i) después del derribo del bosque, se eliminan los restos vegetales mediante el uso del fuego ii) al cambiar del uso del suelo, pasan a sistemas silvopastoriles, utilizándose el fuego para limpieza de leñosas y para provocar el rebrote de los pastos. La magnitud de las superficies desmontadas, indica la dimensión asociada al uso del fuego.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

i) Determinar grados de severidad de la incidencia del fuego en las coberturas del suelo mediante el uso de imágenes satelitales multiespectrales y multitemporales.

2.2 Objetivos específicos

i) Determinar áreas con anomalías térmicas mediante datos satelitales.

ii) Discriminar áreas quemadas mediante imágenes satelitales multiespectrales y multitemporales.

iii) Generar índices espectrales de vegetación multiespectral para detectar cicatrices de quema y determinar grados de severidad del fuego.

iiii) Generar mapas de severidad.

3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en el departamento Capital y parte de Guasayán en la provincia de Santiago del Estero, oeste de la ciudad capital (Fig.a 1) en la escena 230/079 de OLI Landsat 8.

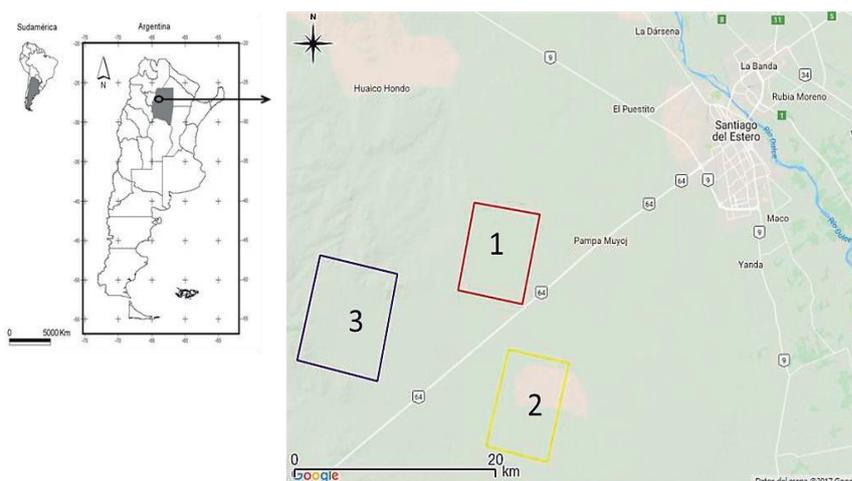


Figura 1. Ubicación del área de estudio y casos seleccionados delimitados con los polígonos 1,2 y 3.

En la provincia de Santiago del Estero el tipo climático es semiárido BShw, según la clasificación climática de Köppen (Torres Bruchmann, 1981).

La vegetación de Santiago del Estero está formada por bosques xerófitos, estepas halófilas y sabanas edáficas (Cabrera 1976). Sin embargo, la deforestación con fines agrícolas y ganaderos y el fuego produjeron severos cambios en las coberturas vegetales nativas, predominando en el Este y Oeste de la provincia paisajes de fragmentos de bosque y pastizales con monocultivos agrícolas (Zerda y Moreira, 2001 y 2004).

3.2 Obtención de datos satelitales

3.2.1 Determinación de áreas con anomalías térmicas

Para corroborar la interpretación visual y digital de las imágenes satelitales OLI LANDSAT 8 con quemadas, se utilizó la base de datos Queimadas (BDQ) del Instituto de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE) en <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>. Esta BDQ tiene una interface gráfica interactiva, a través de la cual se seleccionaron “hot spot” detectados por el sensor MODIS de los satélites Aqua y Terra, según criterios espaciales y temporales en el área de estudio. Se seleccionaron los focos de calor detectados por diferentes satélites; para este caso se seleccionó el intervalo de fechas 01/05/2016 al 18/06/2016, cubriendo el período de las imágenes OLI LANDSAT 8.

3.2.2 Obtención de datos OLI Landsat 8

Para la obtención de datos satelitales se utilizaron las derivadas del sensor OLI LANDSAT 8 de la serie temporal disponible que abarca el periodo anterior y posterior a las quemadas determinadas al inicio de la investigación. Se recolectaron datos desde la fecha 01/05/2016 hasta 01/03/2017. Se seleccionaron imágenes libres de nubes en el área de estudio, contabilizando 11 escenas las que se detallan en la Tabla 1.

