

Potencialidades de las nuevas tecnologías en el agro pampeano

Compiladores:

Zinda Roberto

Mauricio Farrell

Lorena Carreño



Secretaría
de Agroindustria



Ministerio de Producción y Trabajo
Presidencia de la Nación

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

Centro Regional La Pampa-San Luis

Estación Experimental Agropecuaria Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”

Potencialidades de las nuevas tecnologías en el agro pampeano / Roberto Zinda ... [et al.] ; compilado por Roberto Zinda ; Mauricio Farrell ; Lorena Carreño. - 1a ed. – Anguil, Buenos Aires : Ediciones INTA, 2018.

Versión impresa: 174 p. ; 28 x 20 cm.

ISBN 978-987-521-947-2

Versión digital: descarga y online

ISBN 978-987-521-949-6

1. Sistema de Información Geográfica. 2. Productividad. 3. Medio Ambiente. I. Zinda, Roberto II. Zinda, Roberto, comp. III. Farrel, Mauricio, comp. IV. Carreño, Lorena, comp.

CDD 526.0285

Diseño Gráfico

Dis. Gráf. Francisco Etchart

Impresión

Gustavo J. Moyano

Impreso en los talleres gráficos de la EEA INTA Anguil

“Ing. Agr. Guillermo Covas”

Tirada de 500 ejemplares

Octubre de 2018



EDICIONES INTA

Centro Regional La Pampa-San Luis

EEA INTA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”

RN N°5 Km 580, CP 6326, Anguil, La Pampa, Argentina

Lista de autores

En orden alfabético

Adema, Edgardo. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. adema.edgardo@inta.gob.ar

Alvarez, Cristian. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural General Pico. alvarez.cristian@inta.gob.ar

Aumassanne, Carolina. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo. aumassanne.carolina@inta.gob.ar

Avendaño, Walter Saul. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo. avendanio.walter@inta.gob.ar

Babinec, Francisco J. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de La Pampa. babinec.francisco@inta.gob.ar

Bargiano, Pablo. Consultor Externo. cubargiano@hotmail.com

Beget, María Eugenia. INTA. Instituto de Investigación Clima y Agua. beget.maría@inta.gob.ar

Bellini, Yanina. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. bellini.yanina@inta.gob.ar

Belmonte, María Laura. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. belmonte.maría@inta.gob.ar

Butti, Lucas. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural General Acha. butti.lucas@inta.gob.ar

Carreño, Lorena. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. carrenio.lorena@inta.gob.ar

Corro Molas, Andres. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural General Pico. corromolas.andres@inta.gob.ar

Cravero, Walter. Departamento de Física. Universidad Nacional del Sur. wcravero@uns.edu.ar

Di Bella, Carlos. INTA. Instituto de Investigación Clima y Agua. dibella.carlos@inta.gob.ar

Farrell, Mauricio. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. farrell.mauricio@inta.gob.ar

Fontanella, Dardo. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo. fontanella.dardo@inta.gob.ar

Frank, Ernesto. Jubilado investigador INTA. oscar-frank1951@gmail.com

Ghironi, Eugenia. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural General Pico. ghironi.eugenia@inta.gob.ar

Kovac, Federico. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Pampa. kovacf@gmail.com

Lambert, Marie-Julie. Université Catholique de Louvain. ambertmariejulie@gmail.com

Llorens, Enrique. Dirección de Extensión Agropecuaria del Gobierno de la Provincia de La Pampa. pastizalesdelapampa@gmail.com

Mariano, Roberto. CONICET. Facultad de Agro-nomía. Universidad Nacional de La Pampa. mariano.roberto@inta.gob.ar

Martinez Uncal, María Celeste. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa. mcelemu@yahoo.com.ar

Martinez, Daniel. Consultor externo. †

Masseroni, María Lujan. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo. masseroni.maria@inta.gob.ar

Mendoza, Mario. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de La Pampa. mendoza@agro.unlpam.edu.ar

Mieza, Soledad. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Pampa. smieza@ing.unlpam.edu.ar

Montoya, Jorgelina. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. montoya.jorgelina@inta.gob.ar

Oricchio, Patricio. INTA. Instituto de Investigación Clima y Agua. oricchio.patricio@inta.gob.ar

Pérez, María Micaela. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. perez.mariam@inta.gob.ar

Poey, Sol. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural Victorica. poey.sol@inta.gob.ar

Porfiri, Carolina. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. porfiri.carolina@inta.gob.ar

Roberto, Zinda. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. roberto.zinda@inta.gob.ar

Sartor, Paolo. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo. sartor.paolo@inta.gob.ar

Stefanazzi, Ivana. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural Victorica. stefanazzi.ivana@inta.gob.ar

Vazquez, Pablo. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. vazquez.pablo@inta.gob.ar

Viglizzo, Ernesto. CONICET - INCITAP. eviglizzo@gmail.com

Walas, Cristian. Agromax Aviación S.A. cwalas@gmail.com

Zamora, Damian. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Agencia de Extensión Rural 25 de Mayo. zamora.carlos@inta.gob.ar

Prólogo

Disponer de Tecnologías de Información Geográfica, resulta hoy en día casi indispensable para la planificación y gestión territorial debido a sus amplias posibilidades de aplicación. Estas Geotecnologías, incluidas dentro de la disciplina de la “Geomática” permiten representar el mundo real, generando modelos digitales desarrollando cartografías asistidas por computadora, teledetección, sistemas de información geográfica, procesamiento digital de imágenes satelitales y sistemas de posicionamiento global. Es una disciplina que engloba a las Geociencias, con la integración y aplicación de tecnologías de la información y la comunicación, posibilitando la captura, procesamiento, análisis, interpretación, almacenamiento, modelización, aplicación y difusión de información digital georreferenciada, aplicada en diferentes ámbitos del territorio.

La información generada en este libro ha sido desarrollada en el ámbito de la provincia de La Pampa en problemáticas asociadas a los territorios circumscripciones en los proyectos regionales con enfoque territorial (PRET). El abordaje contempla aspectos productivos, medioambientales, cambio climáti-

co y socioeconómico en escalas regionales, locales y prediales utilizando las herramientas propias acordes de resolución. El contenido de este libro es un trabajo conjunto entre profesionales del INTA Anguil, INTA Castellar, UNLPam, UNS, Gobierno de la Provincia de La Pampa y Asesores privados. En el primer capítulo se abordan conceptos de las nuevas tecnologías como SIG, escala, GPS y una discusión de servicios y aplicaciones. En el segundo capítulo se presentan en detalle los casos de estudio referidos al sector agropecuario. Se describen, 8 casos de estudio a nivel predial sobre cultivos por ambientes o sitio específico y 5 casos a nivel local donde se presenta información sobre calidad, uso y monitoreo de agua. Asimismo se revisan, a nivel regional 5 casos sobre estudio, monitoreo y modelado de distintos procesos en la provincia de La Pampa. La aplicación de estas herramientas tendrá un impacto en la toma de decisiones a diversas escalas orientadas al desarrollo sustentable y al ordenamiento territorial.

Dr. Jesús Pérez Fernández

Director de la EEA INTA Anguil

Indice

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN A LAS NUEVAS TECNOLOGIAS

Algunos conceptos

9

11

CAPITULO 2

ESTUDIOS DE CASO EN EL SECTOR AGROPECUARIO

31

Nivel Predial: Caso 1. Uso de sensores remotos para la determinación de la productividad por ambientes del cultivo de alfalfa en el área de regadío de 25 de Mayo, La Pampa

33

Nivel Predial: Caso 2. Control sitio específico de enfermedades en girasol

39

Nivel Predial: Caso 3. Metodología de muestreo para el seguimiento de pasturas y cultivos mediante fotografía digital

47

Nivel Predial: Caso 4. Uso de indices espectrales en la detección de las características de los cultivos en ambientes delimitados por diferentes características edaficas

55

Nivel Predial: Caso 5. Análisis espacio-temporal en la productividad de los cultivos en la Región Semiárida Pampeana

61

Nivel Predial: Caso 6. Efecto de la fertilización nitrogenada sitio-específico de maíz tardío en la Región Semiárida Pampeana

67

Nivel Predial: Caso 7. Uso de la topografía local en la determinación de ambientes intra-lote para agricultura de precisión

73

Nivel Predial: Caso 8. Variabilidad edáfica y su implicancia en la producción del cultivo de alfalfa bajo riego

85

Nivel Local: Caso 1. Calidad de agua para uso ganadero bovino para los departamentos Chalileo y Limay Mahuida (La Pampa)

93

Nivel Local: Caso 2. Sistema de Información Geográfica como base para la gestión y planificación del area bajo riego “El Sauzal”, La Pampa

103

Nivel Local: Caso 3. Monitoreo de campos inundados al noreste de la provincia de La Pampa

109

Nivel Local: Caso 4. Cuenca del Río Colorado en La Pampa: mapas de aptitud de suelos para diferentes cultivos agrícolas

117

Nivel Local: Caso 5. Vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación por plaguicidas en la zona agrícola de la provincia de La Pampa

123

| | |
|--|-----|
| Nivel Regional: Caso 1. Estudio de la cobertura de nieve en la cuenca del Río Colorado mediante información satelital | 129 |
| Nivel Regional: Caso 2. Actualización del mapa digital de fisonomía vegetal de la provincia de La Pampa | 135 |
| Nivel Regional: Caso 3. Mapas digitales de precipitación para la provincia de La Pampa | 143 |
| Nivel Regional: Caso 4. Modelado y predicción de la productividad neta de forraje en el árido-semiárido de la provincia de La Pampa | 153 |
| Nivel Regional: Caso 5. Modelado del proceso de lignificación en la provincia de La Pampa | 161 |

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN A LAS NUEVAS TECNOLOGIAS

ALGUNOS CONCEPTOS

A.A. GEOMATICA

A.A.1. ¿Qué es la Geomática?

Con las nuevas telecomunicaciones, la era espacial y los avances provocados con las tecnologías TICs, en las últimas décadas surge un nuevo campo profesional: “la Tecnología Geoespacial o Ingeniería Geomática”, término ligado a un nuevo concepto en el campo de las ciencias geográficas: “*La Geomática*”.

Se trata de un término formado por la combinación de dos vocablos: “geo” (tierra), y “mática” (informática), que abarca todo lo concerniente a la gestión de la información geográfica mediante la utilización de tecnologías de la información y la comunicación.

El término Geomática surgió en Canadá y fue introducido por Michel Paradis, un agrimensor que quiso ser quien fuera el primero en utilizarlo en un artículo publicado en la revista “*Le géomètre canadien*” en 1981 y, que en abril de 1982 fuera presentado en el Congreso del Centenario de la Asociación Canadiense de Agrimensura, llegando hoy a formar parte de las normas de estandarización ISO. El autor se basó en el concepto de que el creciente potencial de la computación estaba revolucionando los estudios y las ciencias de representación y, que el uso del diseño computarizado era compatible con el tratamiento de grandes cantidades de datos (Montañez Chaparro y Rincón Garzón, 2015).

A.A.1.1. Algunas definiciones

El término Geomática es de origen actual, por lo que su definición no es única y se pueden apreciar

diferentes interpretaciones del mismo. En el presente capítulo se abordarán algunas de las definiciones más difundidas en la actualidad:

a) El Instituto Canadiense de Geomática la define como: un conjunto de actividades que, utilizando un enfoque sistémico, integra los medios para adquirir y manejar datos espaciales requeridos como parte de las actividades científicas, administrativas, legales y técnicas, involucradas en el proceso de producción y gestión de la información (Lencinas, 2011).

b) La Real Academia de Ciencias Exactas, Física y Naturales consensuó en el año 2011 la siguiente definición: “*Ciencia que se ocupa de la gestión de información geográfica mediante la utilización de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. La gestión incluye la adquisición, modelado, tratamiento, almacenamiento, recuperación, análisis, explotación, representación y difusión de la información geográfica. Comprende fundamentalmente las disciplinas de Topografía, Cartografía, Geodesia, Fotogrametría y Teledetección, Sistemas de Información Geográfica e Infraestructura de Datos Espaciales, y está relacionada con cualquier ciencia que suponga el procesamiento de información geográfica.*”

c) El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2010) la reconoce como una disciplina integradora de los conocimientos técnicos y científicos que hacen referencia a la captura, manipulación, análisis y difusión de la información geográfica para que los tomadores de decisiones seleccionen las mejores alternativas en función de los objetivos de sus empresas, organizaciones y, principal-

mente, que apunten al desarrollo del país.

d) El grupo Topoequipos (2013) la define como “una propuesta tecnológica, científica e industrial, encaminada a integrar todas aquellas tecnologías de avanzada, relacionadas con la geografía, cartografía general de la tierra e información espacial (*Topografía, Geodesia, Catastro, Medio Ambiente, SIG, Fotogrametría Digital, Forestal, Sensores Remotos, Mecatrónica, entre otras*), caracterizadas en común, por los procesos de sistematización, automatización y electrónica, que llevan el error humano a su mínima expresión, en la obtención de información y generación de productos”.

Resumiendo, se puede decir que La Geomática es una disciplina que engloba a las Geociencias, con la integración y aplicación de tecnologías de la información y la comunicación, posibilitando la captura, procesamiento, análisis, interpretación, almacenamiento, modelización, aplicación y difusión de información digital georreferenciada, aplicada en diferentes ámbitos del territorio.

A.A.1.2. Áreas de aplicación

La información geográfica juega un papel importante en la actividad del hombre, ya sea de índole ambiental, social, turística, económica o política. Los productos y aplicaciones son tan numerosos como las ciencias y las tecnologías que intervienen en la adquisición, análisis y administración del dato espacial.

La Geomática es una disciplina transversal y multidisciplinaria por naturaleza. Disciplinas como Topografía, Cartografía, Teledetección, Geodesia, SIG y los Sistemas de posicionamiento global (GNSS y GPS), constituyen la Geomática, pero estas disciplinas además se extienden a una amplia variedad de campos y tecnologías como: gestión de base de datos, inteligencia artificial y tecnología de comunicación, entre otras.

Para el desarrollo de un territorio es fundamental un uso eficiente y sustentable de los recursos naturales e infraestructura del mismo. La posibilidad de tener un mejor manejo de los recursos a través de estas tecnologías basado en un único sistema de referencia espacial, con gran cantidad de data geoespacial recopilada y procesada, facilita que puedan ser rápidamente visualizadas, permitiendo extraer

información relevante para el monitoreo, análisis y estudio de una determinada actividad.

Muchas son las áreas que se benefician con la incorporación de estas tecnologías, por ejemplo:

a) Agricultura y Medio Ambiente: la obtención, análisis y gestión de datos georreferenciados permite mejorar las estimaciones de la producción, definir apotreramientos, monitorear el tiempo de recuperación de áreas quemadas o inundadas, evaluar la variabilidad interna en una misma parcela, etc., optimizando así los medios y recursos para mejorar la toma de decisiones. Con los datos recolectados y procesados se pueden realizar modelos matemáticos y predecir futuros cambios, como por ejemplo, el derretimiento de los glaciares, la determinación del volumen de material combustible para identificar áreas susceptibles de sufrir incendios para construir alertas tempranas, etc.

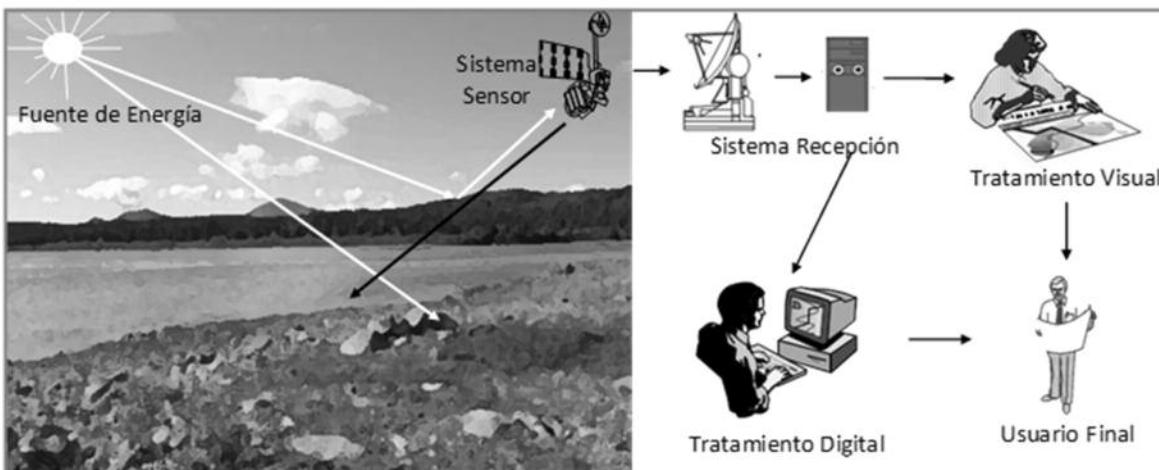
b) Minería: permite la actualización de los mapas de estado, monitorear taludes, mapear grietas en las rocas, etc., información sumamente importante al momento del sondeo y control de la explotación minera.

c) Infraestructura energética: el crecimiento continuo de las poblaciones requiere el trazado de nuevas líneas eléctricas y de gas que, con el uso de la Geomática pueden mejorar las fases de planificación y diseño. En el caso de trabajos de infraestructura energética renovables pueden ser beneficiados con mejores localizaciones de los parques eólicos y/o estaciones solares.

d) Suministro de agua y recolección de residuos: a través de estos sistemas es posible superponer datos topográficos, hidrográficos, urbanísticos y catastrales con información de los servicios de agua, logrando un análisis más sistemático, contribuyendo así a una mejor toma de decisiones.

e) Localizar la infraestructura (centros comerciales, hoteles, hospitales, escuelas, etc.): son sistemas eficientes al momento de determinar la afluencia de paso de la gente, la distancia a los centros turísticos y de transporte, el campo de visualización, etc., permitiendo seleccionar los mejores sitios según los objetivos perseguidos.