Los datos del path/row 230/79 que cubren el área de estudio fueron descargadas de dos sitios diferentes: i) Earth Explorer de Servicio Geológico de EEUU (USGS), ii) catálogo de imágenes de la Comisión Nacional Espacial (CONAE).

3.3 Procesamiento de datos y cálculos mediante QGIS

3.3.1 Software

Para el manejo, procesamiento y análisis de la información se trabajó con el software QGIS 2.14, que posibilita obtener perfiles espectrales, cálculo de NBR, mapas de clases de severidad de las quemadas en el área en estudio, etc. También se utilizó el Software Statistical Package for the Social (SPSS 1.9) para el análisis estadístico de los datos espaciales.

3.3.2 Corrección de imágenes por el método TOA

Las imágenes son pre-procesadas mediante el plugin de clasificación semiautomática (Congedo, 2016), realizando la corrección atmosférica, generando como resultado imágenes con valores de reflectancia en superficie con el método TOA, necesarios para generar los índices espectrales de Normalized Burnt Ratio, NBR (Key & Benson, 2005).

Tabla 1. Fechas de adquisición y códigos de las imágenes de USGS y CONAE.

Fechas (día/mes/año)	Denominación de producto USGS*
01 /05/ 2016	1_LC82300792016122LGN00 (prefuego)
18 /06/2016	2_LC82300792016170LGN00 (postfuego)
20 /07/ 2016	3_LC82300792016202LGN00
24 /08/ 2016	4_LC82300792016234LGN00
06 /09/ 2016	5_LC82300792016250LGN00
22 /09/ 2016	6_LC82300792016266LGN00A
Denominación de producto CONAE**	
09/11/ 2016	7-LO82300792016314COA00
11 /12/ 2016	8-LO82300792016346COA00
26/01/ 2017	9-LO82300792017028COA00
13/02/ 2016	10-LO82300792017044COA00
01 /03/ 2017	11-LO82300792017060COA00

*Especificaciones de denominación de USGS en: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>

**Especificaciones de denominación de producto CONAE en: <https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf>

3.4. Selección del área de estudio y tipos de eventos

Se seleccionó el sector correspondiente a la margen derecha del Rio Dulce, zona de secano en la mayor parte del área.

Se seleccionaron 3 zonas con incidencia de fuego/quema, denominadas para este trabajo área quemada 1(polígono de color rojo), área quemada 2 (polígono de color amarillo), área 3 (polígono de color azul).

3.5 Índices multiespectrales

3.5.1 Índice NBR (Normalized Burnt Ratio)

La metodología del cálculo de los índices espectrales, es la desarrollada por Key & Benson (2005), para el sensor OLI de Landsat 8:

$$NBR = [(banda\ 5\ NIR - banda\ 7\ SWIR2) / (banda\ 5\ NIR + banda\ 7\ SWIR2)]$$

3.5.2 Índice dNBR (Difference Normalized Burn Ratio)

El cociente de quemado normalizado se utiliza con frecuencia para estimar la severidad de lo quemado:

$$dNBR = (NBR\ prefuego - NBR\ postfuego)$$

Para el análisis e interpretación de los valores de dNBR se utilizó la tabla de categorías de severidad propuesta por Key & Benson (1999) para el programa FireMon del Servicio Geológico de los EEUU (USGS). La Tabla 2, muestra los umbrales para interpretar las diferencias de NBR, con los cuales se crea un mapa de clases de severidad de las áreas quemadas.

Tabla 2. Clases de severidad del fuego (USGS FIREMON).

dNBR	Severidad del quemado
<-0,25	Gran rebrote después del incendio
-0,25 a -0,1	Rebrote después del incendio
-0,1 a +0,1	Sin quema
0,1 a 0,27	Quema de baja severidad
0,27 a 0,44	Severidad moderada-baja
0,44 a 0,66	Severidad moderada a alta
> 0,66	Quema de alta severidad

3.6. Obtención de valores de los índices (NBR, dNBR) sobre las áreas quemadas.

Para esto se digitalizó una transecta permanente sobre las imágenes NBRprefuego y NBRpostfuego, que permitió obtener los perfiles espectrales de salida en QGIS. Los valores del muestreo fueron exportados a la planilla de SPSS para obtener gráficos y realizar el análisis estadístico.

4. Resultados y discusión

La selección de focos de calor, anomalías térmicas del sensor MODIS, abarcaron las áreas 1 y 2, quedando fuera de las detecciones el área 3 (Fig. 2), dentro del período de estudio cubierto por las escenas utilizadas de OLI LANDSAT 8. Por lo cual, esta constatación previa de los sectores en estudio es de gran practicidad y utilidad para el apoyo en la interpretación y constatación del fenómeno fuego.

Para las áreas 1, 2 y 3, el análisis estadístico de diferencia en las medias de los índices NBRpre y NBRpost fueron significativamente diferentes en todos los sectores (A-B-C-D), para un *p-valor* <0,05 y un $\alpha = 5\%$.

Las Figs. 3 (A, B y C) indican que cuanto mayor fue el cambio ocurrido en la vegetación por efecto del fuego se encontraron valores de dNBR de magnitud superior, indicando con ello un mayor efecto del fuego sobre la vegetación, según lo indican Key & Benson (2005).

Las imágenes NBRpre y postfuego mostraron diferentes tonalidades de grises; previo al fuego, las áreas no quemadas en mayor proporción, mostraron tonalidades de grises claros y se detectaron, en menor proporción, tonos de grises más oscuros los cuales indican áreas que fueron quemadas con anterioridad a este estudio (Figura 3A). Después de la ocurrencia del fuego, la imagen mostró áreas con tonos de grises oscuros bien definidos, las cuales corresponden a sitios quemados, (Figura 3B).

Los sectores 'A' y 'C', no presentaron cicatrices de quema (Figura 4B) mientras que en el sector 'B', sí se detectaron cicatrices de quema.

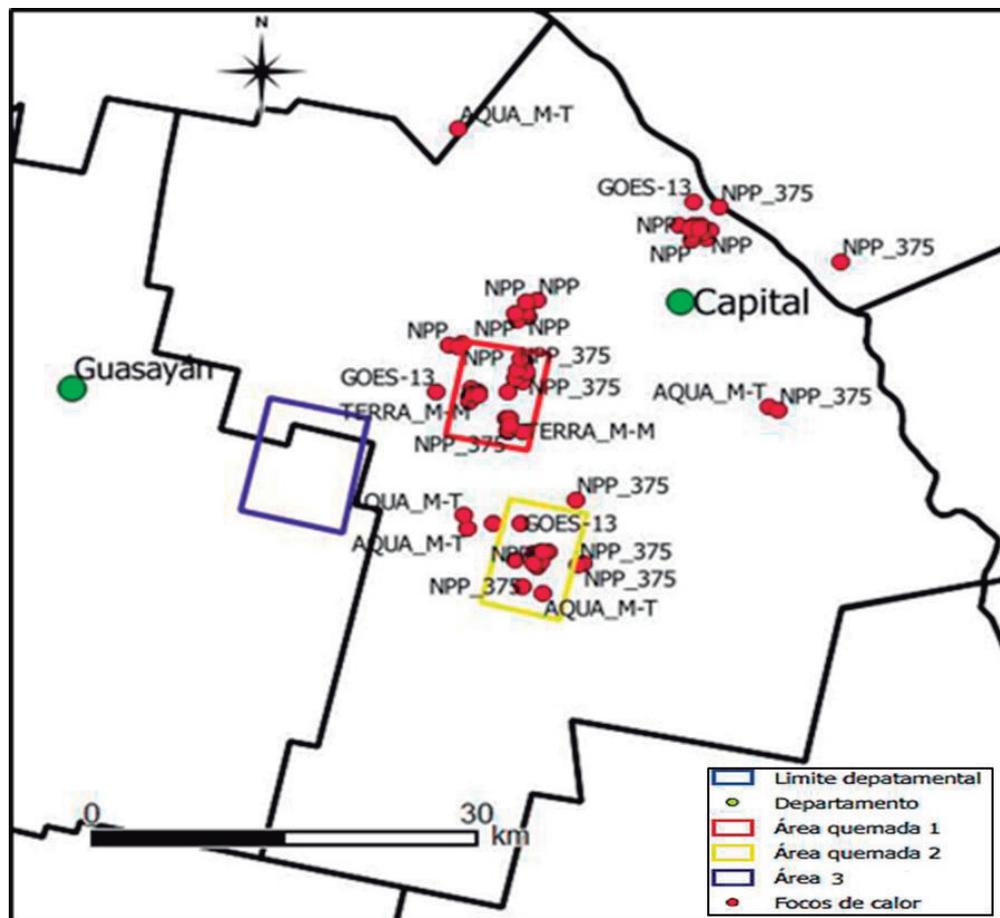


Figura 2. Focos de calor seleccionados en las fechas del estudio.