En resumen, la Geomática está direccionada a resolver problemas puntuales o globales, contribuyendo a una mejor toma de decisiones, que se verá



Fuente: Adaptado de Chuvieco , 2002

Figura 1: Componentes de un Sistema de Teledetección

reflejada en una mejor calidad de vida y en el uso sustentable de los recursos disponibles. Dicha información podrá ser utilizada a diferentes niveles: Estados Nacionales, Gobiernos Provinciales, Gobiernos Municipales, Instituciones, Profesionales privados u otros.

A.B. TELEDETECCION

A.B.1. Introducción

En los últimos años, el uso creciente de distintos sensores de observación terrestre originó, no solo, una enorme cantidad de información, sino también una nueva forma de ver y estudiar La Tierra. La observación remota y el reconocimiento de las características de la superficie terrestre y de los fenómenos que ocurren en ella a partir de los datos que registra el sensor, son el objetivo principal de la teledetección.

La teledetección espacial es aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, en donde existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o por un haz energético artificial, entre la Tierra y el sensor.

Un sistema de teledetección espacial está formado por diferentes elementos (Figura 1).

- **Fuente de energía:** constituye el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede ser un foco externo a éste, en donde

la fuente más importante es el sol (teledetección pasiva) o, un haz energético emitido por el propio sensor (teledetección activa).

- **Cubierta terrestre:** formada por diferentes masas vegetales, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben una señal energética y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

- **Sistema sensor:** compuesto por el sensor y la plataforma que lo alberga. Este sistema capta la energía procedente de las cubiertas terrestres, la codifica y graba, o la envía directamente al sistema de recepción.

- **Sistema de recepción-comercialización:** se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en formato apropiado y luego de las correcciones necesarias, se la distribuye a los interesados.

- **Intérprete y usuario final:** es aquel que convierte los datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente, permitiendo facilitar el estudio de algún caso en particular (Chuvieco, 2002).

La teledetección integra el desarrollo más reciente de la investigación espacial, la física y la informática, que pone a disposición una importante base de datos con una resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica propia de cada sensor, la cual resulta útil para la gestión de los recursos naturales, la planificación y el desarrollo económico de un determinado lugar. De acuerdo a algunos autores se puede definir la

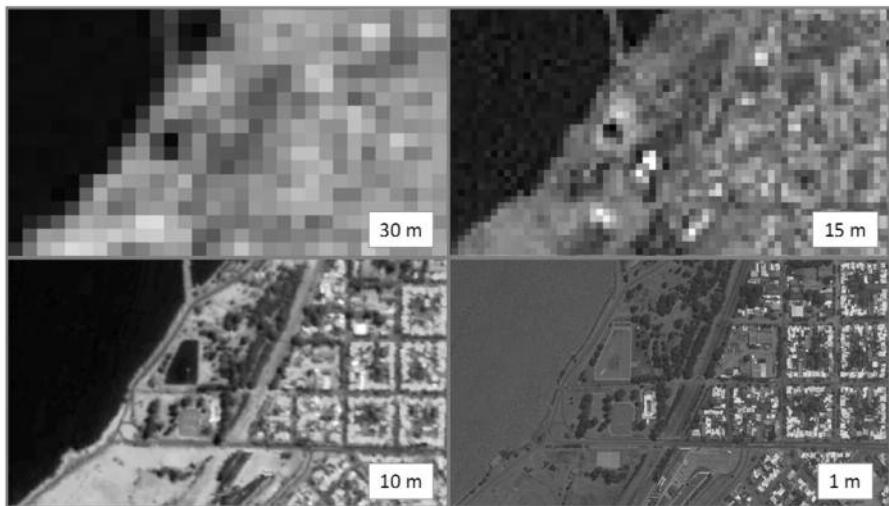
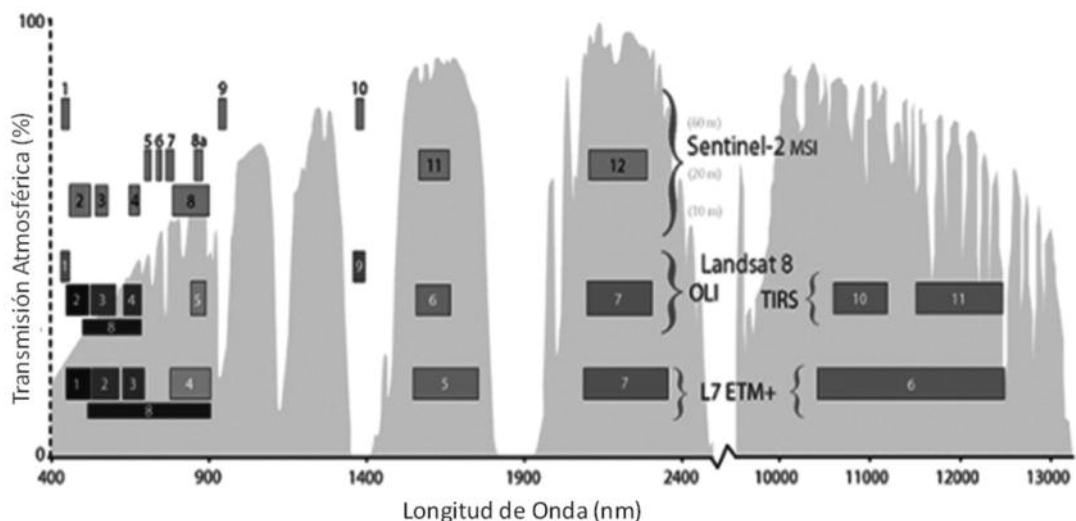


Figura 2: Comparación entre diferentes resoluciones espaciales.



Fuente: Adaptado de <http://www.gisandbeers.com/combinacion-de-imagenes-satelite-landsat-sentinel-rgb/>

Figura 3: Comparación de bandas espectrales entre Landsat 7, 8 y Sentinel-2.

resolución de un sistema sensor como su habilidad para registrar y discriminar información de detalle (Estes y Simonett, 1975). En la práctica, cuando se trabaja con información espacial, es fundamental conocer los cuatro tipos de resoluciones (Chuvieco 2002 y Buzai *et al.* 2006):

- **Resolución espacial:** este término designa al objeto más pequeño que puede ser designado sobre una imagen. Corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, denominado pixel. Esta resolución depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneo y las características óptimas del sensor.

La resolución espacial es variable dependiendo

de cada sensor: Ikonos y Quickbird poseen una resolución de 1 metro; CBERS 2B HRC 2.7 metros; SPOT 20 metros; Landsat 8 LDCM 30 metros, llegando a 5 km para los satélite Meteosat, NOAA y GOES, entre otros (Figura 2 y Tabla 1).

- **Resoluciónpectral:** define el número y ancho de las bandas espectrales que un sensor puede discriminar. Para un rangopectral, un sensor va a ser más eficiente cuanto mayor sea el número de bandas que tenga porque facilitará la caracterizaciónpectral de las distintas cubiertas de interés.

La elección del número, ancho y localización de las bandas en el espectro electromagnético, va a

Tabla 1: Resumen de las resoluciones entre diferentes satélites.

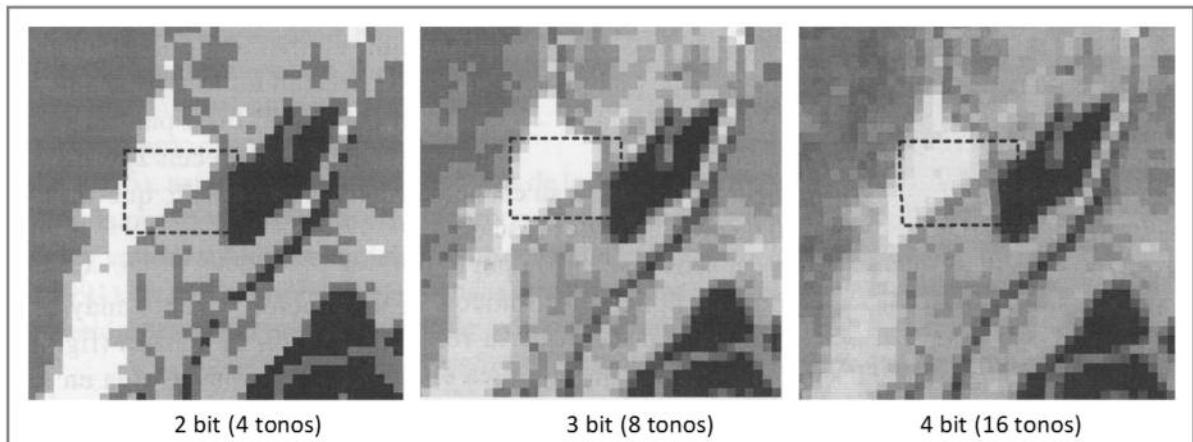
| Satélite | Resolución espectral (μm) | | Resolución espacial (m) | Resolución radiométrica (bits) | Resolución temporal (días) |
|--|--|--|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS) | 1 banda (pancromática) | Visible | 15 | 12 | 16 |
| | 8 bandas | Visible Infrarrojo cercano Infrarrojo medio | 30 | | |
| | 2 bandas | Infrarrojo térmico | 100 | | |
| CBERS 2B High Resolution Camera (HRC) | 1 banda (pancromática) | Visible Infrarrojo cercano | 2,7 | 8 | 130 |
| IKONOS | 1 banda (pancromática) | Visible | 1 | 11/8 | 1 a 3 |
| | 4 bandas | Visible Infrarrojo cercano | 4 | | |
| SAC-C (MMRS) | 5 bandas | Visible Infrarrojo cercano Infrarrojo medio | 175 | 8 | 16 |
| MODIS | 2 bandas | Visible | 250 | alta sensibilidad radiométrica | 1 a 2 |
| | 5 bandas | Infrarrojo cercano | 500 | | |
| | 29 bandas | Infrarrojo medio Infrarrojo térmico | 1000 | | |
| SENTINEL-2 | 4 bandas | Visible Infrarrojo cercano | 10 | 12 | 10(5) |
| | 6 bandas | Infrarrojo cercano Infrarrojo lejano | 20 | | |
| | 3 bandas | Visible Infrarrojo cercano Infrarrojo lejano | 60 | | |

depender de los objetivos propios de cada sensor. En la actualidad, los sensores disponibles ofrecen una gran variedad desde el punto de vista espectral, por ejemplo: Landsat 8 LDCM posee 11 bandas y el satélite MODIS presenta 36 bandas (Figura 3 y Tabla 1).

- **Resolución temporal:** es la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie de la tierra, es decir, es el tiempo de revisita del mismo. En el caso de los satélites meteorológicos como GOES y METEOSAT, la frecuencia de observación es de algunos

minutos (30 minutos) ya que se registra información de fenómenos muy dinámicos que presentan variaciones en cortos períodos de tiempo, mientras que en los satélites que estudian los recursos naturales, la frecuencia es menor, por ejemplo, Landsat: 16 días y SENTINEL-2: 10 días (Tabla 1).

- **Resolución radiométrica:** es la capacidad del sensor para detectar variaciones en la radiación en tonalidades de grises, que se expresa en el número de bits (Figura 4 y Tabla 1). Por ejemplo, Landsat 5 ofrece una imagen de 8 bits (28) equi-



Fuente: Adaptado de Chuvieco , 2002

Figura 4: Ejemplo de resolución radiométrica.

valente a 256 tonos de grises y, MODIS de 12 bits (2¹²), 4096 tonos de grises.

A.C. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

A.C.1. Introducción

La cartografía ha dado un vuelco radical en el plazo de una década, permitiendo nuevas posibilidades y acercando la información cartográfica como herramienta de primer orden a un público amplio y diverso. La información que se maneja, independientemente del tipo de disciplina, está relacionada a La Tierra y a su vez viene acompañada de información adicional relativa a su localización.

Si bien esto no es un hecho novedoso, la situación actual es más favorable para el desarrollo de herramientas que permiten la utilización de toda esa información, al tiempo que se consideran los datos relativos a su posición en el espacio. Esto es así, no solo porque se trabaja con gran cantidad de información referenciada geográficamente, sino porque cada día se sabe más de la importancia de la componente geográfica.

En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son en gran medida, los responsables, pues su contribución dentro del panorama relativo a la geografía ha sido vital para impulsarla y hacerla llegar hasta su lugar actual. En una sociedad, donde la información y la tecnología son dos de los pilares fundamentales, los SIG son, sin lugar a

duda, la tecnología estandarte para el manejo de información geográfica, y los elementos básicos que canalizan la gestión de todo aquello que, de un modo u otro, presente una componente geográfica susceptible de ser aprovechada (Olaya, 2011).

Un SIG puede gestionar información y, hacerlo de forma centralizada. De este modo, se garantiza el rigor y la robustez de los datos base. Esto es de especial importancia en caso de que se editen los datos, ya que esta edición también está centralizada, y un usuario ve reflejarse en su cartografía de forma inmediata, los cambios realizados por otro, teniendo siempre a su disposición la versión más actual y, por lo tanto, más adecuada. A esto puede añadirse la utilización de SIG móviles en dispositivos portátiles, que permiten incorporarlo a las fases de trabajo de campo. Esa misma cartografía centralizada puede ser utilizada por los operarios en el campo a través de sus dispositivos para desarrollar su trabajo, ayudándose además de sistemas de navegación para la localización de las parcelas de un muestreo o de cualquier otro punto de interés al que deban desplazarse.

A.C.2. Pasado y Presente

Los SIG son el resultado de la aplicación de las llamadas Tecnologías de la Información (TI) a la gestión de la Información Geográfica (IG).

A principios de los años 60, la Informática se utilizó para la producción de mapas, dando lugar a la Cartografía Asistida por Ordenador. Un ejemplo de ello fue el SYMAP (Symagraphic Mapping

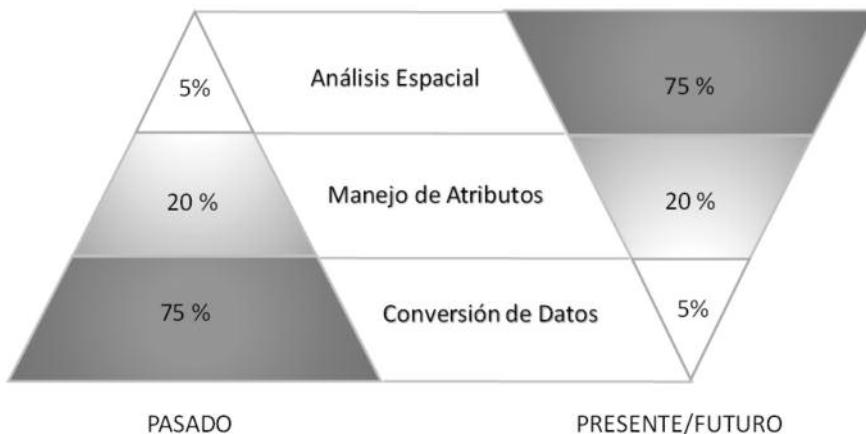


Figura 5: Evolución de los Sistemas de Información Geográfica.

Technique) de la Universidad de Harvard (USA), aplicación pionera, que implicaba un conjunto de programas capaces de producir mapas, superponiendo los caracteres habituales.