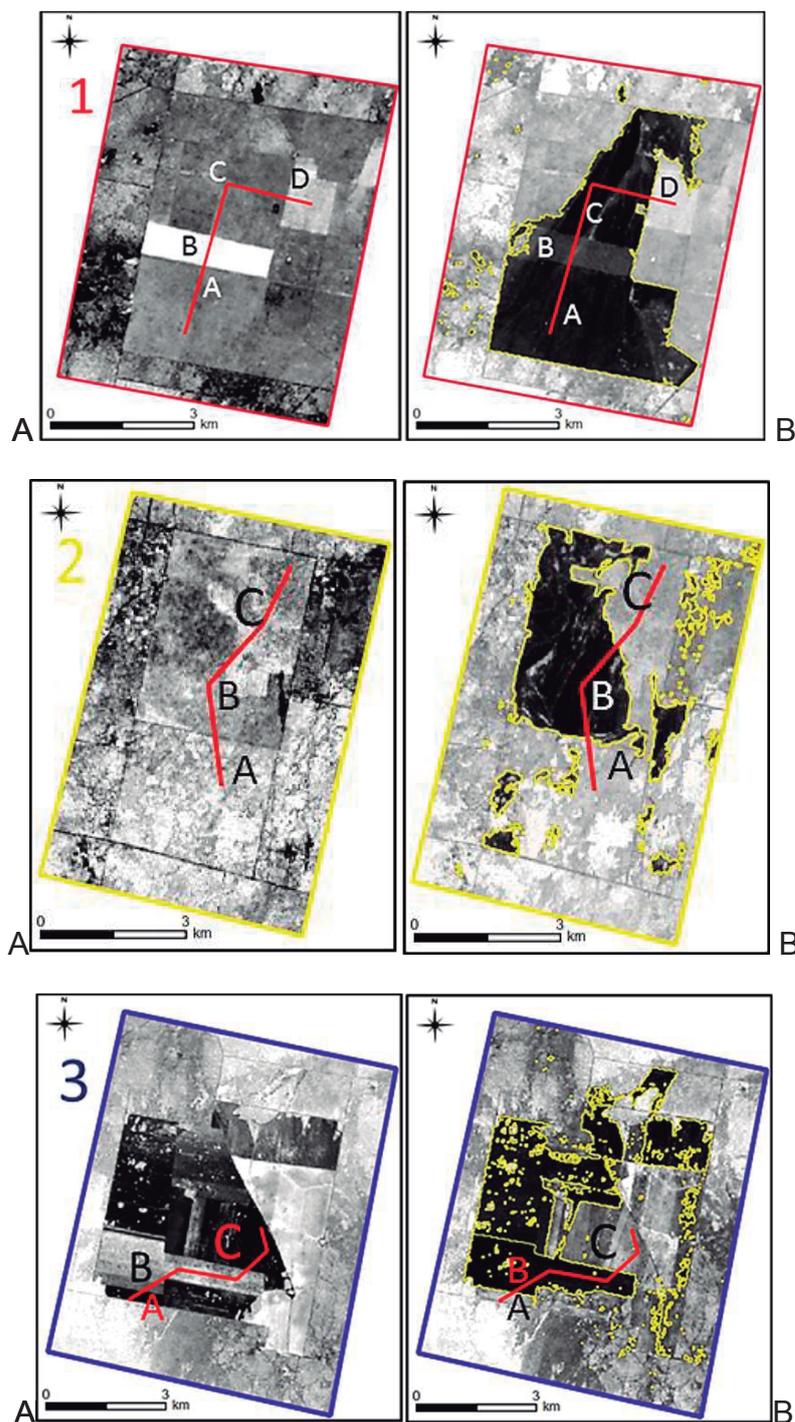


Figura 3. Transecta de muestreo en áreas de estudio (1, 2, 3).