El siguiente paso fue aplicar las posibilidades de los métodos automatizados a la interpretación y consulta de la información representada en el mapa (ejemplo de ello es el CGIS - Canadian GIS, desarrollado por Tomlinson en 1964).

Durante la década del 70 y 80 se produjo la explosión de los SIG, con grandes desarrollos y aplicaciones prácticamente en todas las áreas de la actividad humana, que comenzaron como proyectos de representación y análisis de la realidad y que se han orientado progresivamente a la planificación y a la toma de decisiones.

En la primera década del siglo XXI, las aplicaciones SIG han experimentado una gran penetración en la sociedad, gracias a los conceptos de la Web 2.0 plasmados en aplicativos como Google Maps y Google Earth.

En resumen, los cambios sufridos desde sus inicios a la actualidad se pueden ver en la Figura 5, donde se visualiza que en el pasado los SIG tuvieron un mayor énfasis en la conversión de los datos, mientras que actualmente están focalizados principalmente, en su capacidad de análisis.

Por lo tanto, el SIG forma parte de una disciplina en constante expansión, que se basa en los continuos avances tecnológicos para apuntalar su presencia y ampliación en el entorno Web, principalmente el compartimiento de datos geográficos que sustentan su presencia en muchas soluciones tecnológicas que aportan infinidad de productos con gran presencia en Internet.

Desde hace ya algún tiempo, es muy común

visualizar mapas en la Web. Todo esto es posible, gracias a la consolidación de Internet como tecnología globalizadora, a través de la generación de estándares para compartir los datos geográficos y generar una visión del mundo, más interconectado y portátil.

Aportes extraordinarios como el desarrollo de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) y los Geoportales, han abonado el camino, permitiendo una reinvención de los fundamentos de los SIG, para apuntalar su aplicación en términos de migrar el sistema a la “nube”, como una visión lógica y útil, que beneficie su operatividad y prestación de servicios en este mundo cada día más interconectado. Proporciona una infraestructura de datos en línea (online), para elaborar mapas y generar información geográfica de todo tipo, para colocarla a disposición de las organizaciones, comunidad y público en general de forma abierta y libre. Esta nueva visión de los SIG complementa, integra y amplía totalmente, el trabajo de los profesionales dedicados a esta temática.

Esta es una era en donde los datos geográficos crecen exponencialmente y la tendencia es hacia la creación de mapas dinámicos en la Web, que faciliten el análisis y visualización de resultados en un entorno sencillo, pero con disponibilidad de acceso a todos los niveles, no solo de los profesionales que se dedican al estudio de la geografía, sino para el público en general, que está deseoso de aprender haciendo lo que le gusta.

A.C.3. ¿Qué es un SIG?

En función del aspecto que se valore como más importante, se encuentran distintas definiciones for-

males del concepto de SIG. De hecho, podría afirmarse que hay casi tantas definiciones como autores que escriben sobre el mundo de los SIG (Gutiérrez Puebla y Gould, 2014). Dependiendo del contexto en que se utilice, para algunos, los SIG son simplemente el medio para automatizar la producción de mapas, para otros, esta aplicación parece banal en comparación con su complejidad asociada a la solución de problemas geográficos y el soporte a la toma de decisiones (Longley *et al.*, 2005).

Un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA, 1990). Sin duda, se trata de una definición funcionalista en la que se reflejan, aparte de la tecnología, todos aquellos aspectos y partes que conforman un SIG.

Otras definiciones se refieren tan solo al componente tecnológico, sin tener demasiado en cuenta el resto de los elementos. Sería este el caso de la definición de Bracken y Webster (1990) según la cual: “*Un SIG es un tipo especializado de base de datos que se caracteriza por la capacidad de manipular datos geográficos [...] que se pueden representar como imágenes*”.

Según Goodchild (2000), “*los SIG son una tecnología integradora que une varias disciplinas con el objetivo común del análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización, distribución, etc. de información geográfica*”.

Muchas son las definiciones que se pueden encontrar, pero en todas ellas el parámetro común es la componente espacial, es decir, la localización X-Y y su componente temática. Se trata de sistemas capaces de manejar datos y entidades con componente espacial con el objetivo de obtener una modelización gráfica, conceptual y temática del espacio, con fines múltiples.

A.C.4. ¿Qué no es SIG?

Un mapa no es un SIG, es una representación de un conjunto de datos espaciales y, aunque esta representación resulta de enorme importancia, en el entorno de un SIG no es sino un elemento más de una serie de componentes (tales como el software y el hardware). Más aún, un SIG contiene no solo los datos y la representación, sino también las opera-

ciones que pueden hacerse sobre el mapa, que no son ajenas a este, sino partes iguales del sistema.

Entonces ¿cuál es la diferencia esencial entre utilizar este sistema y utilizar por ejemplo, Google Earth o un sistema CAD con capacidad para manejar cartografía? Básicamente, que los SIG permiten realizar análisis espaciales complejos sobre los datos gráficos y/o alfanuméricos en él almacenados. El caballo de batalla de los SIG es ayudar a los responsables de gestión en la toma de decisiones, para lo cual es necesario que los datos que se almacenen sean fiables, cuenten con metadatos válidos y estén debidamente actualizados.

Los SIG y los CAD son herramientas que se han nutrido uno del otro en cuanto a sus funcionalidades. No obstante, existen grandes diferencias entre ellos:

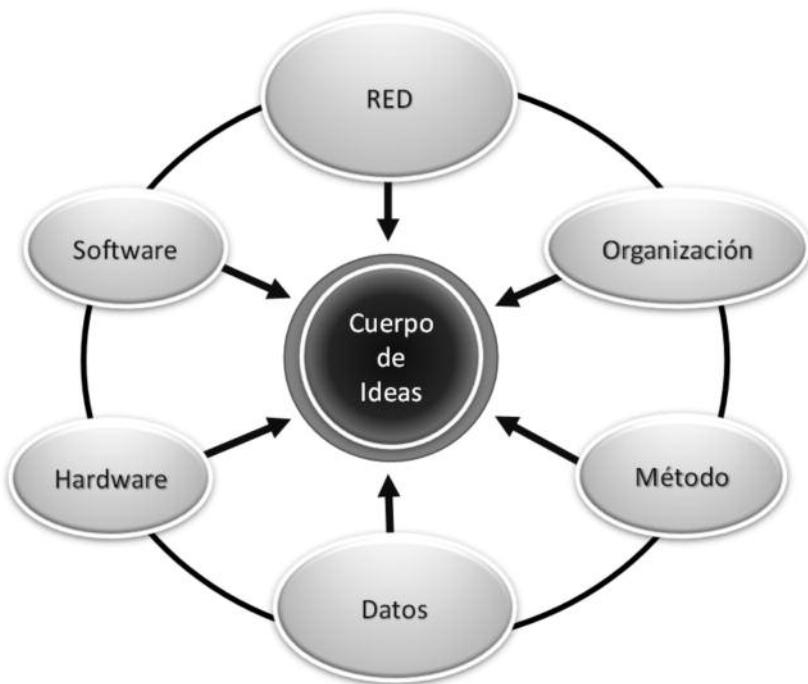
- Han sido diseñados para propósitos diferentes. El del SIG es reflejar la realidad, mientras que el del CAD es diseñar algo que aún no existe. El almacenamiento de datos es diferente debido al distinto enfoque. En los SIG se da mayor peso a la gestión de los datos, mientras que en el CAD la parte visual es preponderante. Un dato SIG se almacena como un dato geográfico complejo, mientras que en un CAD se almacena básicamente como un dibujo.
- El volumen de datos y escala de trabajo en un SIG alcanza dimensiones mayores, mientras un CAD no está pensado para gestionar datos de una superficie como la de un país, un continente o el planeta.
- No todos los tipos de datos de un SIG se pueden incorporar en un CAD, como ser las imágenes satelitales.

Para algunos requerimientos, el CAD no puede ofrecer solución: a) análisis, modelización y gestión avanzada de datos espaciales; b) necesidad de utilizar diversos sistemas de proyección y, c) edición de datos por usuarios de distinto perfil y de modo concurrente.

A.C.5. Componentes de un SIG

Como ya se ha visto, en su concepción actual los SIG son sistemas complejos que integran una serie de distintos elementos interrelacionados. El estudio de todos y cada uno de estos elementos es el fundamento para el estudio global de los Sistemas de

Figura 6: Componentes del Sistema de Información Geográfica (SIG).



Información Geográfica.

Otra forma distinta de ver el sistema SIG es atendiendo a los elementos básicos que lo componen (Figura 6).

1. La **tecnología** es un componente del SIG que viene definido por el software y el hardware. Esto incluye un conjunto de procesos que son la base de un software SIG, que consisten en una serie de algoritmos que sirven para acceder, presentar, analizar y sintetizar los datos almacenados en la base de datos, en función de sus atributos espaciales y no espaciales. El hardware es una plataforma informática con dispositivos periféricos de entrada y salida. Un ordenador es una herramienta con enorme capacidad de cálculo, y esta puede aplicarse a los datos espaciales para obtener resultados de muy diversa índole.

2. Los **datos** son una abstracción de la realidad y se almacenan como códigos digitales en bases de datos. Son necesarios para hacer que el resto de los componentes de un SIG cobren sentido y puedan ejercer su papel en el sistema. La información geográfica, reside en los datos y, es por ello, que el conocimiento exhaustivo de los mismos y su naturaleza resultan necesarios para una buena comprensión. Los procesos que se pueden o no realizar con los datos, dependen de la forma y sus propiedades. Un aspecto clave

para la utilización correcta es saber integrar datos de distintas procedencias.

3. Los **métodos** son procedimientos independientes o normas para llevar a cabo diferentes tareas relacionadas con el diseño, creación y funcionamiento de los SIG. Dentro de las funciones básicas, la capacidad de análisis fue la responsable de su desarrollo. En mayor o menor medida, un SIG siempre incorpora una serie de formulaciones que permiten la obtención de resultados y el análisis de los datos espaciales. Estas formulaciones representan procesos, que pueden ser sumamente sencillos o enormemente complejos, y que pueden resultar de aplicación en uno u otro campo, o incluso con carácter general. Su origen puede ser muy variado, y no derivan necesariamente del ámbito puro de la geografía, sino que pueden ir desde simples consultas o mediciones, a elaborados modelos que empleen datos de variables muy numerosas y arrojen resultados complejos.

4. Un SIG sólo tiene sentido en el contexto de una **organización**. La organización está formada por una gran variedad de componentes, pero se puede definir como el conjunto de objetivos, procesos, gestión, operadores y personal. El factor organizativo ha ido progresivamente ganando importancia dentro del entorno SIG, a medida que la evolución de estos ha ido produciendo un

sistema más complejo y un mayor número de intrarrelaciones e interrelaciones entre los distintos componentes que lo forman.

Hoy en día, la información no se concibe como un elemento privado de cada usuario, sino como un activo que ha de gestionarse, y del que deriva toda una disciplina completa. La aplicación de esta disciplina es la base de algunos de los avances más importantes en la actualidad teniendo, en el ámbito de los SIG, implicaciones ya no solo técnicas, sino también sociales.

5. El cuerpo de ideas que se esconde detrás de los SIG es el conjunto de ciencias y procesos que determinan el avance, desarrollo y uso de los SIG. Dentro del cuerpo de ideas que yace tras el desarrollo del hardware se contempla la ingeniería, las matemáticas y la física. En relación al software, se considera la geomática, el procesamiento de datos, las bases de datos y el análisis espacial, entre otros.

6. La red es considerada cada vez más, un componente fundamental de los SIG, ya que permite comunicar y compartir información de forma rápida y eficaz. Los SIG aparecen con fuerza en las redes, ya sea en Internet o en las intranets de las organizaciones.

A.C.6. ¿Cómo ven el Mundo?

El SIG ofrece una abstracción de la realidad que permite mejorar el conocimiento que se tiene del territorio y poder resolver, así, problemas espaciales complejos.

La primera cuestión es cómo representar de manera digital la información geográfica. Dos cuestiones son importantes en el proceso de esquematizar la realidad para convertirla en el modelo representativo en la base de datos. En primer lugar, se debe tener en cuenta de qué manera se concibe el mundo real y luego, sintetizar los diferentes componentes encontrados. Dicho de otra manera, trata de reproducir el mundo real dentro de un ordenador con una finalidad concreta y por lo tanto, de acuerdo con reglas o criterios definidos. Para ello, la información se torna selectiva, tratando de retener los aspectos de interés para el usuario.

Los SIG observan el mundo real en capas, donde cada capa captura un aspecto determinado de ese mundo.

A.C.6.1. El dato

Un dato geográfico se caracteriza porque:

1. Responde normalmente a tres preguntas:

a) ¿Qué? Hace referencia a las propiedades. Busca encontrar lo que existe en un lugar en especial y ese lugar se puede describir de muchas formas, utilizando por ejemplo el nombre del lugar, el código postal o una referencia geográfica como la latitud y la longitud. Ejemplo: ¿Qué hay en un lugar? ¿Qué rasgos posee un determinado cultivo? ¿Qué tipo de vegetación hay? ¿Qué distribución espacial tiene un fenómeno?

b) ¿Dónde? Hace referencia a su posición geográfica (latitud y longitud). Se trata de encontrar un lugar donde ciertas condiciones son satisfactorias. Ejemplo: ¿En qué área se produjo una helada?

c) ¿Cuándo? ¿Con qué frecuencia? Denota que el dato tiene dinamismo, es decir, presenta una dinámica que permite encontrar las diferencias producidas en un lugar con el transcurrir del tiempo. Por ejemplo: en un tiempo determinado como cambia el uso de la tierra.

2. Presenta tres dimensiones:

a) Espacial: Alude a la localización (coordenadas). La misma se compone por las propiedades espaciales (superficie, perímetro y forma) y por sus relaciones, siendo estas muy variadas, pudiendo ser cuantitativas ó topológicas (cuantitativas). El potencial del SIG va estar dado por la capacidad que tenga de manejar estas relaciones, ya que condicionan la posibilidad de análisis.

b) Variables: Son atributos ligados a cada objeto. Las operaciones a realizar dependerán de cómo son almacenados estos atributos.

c) Temporal: Están referidos a un momento determinado, dan idea del dinamismo que presenta.

La información dentro de un SIG se organiza en base de datos constituidos por dos partes: una gráfica y una numérica (Figura 7).

Un SIG trabaja a la vez con ambos tipos de información: espacial (gráfica) y temática (numérica), y debe ser capaz de integrar, almacenar, editar, anali-

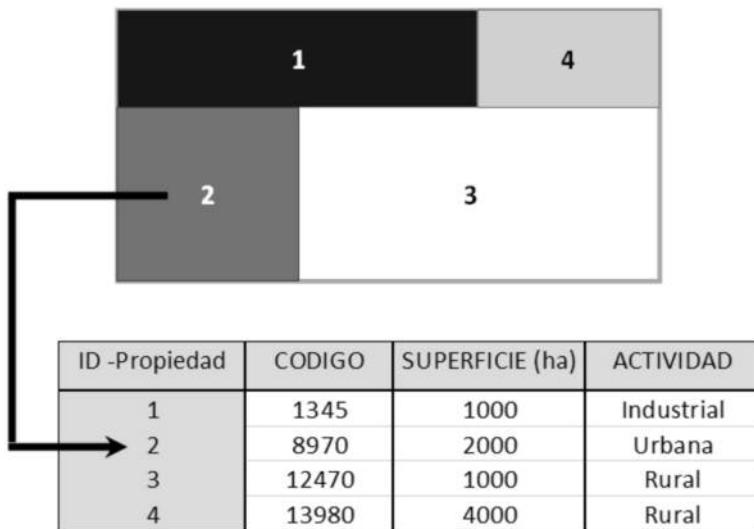


Figura 7: Representación de la información geográfica en un SIG.

zar y compartir los datos, además de presentar los resultados obtenidos. Los SIG gestionan, por tanto, bases de datos gráficos y alfanuméricos vinculadas entre sí e integran funciones típicas de las bases de datos (consultas, análisis estadísticos, etc.) con las propias de la cartografía digital (visualización, análisis geográfico, etc.). Cada elemento gráfico en un SIG, por ejemplo una parcela, está asociado por un identificador común a los atributos que le corresponden (referencia, propietario, tipo, uso, etc.) de forma que accediendo al elemento se localizan sus atributos y viceversa.

Los datos del mundo real dentro del sistema pueden ser representados tradicionalmente de dos maneras: vectorial o raster (Figura 8).

La representación **Raster** se basa en considerar que existen relaciones de vecindad entre los objetos. Consiste en dividir la zona de estudio en una malla regular de pequeñas celdas (pixeles) y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático. Cuanto más pequeña sea la malla, la descripción será más precisa pero la captura de la información y su procesamiento serán más costosos (Figura 9).

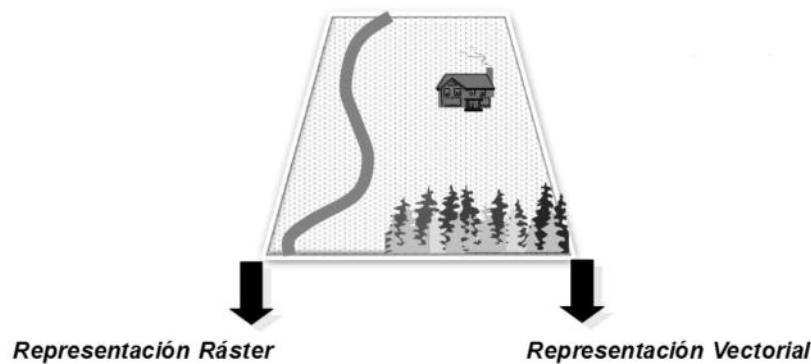
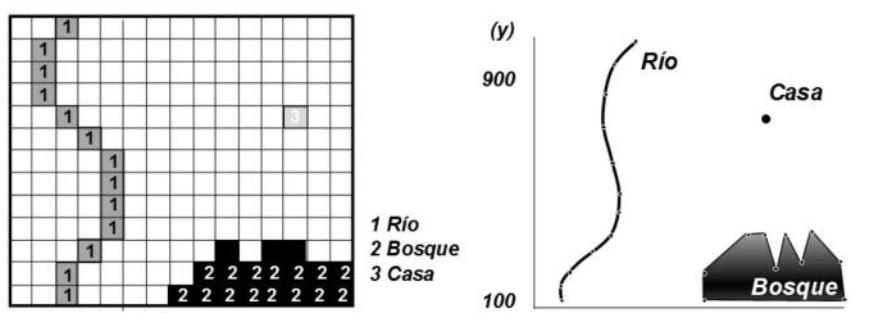


Figura 8: Formas de representar el mundo real en un SIG.



Fuente: Adaptado de Barredo Cano J. (1996)

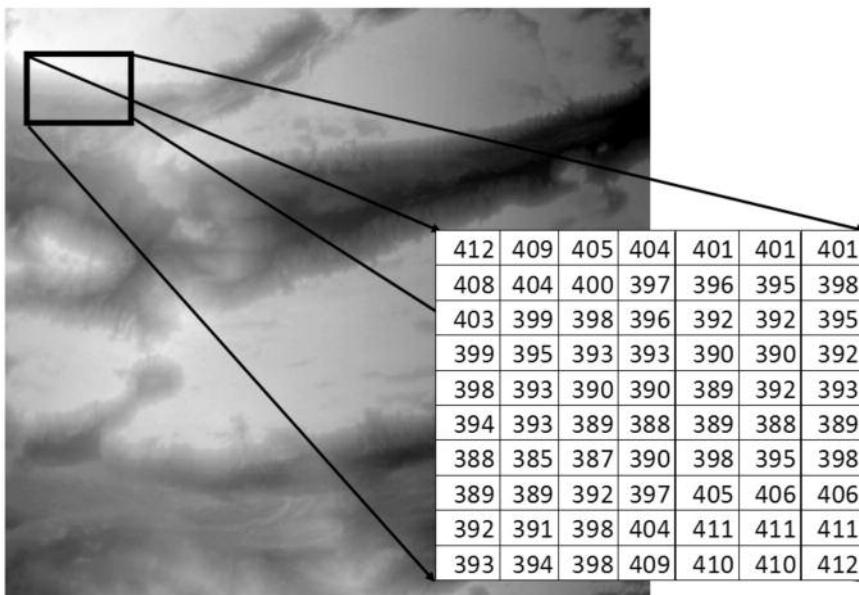


Figura 9: Contenido de información en un modelo raster.

Los datos que constituyen un fichero raster pueden pertenecer a dos tipos generales de variables:

a) **Las variables cuantitativas:** se representarán dentro de un fichero raster como una discretización de una variable continua, donde a cada pixel o tesela se le otorga un valor. Estos ficheros no suelen tener leyenda ya que todos los datos en ellos contenidos se refieren a posibles valores de una variable. Ejemplos de este tipo de variables son la altura, precipitación, temperatura, pendiente, etc.

b) **Las variables cualitativas:** dentro del fichero raster se almacenan como valores numéricos, el significado cuantitativo asignado solamente es para la representación, dicho valor ha perdido todo significado de orden y cantidad. Cada uno de estos valores es asociado a una clase. Estos ficheros suelen tener leyenda, ya que todos los datos en ellos contenidos se refieren a posibles clases de la variable. Ejemplos de este tipo de variables son la litología, vegetación, uso del suelo, tipo de suelo, etc.

En general los objetos con límites difusos son los más adecuados para representarse con este formato.

La representación **Vectorial** utiliza vectores definidos por pares de coordenadas relativas a un sistema cartográfico para representar los objetos. Esta forma es adecuada cuando los objetos con que se trabaja tienen límites bien establecidos.

El modelo vectorial constituye una codificación de los datos geográficos en la que se representa una variable geográfica por su geometría, independientemente de su escala y, son almacenados con un formato digital fácilmente convertible en un dibujo. Las porciones del territorio y su representación digital suelen constituir una lista de coordenadas de puntos y vértices que definen la geometría de los elementos. Su codificación se realiza a través de una base de datos de tipo relacional asociada a la representación gráfica. Los elementos representados pueden ser independientes de la escala, si bien a escalas diferentes son representados por objetos distintos (Ejemplo: una ciudad a escala 1:1.000.000 es representada por un punto, mientras que a escala 1:100.000 por un polígono).

Los objetos del mundo real son representados por puntos, líneas o polígonos, donde un par de coordenadas y su altitud definen un punto, dos puntos definen una línea y una agrupación de líneas, un polígono. En este formato se establecen relaciones espaciales basadas en una topología arco-nodo, definida por la direccionalidad, la conectividad y la proximidad (Figura 10).

Actualmente en los SIG se plantea un cambio en la concepción de la estructura de datos, conocida como “orientado a Objetos”. La información se organiza a partir del propio objeto geográfico y sus relaciones con otros. Los objetos están sujetos a procesos y se agrupan en clases entre las cuales sus características son heredadas. Es el más aconsejable

| PRIMITIVA | ENTIDAD ESPACIAL | REPRESENTACION | ATRIBUTOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|--|--|-----------------|---------------|---------|------|------|--------|-----|-----|--------|---|---|-----------|---|---|--------|---|---|-----------|
| Puntos | | | <table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th><th>Altura (m)</th><th>Especie</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>8</td><td>Calden</td></tr> <tr> <td>2</td><td>6</td><td>Calden</td></tr> <tr> <td>3</td><td>3</td><td>Algarrobo</td></tr> <tr> <td>4</td><td>8</td><td>Calden</td></tr> <tr> <td>5</td><td>5</td><td>Algarrobo</td></tr> </tbody> </table> | ID | Altura (m) | Especie | 1 | 8 | Calden | 2 | 6 | Calden | 3 | 3 | Algarrobo | 4 | 8 | Calden | 5 | 5 | Algarrobo |
| ID | Altura (m) | Especie | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 8 | Calden | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 6 | Calden | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 3 | Algarrobo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 8 | Calden | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 5 | Algarrobo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | <table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th><th>Longitud (m)</th><th>Ancho (m)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>1786</td><td>45</td></tr> <tr> <td>2</td><td>411</td><td>104</td></tr> </tbody> </table> | ID | Longitud (m) | Ancho (m) | 1 | 1786 | 45 | 2 | 411 | 104 | | | | | | | | | | |
| ID | Longitud (m) | Ancho (m) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1786 | 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 411 | 104 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | <table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th><th>Superficie (ha)</th><th>Perímetro (m)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>63.4</td><td>3217</td></tr> </tbody> </table> | ID | Superficie (ha) | Perímetro (m) | 1 | 63.4 | 3217 | | | | | | | | | | | | | |
| ID | Superficie (ha) | Perímetro (m) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 63.4 | 3217 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Adaptado de Víctor Olaya (2011)

Figura 10: Contenido y forma de la información en un modelo vectorial.

ble que cualquiera de los otros dos (raster y vectorial) pero es muy difícil de implementar.

A.D. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

A.D.1. ¿Qué es el GPS y cómo funciona?

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés: Global Positioning System) es un sistema de radionavegación de los Estados Unidos de América, que proporciona servicios fiables de posicionamiento, navegación y cronometría gratuita e ininterrumpida a usuarios en todo el mundo. A todo aquel que cuente con un receptor de GPS, el sistema le brindará su localización y la hora exacta en cualquier condición atmosférica, hora del día y lugar del mundo (Official U.S, 2017).

El GPS consta de tres elementos:

- a) Los satélites en órbita alrededor de la Tierra.
- b) Las estaciones terrestres de seguimiento y control.
- c) Los receptores del GPS, propiedad del usuario.

Desde el espacio, los satélites del GPS transmiten señales que reciben e identifican a sus receptores; ellos, a su vez, proporcionan sus coordenadas tridimensionales de latitud, longitud y altitud, así como la hora local precisa. Esto permite al usuario determinar con exactitud su ubicación y desplazarse fácilmente al lugar que deseé.

Hoy en día, el GPS es indispensable en todos los sistemas de transporte del mundo ya que sirven de apoyo a la navegación aérea, terrestre y marítima. Los servicios de emergencia y socorro en casos de desastre dependen del GPS para la localización y coordinación de misiones de rescate. Actividades cotidianas como operaciones bancarias, de telefonía móvil e incluso de redes de distribución eléctrica, son más eficientes gracias a la exactitud cronométrica que proporciona el GPS. Agricultores, topógrafos, geólogos e innumerables usuarios trabajan de forma más precisa, segura y económica gracias a las señales accesibles y gratuitas del GPS.

El GPS está constituido por tres segmentos (Figura 11):

- a) **Segmento espacial:** Consiste en una constelación nominal formada por 24 satélites operativos que transmiten señales unidireccionales que proporcionan la posición y hora de cada satélite



Figura 11. Segmentos del Sistema de Posicionamiento Global: a) sistema espacial: constelación nominal de 24 satélites operativos, b) sistema control: estaciones de seguimiento y control distribuidas por todo el mundo y, c) sistema usuario: equipo receptor del GPS que recibe las señales de los satélites. Fuente: adaptado de Official U.S. Government (2017). En: <http://www.gps.gov/systems/gps/>

del GPS.

b) Segmento de control: Está formado por estaciones de seguimiento y control distribuidas por todo el mundo a fin de mantener los satélites en la órbita apropiada, mediante maniobras de mando y ajuste de los relojes satelitales. También realizan el seguimiento de los satélites del GPS, cargan información de navegación actualizada y garantizan el funcionamiento adecuado de la constelación de satélites.

c) Segmento del usuario: Consiste en el equipo receptor que recibe las señales de los satélites del GPS y las procesa para calcular la posición tridimensional y la hora precisa.

La Fuerza Aérea de los Estados Unidos desarrolla, mantiene y opera los segmentos espacial y de control.

A.D.2. Servicios y Aplicaciones del GPS

Los satélites del GPS proporcionan servicios a usuarios civiles y militares. El servicio a civiles es gratuito y está a disposición de manera permanente y global. El servicio militar se presta a las fuerzas armadas de los Estados Unidos, sus aliados y los organismos de gobierno debidamente autorizados.

La índole gratuita, interrumpida y fiable del GPS ha permitido a los usuarios de todo el mundo desarrollar cientos de aplicaciones que afectan casi todas las facetas de la vida moderna. Las aplicaciones que se describen en el presente capítulo son sólo algunos ejemplos de las innumerables prestaciones del GPS:

a) Agricultura: la combinación del GPS con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha hecho posible el desarrollo y aplicación de la agricultura de precisión o de localización específica. Esta tecnología facilita acoplar datos obtenidos en tiempo real con información sobre posicionamiento, lo que permite un análisis y manejo eficiente de gran cantidad de datos geoespaciales. Así, es posible aplicar insumos (por ej., plaguicidas, herbicidas y fertilizantes) con mayor precisión y controlar la dispersión de estas sustancias químicas. La adopción de esta tecnología reduce gastos, aumenta rendimientos y genera una actividad agrícola de menor impacto ambiental.

b) Aviación: con su precisión, continuidad y cobertura global, el GPS ofrece servicios de navegación por satélite sin obstáculos que satisfacen muchos de los requisitos de los usuarios de la aviación. El posicionamiento y la navegación permiten la determinación tridimensional de la posición para todas las fases, desde el despegue, el vuelo en ruta y el aterrizaje, hasta el movimiento sobre la superficie del aeropuerto.

c) Carreteras y Autopistas: la disponibilidad y precisión del GPS resulta en mayor eficiencia y seguridad para los vehículos en autopistas, calles y sistemas de transporte público de todo el mundo. Muchos problemas asociados con la asignación de rutas y el despacho de vehículos comerciales se reducen, e incluso se eliminan, gracias a la ayuda del GPS. Así sucede también con la gestión de los sistemas de transporte público, el personal de mantenimiento de las

carreteras y la operación de los vehículos de emergencia. La utilización de tecnología GPS para localizar envíos y predecir el movimiento de la carga también ha revolucionado el mundo de la logística. Otro uso es en la inspección del estado de las redes de carreteras y autopistas mediante la identificación de, por ej., gasolineras, servicios de mantenimiento y de emergencias, rampas de entrada y salida, etc. El GPS constituye un elemento esencial en el futuro de los sistemas inteligentes de transporte (ITS), los cuales abarcan una amplia gama de tecnologías electrónicas y de información basadas en las comunicaciones.

d) Medio Ambiente: para crear un equilibrio entre la preservación del medio ambiente y la satisfacción de las necesidades humanas, es menester contribuir con información actualizada a la formulación de decisiones. Los sistemas de acopio de datos proporcionan información descriptiva y datos de posicionamiento exacto de personas, animales y objetos. La vinculación de esta información con otros tipos de datos permite analizar muchos problemas ambientales desde una nueva perspectiva. Los datos de posicionamiento obtenidos con el GPS pueden incorporarse a SIG, lo que permite el análisis simultáneo de aspectos espaciales y otros tipos de información. Algunos ejemplos de su utilización son: estudios remotos en zonas impenetrables, cambios temporales en los recursos naturales, seguimiento y monitoreo de derrames de petróleo, seguimiento de rutas de aves migratorias, etc.

e) Navegación Marítima: el GPS ha transformado la forma en que el mundo funciona. El mejor ejemplo de ello son las operaciones marítimas, especialmente de búsqueda y rescate. Este proporciona el método más rápido y preciso para navegar, medir la velocidad y determinar la posición en todo el mundo con mayor seguridad y eficiencia. La necesidad de contar con datos de posicionamiento exactos es aún más crítica en las llegadas o salidas del puerto, donde el tráfico de naves hace difícil la maniobrabilidad, aumentando el riesgo de accidentes. Marineros y oceanógrafos están empleando con más frecuencia información obtenida con GPS para topografía submarina, colocación de boyas y localización de peligros para la navegación y su señalamiento en cartas náuticas. Las flotas de pesca comercial

utilizan GPS para llegar a los mejores bancos de pesca, seguir los movimientos migratorios de los peces y garantizar el cumplimiento de los reglamentos.

f) Topografía y Cartografía: hoy en día, el GPS es parte vital de las actividades topográficas y cartográficas en todo el mundo, otorgando datos de muy alta precisión. La recopilación de datos basados en GPS es mucho más rápida que las técnicas convencionales reduciendo la cantidad de equipos y la mano de obra requerida. Los agrimensores y cartógrafos pueden llevar los sistemas GPS en una mochila o montarlos en vehículos para recopilar datos con precisión y rapidez. Además, las superficies medidas con GPS se pueden observar en mapas y SIG que almacenan, manipulan y visualizan los datos geográficos referenciados.

A.E. IDE

A.E.1. Introducción

Las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) son en la actualidad el elemento básico para el aprovechamiento de la información geográfica a nivel global, provocando un cambio conceptual en el ámbito del SIG (Banchero, 2014).

Trabajar con los SIG implica la realización de actividades en equipos con capacidades técnicas específicas, aplicados a una temática u objetivo común. En este proceso hay elementos organizativos, funcionales y humanos que entran en juego a la hora de organizar el trabajo y generar un ámbito donde se permita el acceso, de manera fácil, cómoda, eficaz, confiable y a bajo costo, de los datos geográficos existentes. Siendo la información geográfica un recurso de costosa producción y de difícil acceso (formatos, modelos, políticas de distribución, falta de información), una IDE tiene como objetivo la minimización de los efectos negativos de distribución y uso de información georeferenciada (IDERA, 2014).