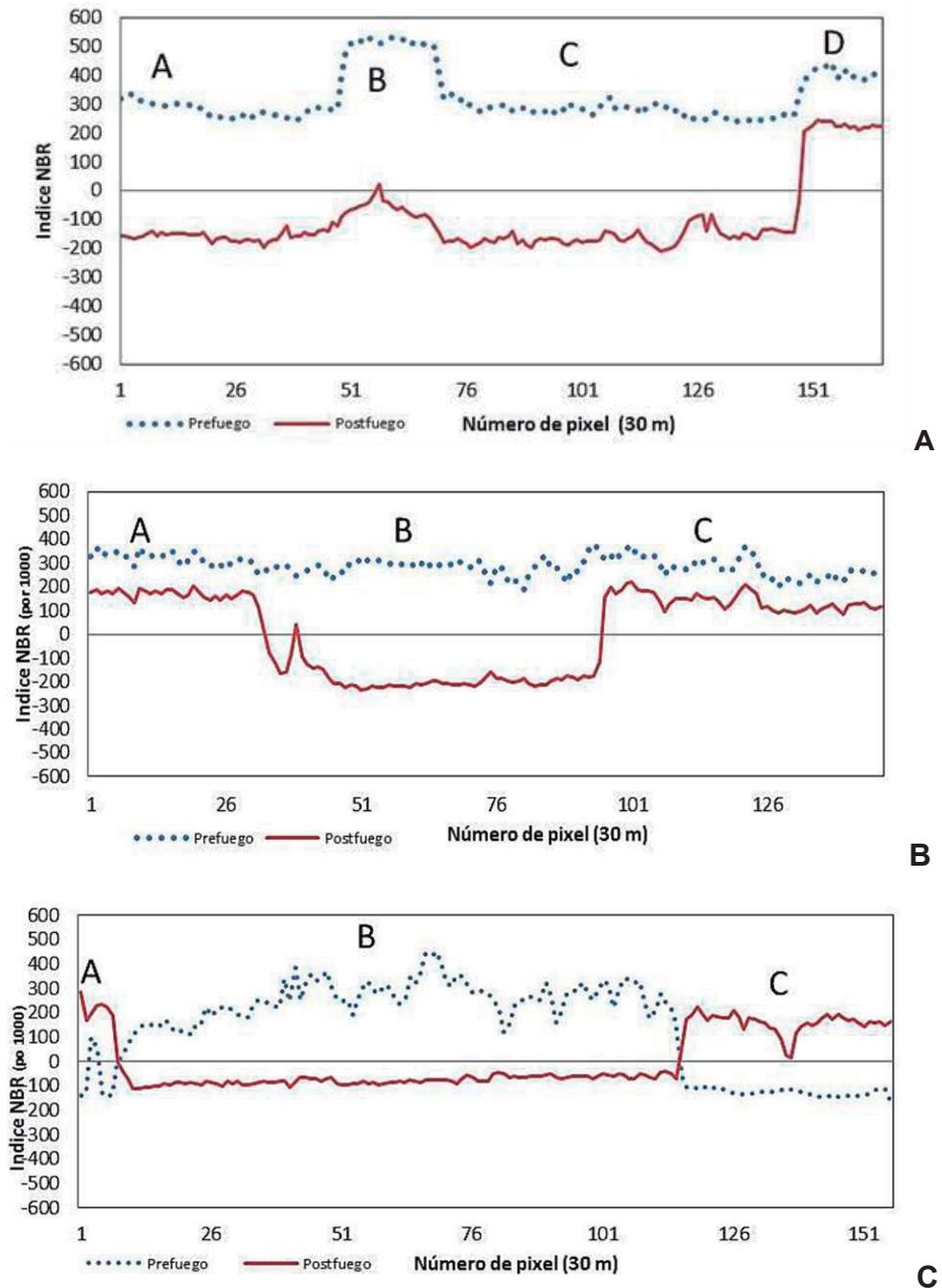


Figura 4. Perfiles espectrales de NBR prefuego y postfuego del área quemada 1.

5. Conclusiones

Se comprobaron diferentes grados de afectación en las coberturas del suelo debido al fenómeno del fuego, los datos satelitales utilizados, OLI Landsat 8 fueron apropiados para esta área de estudio.

El índice de vegetación NBR permitió inicialmente la discriminación visual y, posteriormente espectral entre las áreas quemadas y las no quemadas, mediante las estadísticas y gráficos.

El análisis del NBRpost de área quemadas 1 y 2 permitió discriminar áreas quemadas considerando los valores de NBR menores a 0.

Para el caso del área 3, su similitud espectral NBR y visual con las áreas quemadas 1 y 2 posfuego derivó en una confusión de discriminación, similar a Stitt et al. (2001) quienes indicaron comportamientos similares para áreas agrícolas postcosecha, con valores de NBR cercanos a -100. Información sobre las condiciones del campo, se obtuvo mediante comunicación personal del Profesor Ariel Suárez, de la cátedra Uso del Suelo de la carrera de Ing. Agronómica-UNSE quien informó que esta área se encontraba en condición de barbecho químico.