A.E.2. ¿Qué es una IDE?

Existen diversas definiciones de IDE, una de ellas declara que es un conjunto de datos espaciales, tecnologías, normas y planes institucionales, todos



Figura 12:
Conceptualización de una
IDE.

Fuente: Adaptado de Banchero (2014)

ellos encaminados a facilitar la disponibilidad y el acceso a dichos datos.

La Figura 12 esquematiza una IDE, con cuatro elementos básicos: a) Políticas; b) Recursos tecnológicos, dentro de los cuales se pueden encontrar catálogos, aplicaciones, servidores, programas y sitios web; c) Procedimientos y, d) Estándares aceptados internacionalmente y que se utilizan para permitir la interoperabilidad a nivel técnico. En ese conjunto de recursos existen normas como las ISO (http://www.isotc211.org/pow_all.htm) (19115, 19139, 19106, 19104, 18026, 17572, 91134, 32557, ISO/TC 211), interfaces, especificaciones y protocolos del Open Geospatial Consortium (OGC) (<http://www.opengeospatial.org/>) y del World Wide Web Consortium (W3C) (<http://www.w3.org/>), como Web Map Services (WMS), Web Feature Services (WFS), Web Coverage Services (WCS) y Catalog Services for the Web (CSW), entre otros. Las políticas y procedimientos apuntan al ordenamiento, coordinación y alineación hacia los objetivos de aquellos elementos no técnicos, sino más organizativos, sociales y políticos como el trabajo de varios grupos y disciplinas diferentes, el trabajo distribuido y colaborativo interno y entre diferentes organi-

zaciones.

Existen diferentes roles y tipo de usuarios en una IDE. Según Víctor Olaya (2011), se distinguen siete usuarios diferentes, los cuales a medida que aumenta la especialización en el conocimiento, disminuyen en número. Estos usuarios se pueden agrupar de la siguiente manera:

a) Vinculados a la gestión de la IDE:

- Usuario administrador: administración y soporte técnico.
- Usuario gestor: mantenimiento de servicios.
- Usuario editor: mantenimiento de datos espaciales.

b) Relacionados a como explotan la IDE:

- Usuario consultor: acceso a datos temáticos restringidos.
- Usuario de negocio: integración de los datos espaciales a aplicaciones externas a la IDE.
- Usuario básico: acceso a funcionalidades simples predefinidas.
- Usuario avanzado: análisis y consultas espaciales complejas.

A.E.3. ¿Cómo funciona?

Desde el punto de vista tecnológico una IDE tiene una arquitectura cliente/servidor. Este modelo de aplicación distribuida tiene dos componentes: los servidores, que proveen recursos (ej: los datos) o servicios (ej: una consulta espacial) y, los clientes quienes demandan y usan estos recursos y servicios. Esta demanda se suele realizar por medio de un software específico, de forma remota utilizando una red de computadoras.

Para que la IDE sea aprovechada por la mayor cantidad de usuarios posibles, debe poder interoprar; entendiéndose por interoperatividad la condición mediante la cual sistemas heterogéneos pueden intercambiar procesos o datos, con neutralidad tecnológica, o sea, que pueden realizar estos intercambios de forma independiente del sistema operativo, programa, versión del programa, hardware, etc., de los equipos involucrados en la comunicación.

Hoy en día la mayoría de los intercambios de información se realizan a través de la red de Internet y las IDE, no escapan a esta regla. Aprovechan la red mundial y hacen uso de servicios web específicos para poner a disposición sus datos geográficos.

A.E.4. ¿Qué es un servicio Web?

Un servicio Web es un conjunto de protocolos y estándares que sirven para intercambiar datos entre aplicaciones, o sea de una máquina a otra máquina. Los servicios Web para datos geográficos son:

- **Web Map Services – WMS:** es un servicio Web que genera mapas en forma dinámica en diferentes formatos de imagen. Este servicio devuelve al cliente demandante de la información datos raster, sin importar si la fuente de datos era vectorial o raster.
- **Web Feature Services – WFS:** es un estándar creado por el Open Geospatial Consortium (OGC) para crear, modificar e intercambiar información en formato vectorial (puntos, líneas y polígonos).
- **Web Coverage Services – WCS:** define una interfaz estándar y operaciones que permiten acceso interoperable a capas de grillas. Sirve para representar contenidos de imágenes satelitales, fotografías aéreas, modelos de elevación,

etc., permitiendo la consulta de los valores por píxeles.

- **Catalog Services for the Web – CSW:** es un estándar de interfaz. Especifica un patrón de diseño para la definición de interfaces para la publicación y búsqueda de colecciones de información descriptiva (metadatos) sobre datos geoespaciales, servicios y objetos de información relacionada.

A.E.5. Implementando una IDE

En Argentina existe IDERA, la Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina. Es una comunidad de información geoespacial que tiene como objetivo propiciar la publicación de datos, productos y servicios, de manera eficiente y oportuna como un aporte fundamental a la democratización del acceso de la información producida por el Estado y diversos actores, y al apoyo en la toma de decisiones en las diferentes actividades de los ámbitos público, privado, académico, no gubernamental y sociedad civil.

A través de su representación, IDERA busca mantener un carácter nacional y federal. Está en marcha desde el año 2007, acorde con las políticas instaladas en materia de Gobierno Electrónico y libre acceso a la información, propias de un Estado moderno. “La Información Geográfica es un bien público y, su acceso y uso, debe ser considerado como un servicio público” (IDERA, 2017). Durante el 2016, la provincia de La Pampa adhirió a IDERA, con el mandato de generar la IDE de la provincia, siendo la dirección de Catastro la responsable de esta tarea.

El INTA cuenta con su propia IDE llamada GeoINTA, implementada desde el 2006, siendo La Estación Experimental Agropecuaria Anguil uno de los tres nodos iniciales. Actualmente cuenta con 11 nodos y se puede acceder desde el sitio <http://www.geointa.inta.gob.ar/ide/> (Banchero et. al., 2016). Para la provincia de La Pampa se han publicado más de 80 capas de información, cuatro proyectos y 23 capas temáticas para descarga.

En el año 2016, el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional de La Pampa presentó su IDE, a partir de la cual se puede acceder a la información generada desde el sitio: <http://www.humanas.unlpam.edu.ar/wordpress/igeografia/ide-la-pampa/>.

A.F. ESCALA

A.F.1. Introducción

Basar la toma de decisiones en un conocimiento del territorio puede evitar errores, que conducirían a un uso inadecuado del mismo, aumentando los costos con el riesgo de degradación del medio, al producir impactos ambientales no deseados o la ocupación irreversible de determinadas tierras de interés para su producción o para otros usos.

Un mapa es una representación plana, simplificada, de un determinado territorio. Al elaborar un mapa, se identifican, se definen, describen y se delinean las unidades obtenidas, con el fin de poder tomar decisiones sobre ellos. Esta representación se ejecuta guardando una relación con respecto al objeto representado, dicha relación o proporción es la que se denomina “escala” de mapa (Abdón y Dimas, 1983).

La escala se calcula comparando una distancia sobre el mapa, con su correspondiente en el terreno:

$$E = \text{Distancia Mapa} / \text{Distancia en el terreno}$$

Es uno de los elementos más importantes en la cartografía porque está relacionada directa o indirectamente con el contenido del mapa, sus dimensiones y precisión, lo mismo que con el tipo de levantamiento, sus especificaciones y el grado de desarrollo de la región a cartografiar, el costo del estudio y el tipo de interpretación multidisciplinarias que pueden hacerse en base a los datos registrados.

El grado de desarrollo de una región, el tamaño

del área a mapear, el costo del estudio, son parámetros que van hacer afectados por la escala de trabajo. Los levantamientos de escala grande (1:5000 a 1:20000) se realizan en zonas relativamente pequeñas, los de semidetalle en sectores mayores (1:50000 a 1:100000) y, los generales en regiones que comprenden varios municipios, departamentos, etc. (1:300000; 1:500000 o más).

La calidad de un mapa depende fundamentalmente de la densidad de observaciones por unidad de área. El tipo de levantamiento está condicionado al número de observaciones a realizar (Tabla 2).

La escala condiciona el tamaño real de la superficie mínima representada en un mapa, es decir, la unidad cartográfica de base para que pueda ser legible (5x5 mm) (Nieves, et al., 1985) (Tabla 3).

Toda aquella superficie que tenga una representación menor que la unidad cartográfica mínima no será representada, constituyendo una impureza dentro del mapa.

Para que el mapa sea consistente, cuanto mayor sea la escala, mayor será el número de observaciones a realizar en el campo.

Se suele aceptar una densidad de 0.5 observaciones/cm² de mapa. Densidades mayores suelen resultar prohibitivas desde el punto de vista económico.

A.F.1.2. Criterios para evaluar la calidad de un mapa

La leyenda de un mapa, puede convertirlo en un documento para expertos, por la terminología utilizada o bien en información fácilmente accesible al ser mucho más explicativa.

| TIPO | ESCALA | DENSIDAD DE OBSERVACIONES |
|----------------|---------------------|---------------------------|
| LEVANTAMIENTO | | X 100 ha |
| Detallado | <1:20000 | 50 - 200 |
| Semidetallado | 1:20000 a 1:50000 | 5 - 10 |
| Reconocimiento | 1:50000 a 1:100000 | 1 |
| Esquemático | 1:100000 a 1:500000 | 0,2 - 1 |

Tabla 2: Densidad de observaciones según la escala del mapa a realizar.

Fuente: adaptado de Abdón y Dimas (1983)

| ESCALA | DENOMINACION | UNIDAD CARTOGRAFICA MINIMA |
|----------------------------|--------------|----------------------------|
| | | (5x5 mm) |
| 1:500000 | Muy pequeña | 625 has |
| 1:100000 a 1:500000 | Pequeña | 25 - 625 has |
| 1:25000 a 1:100000 | Mediana | 1.5 - 25 has |
| 1:10000 a 1:25000 | Grande | 0.25 - 1.5 has |
| 1: 5000 a 1:10000 | Muy grande | 0.06 - 0.25 has |

Fuente: Adaptado de Nieves et al. (1985)

Tabla 3: Unidad cartográfica mínima a representar según la escala del mapa.

En mapa de calidad, si su escala es la adecuada se podrán derivar mapas para fines específicos, para usuarios concretos, sin que ello represente un costo adicional importante.

Los mapas deben ser fáciles de utilizar, por lo que se deben cuidar ciertos aspectos de calidad, como:

- a) PRECISION:** depende del error gráfico en la localización de las unidades cartográficas en el mapa. La precisión aumenta al hacerlo la escala, si bien depende de la fiabilidad en el establecimiento de los límites entre unidades.
- b) EXPRESION:** presentación adecuada de la información. Depende de los símbolos, colores, tramas y signos que deben seleccionarse adecuadamente. El mapa siempre debe ser “*agradable*”.
- c) LEGIBILIDAD:** facilidad con que se percibe la información. Un exceso de información puede dificultar su lectura. El mapa siempre debe ser “*claro*”. El manejo del color es de suma importancia.
- d) EFICACIA:** el mapa debe ser “*útil, completo y veraz*”.
- e) LEYENDA:** presenta de forma organizada las unidades cartografiadas. Debe ser “*corta y comprensible*”. La leyenda puede incluir indicaciones sobre las fuentes de documentación, método de trabajo y precisión.

En los capítulos siguientes se presentan distintos trabajos donde profesionales de diversas instituciones aplicaron el uso de la teledetección y los sistemas de información geográfica en la resolución de

problemas a distinta escala de abordaje. Los mismos fueron ordenados de la escala de mayor detalle a la de menor, quedando de la siguiente manera: a) escala predial (establecimiento o lote), b) escala local (departamento de una provincia, sector de una cuenca) y, c) escala regional (cuenca, provincia). De esta manera queda plasmada la gran variedad de temáticas que pueden ser abordadas con estas tecnologías, cada una con una escala determinada de trabajo asociada.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdón, C. y Dimas, M. (1983). “Los levantamientos de suelos y sus aplicaciones multidisciplinarias”. Serie: Suelo y Clima. Material de enseñanza. SC-58. Centro Interamericano de Desarrollo de Aguas y Tierras. Medina. Venezuela. Pp. 399.
- Barredo Cano, Jose I, (1996). “Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en el ordenamiento del territorio. Ed. RA-MA Madrid, Pp. 261.
- Banchero, S. (2014) “GeoINTA y las IDE. Material de capacitación sobre GEOINTA”. Ediciones INTA.
- Banchero, S., Bellini Saibene, Y. (2016). “GeoINTA: compartiendo datos por medio de la Infraestructura de Datos Espaciales del INTA” (129-138). Contribuciones SIE 2016. 6 al 8 de Septiembre de 2016. ISSN: 2451-7534.
- Bracken, I. y Webster, C. (1990) Information technology in geography and planning: including principles of Geographic Information Systems. Londres y Nueva York: Routledge. En: http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/7581/08_TIG_03_sitjar.pdf
- Buzai, G. D. y Baxendale, C. A. (2006). “Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica” Ed.

Lugar. Buenos Aires. Pp. 186-187. ISBN: 950-892-264-8

- Chuvieco Salinero, E. (2002). “Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio”. Ed. Ariel. Barcelona, España. Pp. 584. ISBN: 84-344-8047-6
 - Estes, J. E. y Simonett, D. S. (1975). “Fundamentals of image interpretation”, en R. G. Reeves (ed.), Manual of Remote Sensing, Falls Church, American Society of Photogrammetry. Pp. 869-1076.
 - Goodchild, M. (2000). “Geographic information system”. In A. Ralston, E.D. Reilly, and D. Hemmendinger, editors, Encyclopedia of Computer Science. Fourth Edition. London: Nature Publishing Group, pp. 748–749.
 - Gutiérrez Puebla, J. y Gould, M. (2014). “SIG, Sistema de Información Geográfica”. Ed. Síntesis. España. ISBN: 9788477382461. Pp. 352. En: <https://www.casadellibro.com/libro-sig-sistema-de-informacion-geografica/9788477382461/468925>
 - “IDERA - Base de Conocimiento [Web]”. (2014). Accedido Mayo 23. En: <http://www.idera.gob.ar/index.php>
 - “IDERA - ¿Qué es IDERA?” (2017). Accedido agosto 28. http://www.idera.gob.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=242&Itemid=203.
 - Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC. (2010). La Geomática. Edición Nº 47. Revista Análisis Geográfico, 1-10.
 - Lencinas, J. (2011). “Tecnología Geomática para la Evaluación de Bosques Nativos en Patagonia”. CIEFAP - Serie Ciencia y Tecnología - Nº 1. Octubre de 2011. Esquel Argentina. Pp. 60. ISBN 978-987-27572-0-5.
 - Longley, P. Goodchild, M., Maguire, D., Rhind, D. (2005). “Geographic information systems and science”. John Wiley & Sons, Ltd. Barcelona. Pp. 519. ISBN: 0-470-87000-1 (HB) - ISBN: 0-470-87001-X (PB).
 - Montañez Chaparro, F. y Rincón Garzón, J. (2015). “La Geomática: definición, características, objeto y método de estudio. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Pp. 117.
 - Nieves, M. Forcada, R. y Goméz, V. (1985). “Precisión, escala y densidad de observaciones en los estudios de suelos. Bol. Est. Central de Ecología. Nº 27. MAPA
 - Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. 2017. En: <http://www.gps.gov/systems/gps/>
 - Olaya, V. (2011). Sistemas de Información Geográfica. Libro SIG. Pp.887.
 - Topoequipos (2013). Soluciones integrales en Geomática. Bogotá. En: <http://topoequipos.com/colombia/index.php/14-roksprocket-tabs>
-

CAPÍTULO



ESTUDIOS DE CASO EN EL SECTOR AGROPECUARIO

Uso de sensores remotos para la determinación de la productividad por ambientes del cultivo de alfalfa en el área de regadío de 25 de Mayo, La Pampa

RESUMEN

En los sistemas de producción intensivos bajo riego, conocer los diferentes ambientes productivos dentro del lote (heterogeneidad ambiental) posibilita un manejo diferencial. Esta heterogeneidad se ve reflejada en diferentes parámetros de producción como altura de planta, rendimiento de materia seca, entre otros. El presente trabajo tiene como objetivo establecer relaciones entre los parámetros de producción (altura y materia seca) con índice de vegetación (NDVI) en cultivos de alfalfa bajo riego. El área de estudio se ubica la cuenca media del río Colorado, donde se seleccionó un lote de alfalfa (*Medicago sativa*) con riego por pivote central. Para simplificar el sistema y llevarlo a una escala práctica de manejo y/o simplificación se determinaron 3 ambientes (o macro-ambientes) 1: alta productividad, 2: productividad media, 3: baja productividad. Estos ambientes están localizados a la misma distancia radial respecto del centro del pivote, con lo cual se riegan con el mismo grupo de aspersores, minimizando la variabilidad de producción por características del riego. Los trabajos se iniciaron a partir del 28 de noviembre al 22 de diciembre de 2014, realizando mediciones de altura de planta con cinta métrica, cortes de material aéreo. Todas las mediciones se realizaron con 5 repeticiones por sitio. Las estimaciones de la cantidad de energía reflejada fueron realizadas el día 12 de diciembre de 2014 con un sensor pasivo Skye que mide en la porción del espectro electromagnético en 660 y 730 nm. Los resultados indican que existe una relación lineal entre la altura del cultivo y el rendimiento de materia seca en los 3 ambientes (Baja, Media y Alta

Productividad), con una correlación de 0,97; 0,56 y 0,80 respectivamente. Conocer la producción de materia seca a partir de esta información, con anticipación a la fecha de corte, permite planificar y optimizar la logística de laboreos y aplicación de insumos.

Palabras clave: Sensores remotos, alfalfa, NDVI

INTRODUCCIÓN

La agricultura se expande sobre nuevos territorios incluyendo regiones semiáridas y áridas previamente destinadas a la ganadería (Solbrig, 1999). En particular, se ha expandido la agricultura bajo riego, obteniendo mayores rendimientos y estabilidad que la agricultura de secano. Además, por la expansión de los cultivos hacia zonas marginales, se predice que el área de las zonas de regadío seguirá aumentando en el futuro (Abrahao *et al.*, 2011).

Por el actual y futuro desarrollo de las áreas bajo riego y la heterogeneidad ambiental que existe en los sistemas de producción, existe la necesidad de contar con herramientas objetivas que permitan cuantificar la variabilidad productiva dentro de los lotes bajo riego, considerando la variabilidad en potencial de rendimiento de cada ambiente. A partir de técnicas de sensoramiento remoto es posible analizar directamente el estado de la vegetación (e.g. área foliar) a través del análisis de los valores de reflectancia (Hatfield *et al.*, 2008). Los sensores remotos proveen información, específica y objetiva, debido a su capacidad para medir indicadores biofísicos y detectar su variabilidad espacial (ASD, 1999). Lo expuesto anteriormente, permite caracterizar la aptitud productiva dentro de un lote agrícola a par-

tir de la respuesta que ofrece la vegetación. Los sensores pasivos (cámaras, o sensores montados en satélites o drones, entre otros) miden la reflectancia (luz reflejada desde el suelo/luz incidente) de la luz solar permitiendo abordar heterogeneidad productiva con diferentes tecnologías a diferentes escalas espaciales y temporales dentro del lote. La información derivada de sensores remotos, satelitales o de terreno, se complementa con información obtenida mediante relevamientos a campo, permitiendo la calibración, y la validación de modelos de crecimiento de cultivos (e.g. Dorigo *et al.* 2007).

La interacción de la radiación solar con las moléculas foliares de las plantas controlan las reflectancias del espectro visible (VIS) y del infrarrojo (IR). Los componentes bioquímicos (pigmentos, proteínas, carbohidratos aceites, agua), morfología de la hoja (mesófilo) y arquitectura de la planta, influyen en la performance de las plantas para absorber, transmitir y reflejar la radiación solar de distintas longitudes de onda corta de 280 a 2800 nm (Hoffer, 1978; Myneni 1991; Curran *et al.*, 2001). Diversos índices de vegetación, como el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) revelan las características reflectivas de la vegetación en diferentes estadíos fenológicos. El NDVI relaciona la reflectancia en la longitud de onda en el canal infrarrojo (0.78-0.90

μm) y rojo (0.63-0.69 μm) (Rouse, 1973) y depende directamente de diversos parámetros vegetales como la biomasa, porcentaje de cobertura vegetal y área foliar (Asrar *et al.*, 1989; Baret y Guyot, 1991).

En los sistemas de producción intensivos bajo riego, conocer los diferentes ambientes productivos dentro del lote (heterogeneidad ambiental) posibilita un manejo diferencial. Estas características de heterogeneidad se ven reflejadas en diferentes parámetros de producción como altura de planta, rendimiento de materia seca (MS), índice de área foliar, rendimiento de granos, entre otros. En la cuenca media del río Colorado la mayor producción agrícola corresponde a alfalfa, maíz, vid ya sea con riego de tipo gravitacional o presurizado, donde el segundo ha sido el sistema que se ha desarrollado en los últimos años.

El objetivo de este trabajo fue establecer relaciones entre los parámetros de producción (altura y MS) con el índice de vegetación (NDVI) en cultivos de alfalfa bajo riego. Conocer con anticipación a la fecha de corte la producción de MS, a partir de esta información, permite planificar y optimizar la logística de labores. Así también permitiría identificar áreas de similares características que posibilitarán a los productores ser más eficientes en la distribución de los recursos mejorando la rentabilidad del sistema.



Figura 1. Ubicación de los ambientes bajo estudio, AP (alta productividad), MP (productividad media) y BP (baja productividad).

| | Fechas | Altura planta (cm) | Mat. Seca (Kg/ha) |
|----|--------|--------------------|-------------------|
| BP | 28-nov | 21,5 | 860,5 |
| | 05-dic | 30,5 | 1177,2 |
| | 12-dic | 25,1 | 897,1 |
| | 22-dic | 42,6 | 1885,1 |
| MP | 28-nov | 40,4 | 1782,5 |
| | 05-dic | 42,4 | 2712,9 |
| | 12-dic | 47,6 | 2030,7 |
| | 22-dic | 64 | 3151,3 |
| AP | 28-nov | 43 | 1932,0 |
| | 05-dic | 57,4 | 2492,3 |
| | 12-dic | 65 | 2478,4 |
| | 22-dic | 76,6 | 4129,9 |

Tabla 1: Valores de altura de planta y materia seca promedio por fecha para cada uno de los ambientes, BP (baja productividad), MP (media productividad) y AP (alta productividad).

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica la cuenca media del río Colorado, en la Sección V de riego del Sistema de Aprovechamiento Múltiple de 25 de Mayo La Pampa, Argentina. Se seleccionó un lote de alfalfa (*Medicago sativa*) con riego por pivote central (37.914803 S, 67.771288 O) de 70 has con destino de la producción a henificación. Para simplificar el sistema y llevarlo a una escala práctica de manejo se establecieron 3 ambientes (o macro-ambientes) 1: alta productividad, (AP); 2: productividad media (MP); 3: baja productividad (BP), Figura 1. Estos ambientes se determinaron a partir de la superposición de mapas de NDVI obtenidos de imágenes LANDSAT de años anteriores con chequeos a campo. Los sitios muestreados están localizados a la misma distancia radial respecto del centro del pivote, regándose con el mismo grupo de aspersores, minimizando la variabilidad de producción por características del riego.

Los muestreos a campo se realizaron desde el 28 de noviembre y se repitieron el 5, 12 y 22 de diciembre de 2014. En cada sitio se realizaron cortes de material aéreo en un área de 1 m². Cada muestra relevada a campo fue pesada y secada en estufa a 60 °C. Todas las mediciones se realizaron con 5 repeticiones por sitio y por fecha.

Los datos de reflectancia fueron tomados el día 12 de diciembre de 2014, por un sensor pasivo Skye

que mide en la porción del espectro electromagnético en 660 y 730 nm.

Para determinar el porcentaje de energía reflejada por parte del cultivo se obtuvo el dato de la radiación global incidente para el día 12 de diciembre desde una estación meteorológica, perteneciente al Departamento Provincial del Agua de Río Negro, ubicada en la localidad de Catriel, a 5 Km de distancia del ensayo. Posteriormente, con los datos de reflectancia calibrados se procedió a estimar los valores de NDVI para cada sitio.

Se realizaron análisis de correlación entre las variables determinadas a campo y los valores de índice NDVI.

RESULTADOS

A continuación en la Tabla 1 se muestra un resumen de los datos obtenidos de altura de planta y rendimiento de MS promedio de cada sitio y cada fecha de muestreo, indicando que los ambientes de mayor productividad presentan los valores más altos de altura de planta y rendimiento de MS.

La Figura 2, muestra una relación lineal entre la altura del cultivo y el rendimiento de MS para los 3 ambientes, lo que indica que los ambientes caracterizados por su nivel de productividad, se corresponden con la productividad de forraje.

La relación entre altura y rendimiento de MS tiene un coeficiente de correlación mayor en el

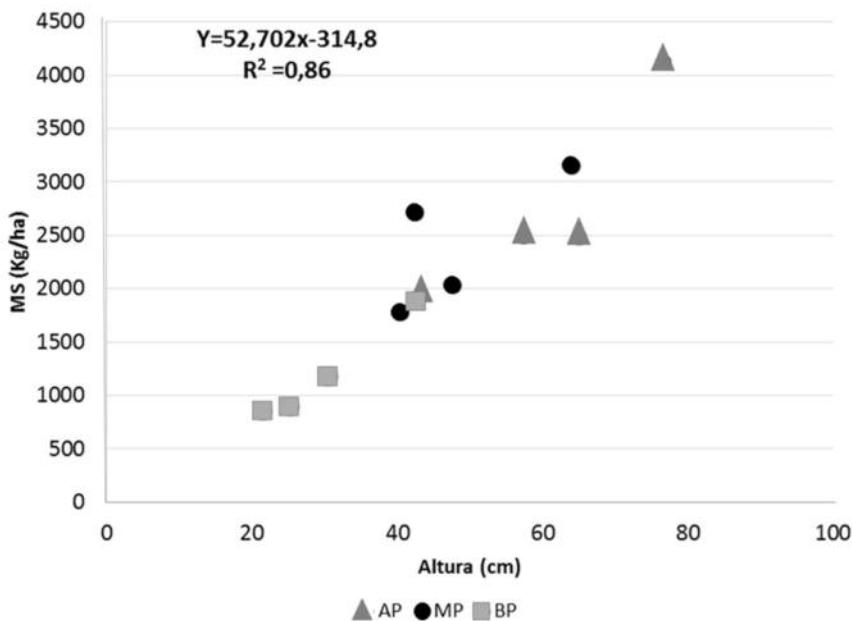


Figura 2. Relación entre MS (Kg/ha) y altura de planta (cm) para los tres ambientes.

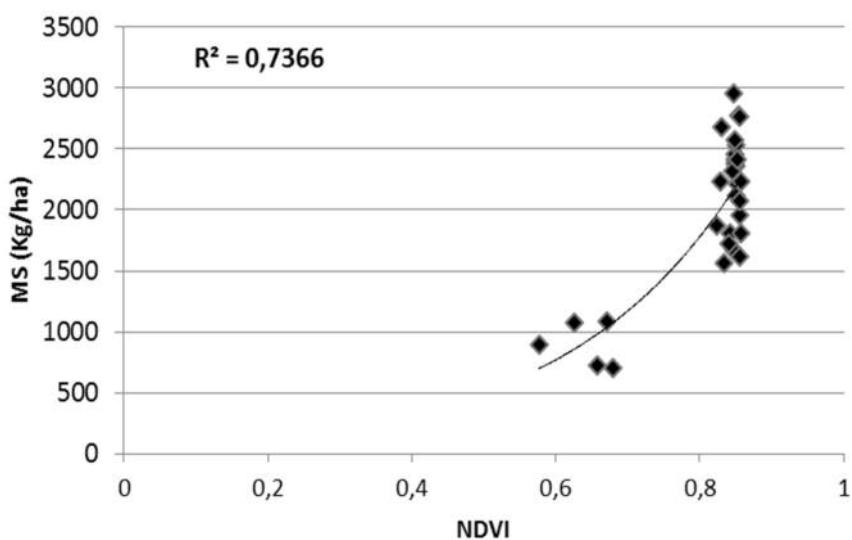


Figura 3. Correlación entre MS (Kg/ha) y NDVI para todos los sitios y todas las fechas.

ambiente BP debido posiblemente a las características de menor desarrollo observado en las plantas respecto de los ambientes AP y MP.

La Figura 3 muestra la relación entre producción de MS y NDVI indicando un ajuste de 0,73. Obsérvese que con valores de superiores a 1500 Kg/ha de MS los valores de NDVI tienden ser altos y similares, lo cual indica que la señal sufre una saturación de la respuesta.

En la Figura 4 se muestra la correlación entre altura de planta (cm) y NDVI presentando un comportamiento similar al observado para la MS.

Los valores hallados indican que los parámetros

vegetales medidos a campo, altura y MS, poseen una fuerte relación con índices como el NDVI. Cuando el cultivo presenta mayor desarrollo, altura y relación: superficie de área foliar y superficie de suelo cubierta, existe un efecto de saturación del NDVI (González Piqueras, 2006) demostrado en este caso con valores superiores a 0,8.

El comportamiento asintótico del NDVI para valores medios a altos de MS o altura de plantas, suele ser una limitante en el uso de este índice, ya que presenta insensibilidad a las variaciones de diferentes parámetros vegetales. En el caso del estudio desarrollado, valores superiores de 1500 Kg/ha de

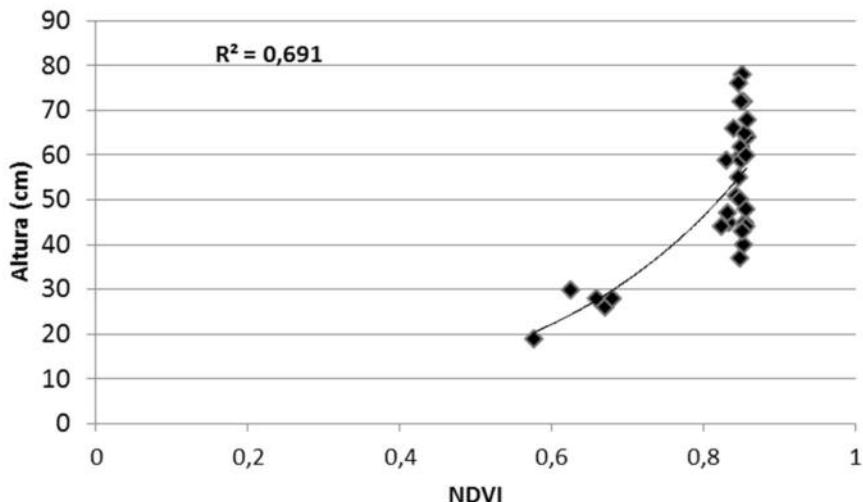


Figura 4. Correlación entre altura de planta (cm) y NDVI para todos los sitios y todas las fechas.

MS o altura de planta por encima de 35 cm en alfalfa, produce cambios muy bajos en los valores de NDVI. Con cultivos con mayor desarrollo, las capas más bajas de la vegetación se encuentran oscurecidas debido a la sombra proyectada por las capas superiores.

CONCLUSIONES

El uso de índices de vegetación provistos por sensores remotos ofrece una ventaja interesante en el seguimiento de la vegetación presente en el terreno. Esto permite conocer la variabilidad espacial de los lotes agrícolas, en un contexto de manejo por ambientes. Sin embargo, su uso se limita a ambientes de baja a media aptitud productiva ya que este aspecto condiciona un alto desarrollo vegetal. Esto pone de manifiesto que ambientes que brindan un desarrollo vegetal con alta cobertura, proporcionan altos valores de MS, altura de plantas produciendo una baja sensibilidad del índice. Sin embargo, la metodología utilizada resulta sencilla, de bajo costo, operativamente simple y con un alto grado de confiabilidad de los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFIA

- Abrahao, R., Causapé, J., García-Garizábal, I., Merchán, D. 2011. Implementing irrigation: Water balances and irrigation quality in the Lerma basin (Spain). Agricultural Water Management 102: 97-104.
- ASD (Analytical Spectral Devices). 1999. Technical guide. Analytical Spectral Devices. Boulder, CO, USA.
- Asrar, G., Myneni, R. y Kanemasu, E. 1989. Estimation of

plant canopy attributes from spectral reflectance measurements. Chap 7. In G. Asrar (Ed) Theory and applications of optical remote sensing: 252-296. New York: Wiley.