Finalmente, ninguno de los casos analizados presentó categorías de severidad alta.

Considerando las condiciones prevalentes del cambio climático global y el clima propio de la provincia de Santiago del Estero, será importante poder determinar umbrales de severidad locales para la provincia de Santiago del Estero.

6. Agradecimiento

Al programa de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, por el financiamiento del Proy. CICYT-UNSE 23B131, marco de ejecución de este trabajo.

7. Referencias

Cabrera, L. A. (1976). Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. 2ª Ed. Tomo II, Editorial ACME S.A.C.I., Buenos Aires, Argentina, 85 p.

Congedo, L. (2016). Semi-automatic classification plugin documentation. En: https://www.researchgate.net/publication/307593091_Semi-Automatic_Classification_Plugin_Documentation_Release_6011 Acceso: 06.07.2018

Key C. & Benson N. (1999). FIREMON BR Cheat Sheet V4, https://archive.usgs.gov/archive/sites/www.nrmcs.usgs.gov/files/norock/products/SEVER36_im_copy6.pdf

Key C. & Benson N. (2005). Landscape assessment: remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn index. En: Lutes D. C., R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson & L. J. Gangi (Eds.) FIREMON: fire effects monitoring and inventory system. General Technical Report RMRS-GTR-164-CD: LA1-LA51. USDA, Rocky Mountain Research Station, Ogden, Utah, USA.

Frate, L.; Acosta, A. R. T.; Cabido, M.; Hoyos, L.; Carranza, M. L. (2015). Temporal Changes in Forest Contexts at Multiple Extents: Three Decades of Fragmentation in the Gran Chaco (1979-2010), Central Argentina. En: PLoS ONE 10(12): e0142855. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142855> Acceso: 06.07.2018.

Key, C. & Benson, N. (2005). Landscape assessment: remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn index. En: Lutes D. C., R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson & LJ Gangi (Eds.) FIREMON: fire effects monitoring and inventory system. General Technical Report RMRS-GTR-164- CD: LA1-LA51. United States Department of Agriculture, Rocky Mountain Research Station, Ogden, Utah, USA.

Key, C. & Benson , N. 1999. The normalized burn ratio, a Landsat TM (Thematic Mapper) radiometric index of burn severity incorporating multitemporal differencing. En: <http://nrmssc.usgs.gov/research/nbr.htm> Acceso: 06.07.2018.

Stitt, S.; Guthrie, J.; Hawbaker, T.; Dolhancey, M. (2011). U.S. Geological Survey Development of a Landsat-based Fire Disturbance ECV. 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Sydney, Australia, 10-15 April 2011. En: <http://www.isprs.org/proceedings/2011/isrse-34/211104015.pdf> . Acceso: 02.03.2018

Torres Bruchmann, E. (1981). Climatología General y Agrícola de la Provincia de Santiago del Estero. Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, 1981. 199p.

Zerda, H.R.(1998). Monitoring der Vegetations- und Landnutzungs_ veränderungen durch Brandrodung und Übernutzung im Trocken-Chaco Argentinien mit Satellitenfernerkundung und GIS. Cuvillier Verlag Göttingen, Alemania. 175 p.

Zerda, H.R. (2003). Percepción remota y SIG para el estudio del fuego (capítulo 27). En Kunst, C.R., Bravo. S. y Panigatti, J.L., (Eds.). Fuego de en ecosistemas de argentina, Edic. INTA. Santiago del Estero, Argentina. (p.33-326).332 p.

Zerda, H. R. y Moreira, M. L. (2006). Monitoreo del avance de la frontera agropecuaria en el Chaco Argentino. En Anais do VII Seminario de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Aplicados à Engenharia Florestal. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, Curitiba, PR, Brasil. oct. 2006. CD.

Zerda, H.R. (2014). Régimen de fuego 2013-2014 en Santiago del Estero, modelización espacial mediante SIG. En: Zerda, H. R. (Ed.) Día del SIG 2014, aplicaciones de los SIG, trabajos del SIGL@b. - 1a ed. - Santiago del Estero. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Forestales, 2014. E-Book.

2018

día SIG

SIGL@b

Cátedra de Sistemas
de Información Geográfica



FACULTAD DE
CIENCIAS FORESTALES
Ing. Néstor René Ledesma

· 60 Aniversario 1958 - 2018 ·



UNSE

Universidad Nacional
de Santiago del Estero

ISSN : 2469-0856