- Baret, F. y Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessments. Remote Sensing of Environment: 161-173.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., y Peterson, D. L. 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark methodologies. Remote Sens. Environ. 76: 349-359.
- Dorigo, W. A., Zurita-Milla, R. de Wit, A. J. W., Brazile, J., Singh, R., Schaepman, M. E. 2007. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.
- Hatfield, J. L., Gitelson, A. A., Schepers, J.S., Walthall, C. L. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. Agronomy Journal. 100: 117- S131.
- Hoffer, R. M. 1978. Biological and physical consideration in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: Remote Sensing: The Quantitative Approach, eds P.H. Swain and: S. Davis. Mc Graw-Hill. New York, pp 227-289.
- González-Piqueras, J. 2006. Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.
- Myneni, R. B. 1991. Modelling radiative transfer and photosynthesis in three dimensional vegetation canopies. Agric. Forest Meteorol. 55: 323-344.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D. y Harlan, J. 1973. Monitoring vegetation system in the Great plain with ERTS. In S.C. Freden, E. Mercanti, P. & Becker (Edit), Third Earth Resources Technology Satellite-I Symposium

Technical presentations, section A vol I (pp 309-317).
Washington, DC: National Aeronautics and space
Administration (NASA SP-351).

- Solbrig, O. T. 1999. Observaciones sobre biodiversidad y desarrollo agrícola. En: Biodiversidad y uso de la Tierra. Conceptos y ejemplos de Latinoamérica. Editores: Mateucci, S. D., Solbrig, O. T., Morello, J., Halffter, G. Ed. Eudeba. Argentina.
-

**Nivel
Predial:
Caso**

2

Control sitio específico de enfermedades en girasol

RESUMEN

En la región semiárida pampeana las enfermedades del girasol se presentan en forma recurrente. La tecnología sitio específica permite identificar ambientes que presentan mayor canopeo como indicador de productividad potencial. Un mayor canopeo también favorece el desarrollo de enfermedades. Uno de los indicadores más utilizados es el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Los objetivos del trabajo fueron evaluar el uso de imágenes multiespectrales para identificar sitios de mayor daño potencial por enfermedades, y cuantificar el incremento de rendimiento y sus componentes debido a la aplicación de fungicidas. El ensayo se realizó durante 2012/2013 en la planicie medanosa norte de La Pampa sobre girasol DK 3945 alto oleico. Previo a floración, se seleccionaron 6 sitios del mismo lote con altos valores de NDVI y 6 con valores bajos. Tres sitios de cada categoría fueron aplicados mediante avión con un fungicida compuesto por 18% de Azoxistrobina y 11,3 % de Difenoconazole en dosis de 0,5 l ha⁻¹, con agregado de 1 l ha⁻¹ de aceite de soja metilado en el estado de R2. La enfermedad predominante fue *Alternaria sp.* La determinación del NDVI permitió identificar sitios de mayor productividad en forma previa al momento del control químico. Sitios con altos valores de NDVI presentaron mayores niveles de incidencia y severidad de *Alternaria sp.* No obstante, en ambos sitios, los niveles de incidencia y severidad fueron bajos. En condiciones desfavorables para las enfermedades foliares, el tratamiento con fungicida no presentó incremento significativo de rendimiento, número de aquenios m⁻², peso de aquenios, contenido de acei-

te y porcentaje de aceite alto oleico. El análisis de imágenes multiespectrales previo a floración permite identificar ambientes de un mismo lote con condiciones más favorables al desarrollo de enfermedades foliares. El uso de esta tecnología permitiría hacer más eficientes las aplicaciones destinadas al control químico de enfermedades del girasol.

Palabras clave: NDVI, imágenes satelitales, daño potencial, planicie medanosa.

INTRODUCCION

En la región semiárida pampeana, las enfermedades de fin de ciclo se presentan en forma recurrente en el cultivo de girasol. Sin embargo, los niveles de daño fluctúan entre años de acuerdo a la combinación del comportamiento genético de los híbridos, la disponibilidad de inóculo y las condiciones ambientales. Las condiciones ambientales se definen por variables meteorológicas entre las que se destacan la humedad y temperatura. Factores de manejo como la densidad, la fecha de siembra, las condiciones del sitio, la rotación de cultivos, entre otros, tienen influencia sobre el desarrollo de enfermedades en el cultivo. Canopeos densos con altos valores de índice de área foliar (IAF) pueden incrementar la humedad relativa en los estratos inferiores del cultivo y generar condiciones ambientales más favorables al desarrollo de enfermedades (Escande *et al.*, 2007). Debaeke & Perez (2003) encontraron que las prácticas de manejo que incrementan la intercepción de radiación por el cultivo incrementan la severidad de *Phoma macdonaldii*. Asimismo, el aumento de la densidad y en algunos

casos, la fertilización nitrogenada incrementan la severidad de cancer del tallo por *Phomopsis helianthi* (Debaecke et al 2003).

Las enfermedades más frecuentes en la región semiárida pampeana, en el cultivo de girasol, son las causadas por *Verticillium dahliae* (Verticilosis del girasol), *Diaporthe helianthi* (Cancro del tallo del girasol), *Sclerotinia sclerotiorum* (Podredumbre blanda del capítulo), *Puccinia helianthi* (Roya negra), *Alternaria helianthi* (Manchas en hojas), *Phoma macdonaldii* (Escudete negro), *Septoria helianthi* (Septoriosis) y *Albugo tragopogonis* (Roya Blanca). Con excepción de la Verticilosis y la Podredumbre blanda del capítulo de girasol, la severidad del resto de las enfermedades puede ser disminuida por tratamientos con fungicidas foliares. Estas enfermedades se presentan todos los años, aunque su severidad varía en función de las condiciones ambientales específicas de cada campaña. Las condiciones que favorecen el desarrollo de cada hongo pueden contribuir al entendimiento de las variaciones en la severidad entre campañas. La temperatura óptima para la germinación de conidios de *Alternaria helianthi* es de 25 a 28 °C con un período de mojado óptimo de 12 horas (Allen et al., 1983). En el caso de *Puccinia helianthi*, la temperatura óptima para la infección es de 10 a 25 °C (Shtemberg 1995; Sood et al. 1972). *Albugo sp* presenta mayor liberación de zoosporas con temperaturas cercanas a 15°C mientras que temperaturas por encima de 20°C la reducen en forma significativa (Hartmann et al. 1980).

Ensayos realizados en diferentes zonas han analizado los efectos de la aplicación de fungicidas sobre el rendimiento con resultados variables. Escande et al., 2007 mencionan en un relevamiento realizado sobre 14 sitios en el sur de Córdoba y La Pampa, incrementos de rendimiento de 469 kg ha⁻¹ en girasoles tratados con fungicidas para el control de enfermedades de hojas y tallo. Pascual et al. (2010) obtuvieron incrementos de rendimiento de aquenios con tratamientos a inicio de floración que oscilaron entre 630 y 1533 kg ha⁻¹, en cultivos de girasol con *Alternaria spp*, *Septoria helianthi* y *Phoma macdonaldii* como principales patógenos presentes. Pérez Fernández y Figueruelo (2008) mencionan que la aplicación de fungicida incrementó el rendimiento en 800 kg ha⁻¹ en el genotipo de mayor susceptibilidad a las enfermedades de fin de ciclo mientras que no presentó incremento significativo en el genotipo de menor susceptibilidad.

Encontraron también que tratamientos realizados 15 días antes y en floración generaron incrementos de rendimiento con respecto al testigo de 312 y 486 kg ha⁻¹ respectivamente, mientras que tratamientos realizados 15 días después de floración resultaron en incrementos no significativos de rendimiento. Sin embargo, cuando las condiciones para el desarrollo de enfermedades son desfavorables, no se observan incrementos de rendimiento significativos (Campana, 2013)

El avance en la tecnología sitio específica permite identificar ambientes dentro de un mismo lote que presentan mayor productividad. Estos ambientes generan mayores niveles de producto pero también de IAF, lo que podría determinar mayores niveles de daño en el cultivo a causa de enfermedades. La producción de biomasa de un cultivo y el IAF pueden ser estimados a través de sensores remotos montados en satélites, aviones o drones. Uno de los indicadores más utilizados es el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Las imágenes satelitales Landsat disponibles actualmente permiten estimar el NDVI con una resolución temporal de 15 días y una resolución espacial de 30 metros. Recientemente se han puesto en órbita nanosatélites que mejoran la resolución espacial y temporal incrementando la posibilidad de aplicación de la tecnología sitio específico. Una ventaja de las imágenes generadas a partir de cámaras multiespectrales montadas en aviones o drones es que disponen de la capacidad de adaptar la resolución espacial en base los requerimientos para los cuales será utilizada a través de la modificación de la altura de vuelo. Otra ventaja consiste en la posibilidad de planificar el momento óptimo de toma de la misma en función de condiciones meteorológicas y fenológicas del cultivo.

La tecnología disponible permite georeferenciar sectores del mismo lote con diferentes rangos de NDVI. Los valores de NDVI son relacionados positivamente con la altura de la planta, el diámetro de capítulos, la biomasa, el área foliar, el porcentaje de cobertura vegetal, la radiación fotosintéticamente activa absorbida y el rendimiento del cultivo de girasol (Mieza et al., 2007; Asrar et al 1989; Baret and Guyot 1991; García Accinelli y otros 2012).

Se plantea la hipótesis que sitios de alto NDVI presentarán mayor incidencia y severidad de enfermedades de fin de ciclo y mayores incrementos de rendimiento por aplicaciones de fungicidas.

Los objetivos del trabajo fueron:

- Evaluar el uso de imágenes multiespectrales para la identificación de sitios de mayor daño potencial de enfermedades antes de la aplicación de un tratamiento de control con fungicidas en el cultivo de girasol.
- Cuantificar el incremento de rendimiento y sus componentes debido a aplicaciones de fungicida para el control de enfermedades en ambientes con diferentes valores de NDVI.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo se realizó durante la campaña 2012/13 en el lote situado al sur de Intendente Alvear en la provincia de La Pampa ($S\ 35^{\circ}\ 52'\ 57''$; $W\ 63^{\circ}\ 39'\ 20''$). La siembra se realizó el 1/11/2012 con el híbrido DK 3945 AO en siembra directa con un adecuado control de malezas e insectos durante el ciclo del cultivo. En la Tabla 1 se detalla el manejo cultural del cultivo de girasol.

El híbrido DK 3945 AO, de ciclo intermedio, fue sembrado el 03/11/12 sobre antecesor maíz en siembra directa.

Para el barbecho químico se utilizó 2,4 D Amina 100% (0,67 l ha^{-1}) + Aceite coadyuvante (0,03) + Sulfentrazone 50 % (0,15) + Glifosato 62 % (2,5) Corrector de pH (0,03). En preemergencia se aplicó Acetoclor 90 % (0,3) + Sulfentrazone 50 % (0,02) + Gammacilatrina 15 % (0,015) + Flurocloridona 25 % (0,170) + Glifosato 62 % (0,5) + Aceite coadyuvante

(0,03). En postemergencia se controlaron gramíneas con Quizalofop-p-etil 1,8 % (2). Para el control de oruga medidora se utilizó Propenofos 50% + Lufenuron 5% (0,2) + Aceite coadyuvante (0,5) + Corrector de pH (0,04).

A la siembra se fertilizó con 31 kg/ha fosfato monoamónico (11-52-0) y en 4 pares de hojas con 82 l/ha UAN (32-0-0).

El día 4/01/13 se procedió a la toma de una imagen aérea con cámara multiespectral que fue repetida a los 30 días post-aplicación. La imagen fue procesada mediante un software específico para procesamiento de imágenes multiespectrales mediante el cual se realizaron correcciones geométricas, se georeferenció la imagen y se generó un mapa temático de NDVI. En base a este mapa se determinó la ubicación de una franja de aplicación aérea de fungicidas de 100 metros de ancho de manera que la misma incluya sitios con altos valores de NDVI (0,53 a 0,6) y sitios con bajos valores NDVI (0,4 a 0,53). Dentro de la franja a tratar con fungicidas se geo-referenciaron 3 puntos de alto y 3 de bajo NDVI. Lo mismo se realizó fuera de la franja para obtener sitios testigo (Figura 1). El valor de NDVI de cada sitio testigo seleccionado fue similar a un sitio correspondiente tratado con fungicida. Para la ubicación de los sitios testigo se tomó un área de seguridad mayor a 100 m adyacente a la franja tratada para evitar posibles efectos de deriva.

En cada sitio se evaluó la incidencia foliar y severidad de enfermedades presentes en forma previa a

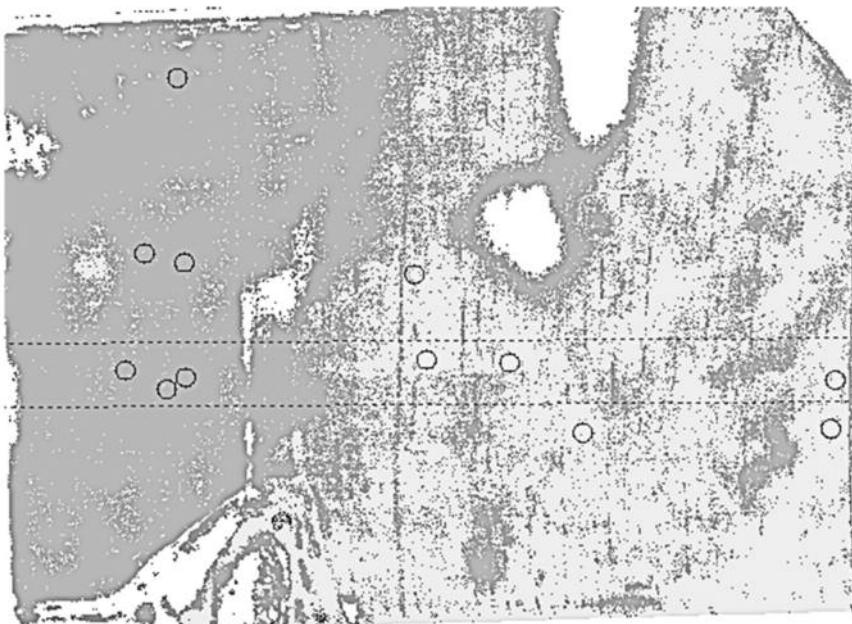


Figura 1: Imagen multiespectral con los sitios relevados.

la aplicación y a los 30 días del tratamiento sobre 10 plantas seleccionadas al azar dentro de cada sitio georeferenciado. La incidencia foliar se determinó para las enfermedades presentes evaluando el porcentaje de hojas que presentan síntomas. La severidad fue determinada en forma visual por estimación del porcentaje de superficie foliar afectada por cada enfermedad. Ambos indicadores fueron evaluados en las 15 hojas superiores. El incremento de incidencia foliar fue calculado por diferencia entre la incidencia foliar al momento de aplicación y la incidencia foliar evaluada a los 30 días posteriores.

El área foliar se estimó junto con la primera evaluación sanitaria, a partir de la medición del ancho máximo de todas las hojas de 10 plantas seleccionadas al azar mediante la metodología propuesta por Roushuel *et al.* (2007):

$$Y = 6,72 + 0,65x^2 \text{ donde } Y \text{ es el área foliar y } x \text{ es el ancho de la hoja.}$$

Con el área foliar estimada y la densidad de plantas evaluada en cada sitio se determinó el IAF.

El día 5/01/13 se realizó la aplicación del tratamiento fungicida en la franja. El estado fenológico del cultivo de girasol al momento de aplicación fue R2 (Schneiter y Miller 1981). El tratamiento consistió en una aplicación de Amistar Top (Azoxistrobina 18 % + Difenoconazole 11,3 %) en dosis de 500 cm³ ha⁻¹ con

el agregado de 1 litro ha⁻¹ de aceite de soja metilado. Las condiciones durante la aplicación del tratamiento fungicida fueron óptimas. La velocidad del viento de 10 km/hora del sector sudoeste, humedad relativa de 82% con un vuelo efectuado a las 6 a.m. Se utilizó un caudal de 12 litros por hectárea, con un ancho de trabajo efectivo de 15 metros. De acuerdo a estas condiciones de calibración de la aplicación, se logrían obtener 80 impactos cm⁻² en las hojas inferiores y 120 impactos cm⁻² en las hojas superiores; con un diámetro de gota promedio de 115 micrones.

La cosecha se realizó sobre una superficie de 5,2 m² en forma manual. La trilla se realizó con trilladora estacionaria marca Forty. El producto obtenido fue pesado y estimado el contenido de humedad a través de higrómetro Tesma Campo. La concentración de materia grasa se determinó mediante resonancia magnética nuclear. Las variables evaluadas fueron: rendimiento de aquenios, contenido de materia grasa, peso de 1000 aquenios y número de aquenios m⁻².

El análisis de la varianza, test de diferencias de medias y regresión lineal fueron realizados mediante el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011).

RESULTADOS

Durante el año 2012 los suelos tuvieron una importante recarga hídrica en otoño y primavera que

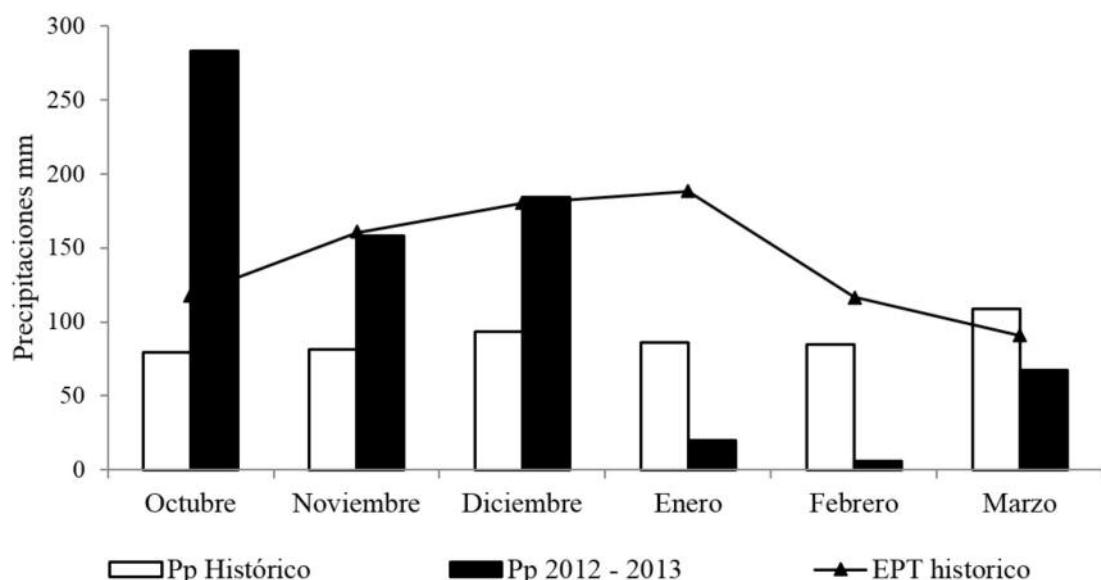


Figura 2: Precipitaciones (Pp) durante el ciclo del cultivo de girasol para la campaña 2012/13, promedio histórico de la zona (1921-2012) y evapotranspiración (EPT) 2012/13. Fuente: Casagrande, Guillermo. EEA Anguil.

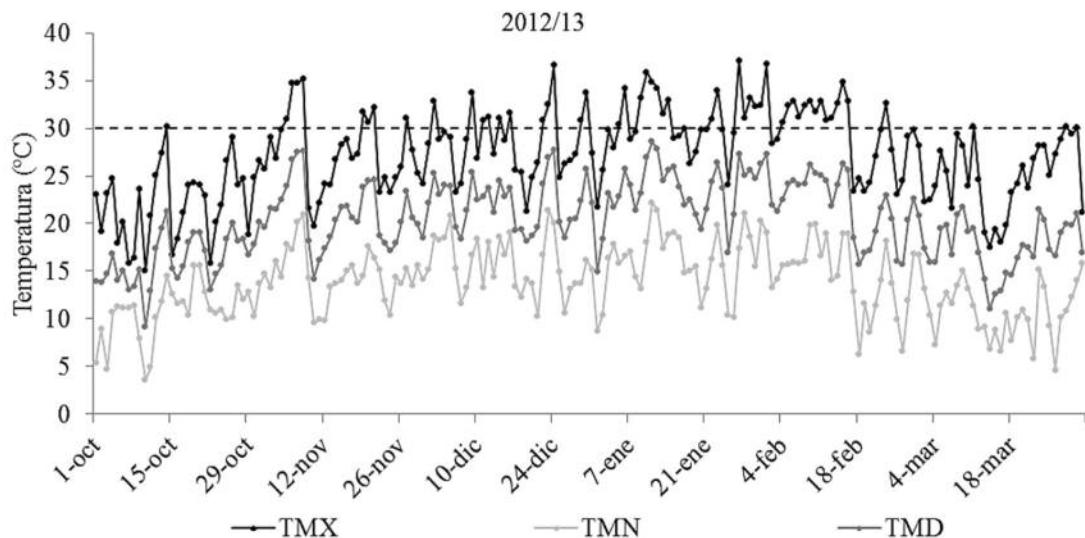


Figura 3: Temperatura diaria durante el ciclo del cultivo de girasol en la campaña 2012/13. Temperatura máxima (TMX), Temperatura mínima (TMN) y Temperatura media (TMD). La línea horizontal discontinua indica la temperatura de 30°C. Fuente: Casagrande, Guillermo. EEA Anguil.

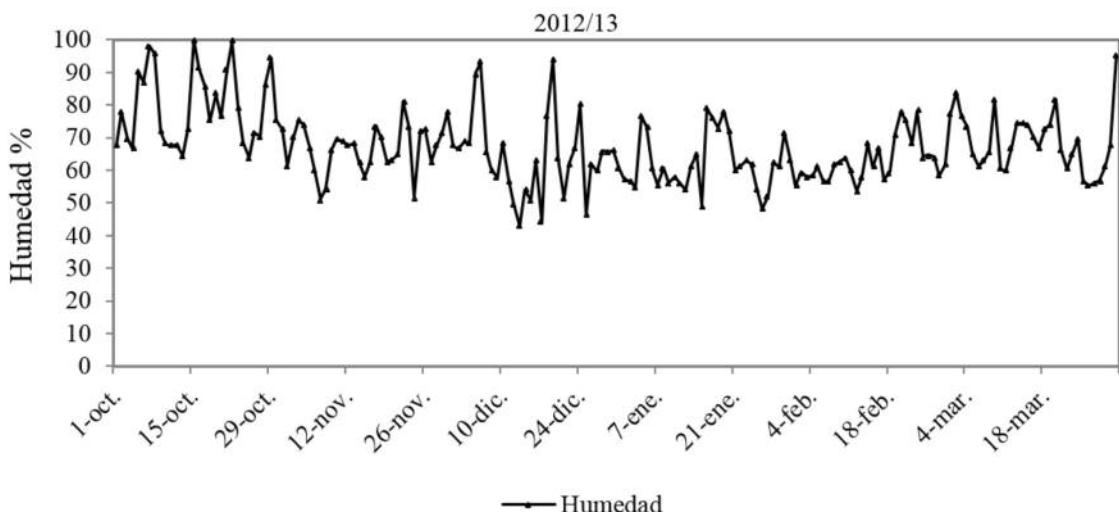


Figura 4: Humedad relativa diaria diaria durante el ciclo del cultivo de girasol en la campaña 2012/13. Fuente: Casagrande, Guillermo. EEA Anguil.

permitió la siembra del cultivo de girasol en condiciones óptimas y un excelente crecimiento en el período vegetativo y en floración. El inicio del año 2013 se caracterizó por una fuerte deficiencia hídrica durante los meses de enero, febrero y marzo, con precipitaciones inferiores en un 77, 94 y 38 % respectivamente en relación al promedio histórico de la zona (1921-2012). El balance hídrico para esos meses fue negativo (Figura 2).

En la región semiárida pampeana los estreses más frecuentes en cultivos de verano están asocia-

dos a déficit hídrico y altas temperaturas (Corró Molas *et al.* 2012) (Figura 3).

La humedad relativa diaria presentó valores máximos durante el mes de diciembre. Al comienzo de 2013 se produjo una disminución asociada a la ausencia de precipitaciones (Figura 4).

La enfermedad de fin de ciclo predominante al momento de aplicación fue *Alternaria sp.* con valores de incidencia y severidad bajos. Cabe destacar que los tratamientos fungicidas se realizan en forma preventiva, por lo que es frecuente determinar bajos

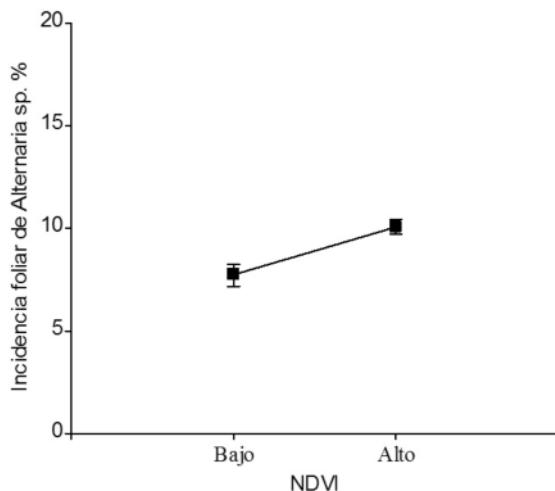


Figura 5: Incidencia foliar de *Alternaria sp.* en sitios de alto y bajo NDVI antes de la aplicación de fungicidas.

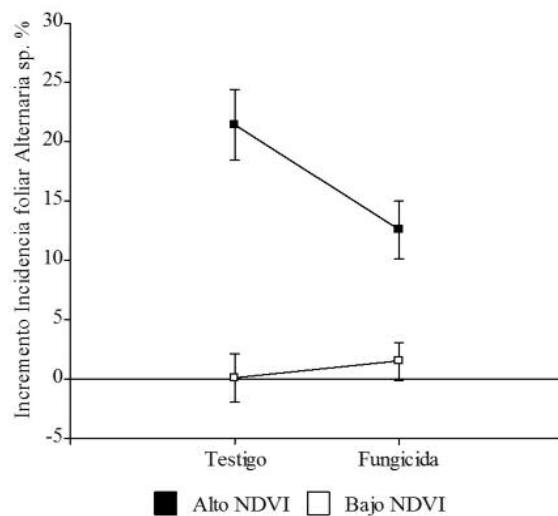


Figura 6: Incremento de incidencia foliar de *Alternaria sp.* en girasoles a los 30 días post-aplicación en sitios tratados con fungicida y testigo con diferentes niveles de NDVI.

niveles de enfermedades antes de la aplicación. Sin embargo, en ese momento, los sitios de alto NDVI presentaron niveles levemente más elevados de incidencia de *Alternaria sp.* que sitios de bajo NDVI ($p=0.0003$). La incidencia foliar de *Alternaria sp.* para sitios de alto y bajo NDVI se presenta en la Figura 5.

Las condiciones post-aplicación tienen una marcada influencia sobre la evolución de las enfermedades foliares en el cultivo de girasol. En general, lluvias frecuentes y temperaturas entre 10 a 25 grados favorecen el incremento de las mismas.

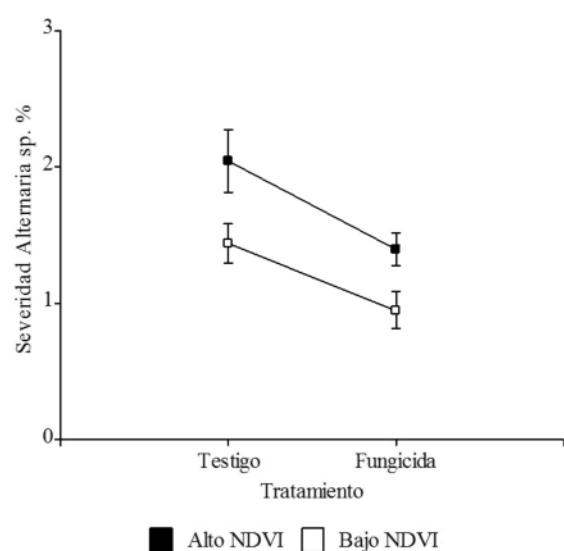


Figura 7: Severidad de *Alternaria sp.* en girasol a los 30 días post-aplicación en sitios tratados con fungicida y testigo con diferentes niveles de NDVI.

Las condiciones ambientales posteriores a la aplicación de fungicidas fueron desfavorables para el incremento de severidad de las enfermedades. Desde el momento de aplicación de fungicidas hasta la primera precipitación transcurrieron 23 días. Por otro lado, se registraron temperaturas máximas elevadas durante la segunda quincena de enero y primera de febrero que posiblemente afectaron el incremento de las enfermedades en el cultivo (Figuras 2, 3 y 4).

A pesar de las condiciones desfavorables para el desarrollo de enfermedades, los sitios con alto NDVI presentaron valores más altos de incidencia y severidad de *Alternaria sp.* que sitios de bajo NDVI ($p<0.0001$ y $p=0.0026$ respectivamente)

En la Figura 6 se presenta el incremento de incidencia foliar de *Alternaria sp.* en girasoles tratados con fungicida y testigo en sitios de alto y bajo NDVI.

El área foliar afectada por *Alternaria sp.*, principal patógeno del complejo de enfermedades foliares y de tallo en el lote, no superó el 3 % a los 30 días post-aplicación del tratamiento fungicida. En la Figura 7 se presenta la severidad de *Alternaria sp.* en sitios de alto y de bajo NDVI tratados con fungicida y los respectivos testigos.

El IAF se relacionó positivamente con el NDVI (Figura 8).

No se observó interacción en rendimiento de aquenio, número de granos m⁻², peso de aquenios,

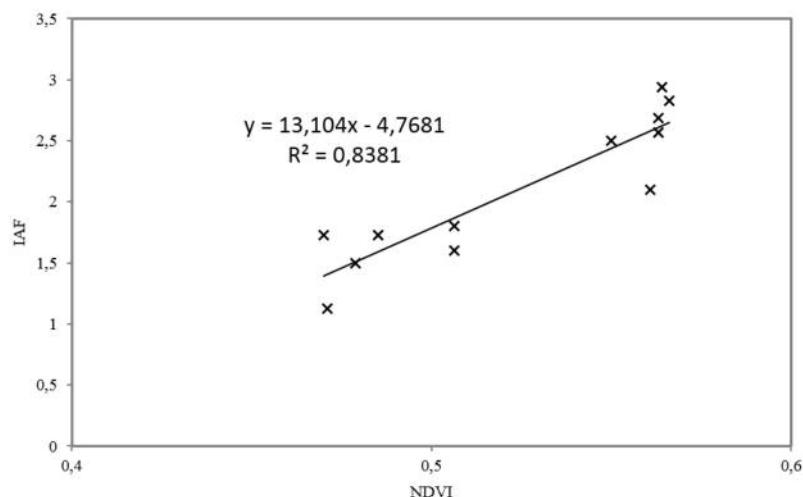


Figura 8: Relación entre el IAF (índice de área foliar) y el índice de vegetación (NDVI).

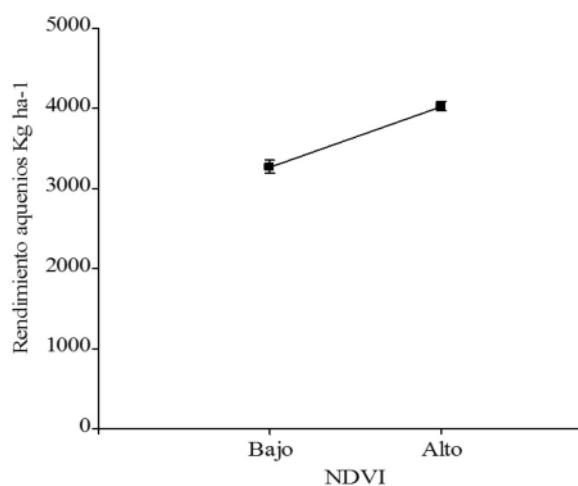


Figura 9: Relación entre el rendimiento de aquenios y sitios con alto y bajo NDVI.

contenido de aceite y porcentaje de alto oleico entre sitios de diferente NDVI y tratamientos fungicida ó testigo ($p=0,80$; $p=0,63$; $p=0,1667$; $p=7385$ y $p=0,9160$ respectivamente).

No se encontraron diferencias significativas en rendimiento de grano, número de granos m⁻², peso de aquenios, contenido de aceite y porcentaje de alto oleico entre sitios tratados y testigo ($p=0,735$; $p=0,8598$; $p=0,8622$; $p=0,3941$; $p=0,4762$ respectivamente)

Los sitios de alto NDVI presentaron rendimiento de aquenio más altos que los sitios con bajo NDVI ($p<0,0001$) (Figura 9). Estos resultados coinciden con Mieza y otro (2007) quienes encontraron una relación positiva entre NDVI y rendimiento de girasol.

Los sitios con alto NDVI presentaron mayor número de granos m⁻² y peso de aquenios que sitios de bajo NDVI ($p<0,0132$ y $p<0,0001$) (Figura 10).

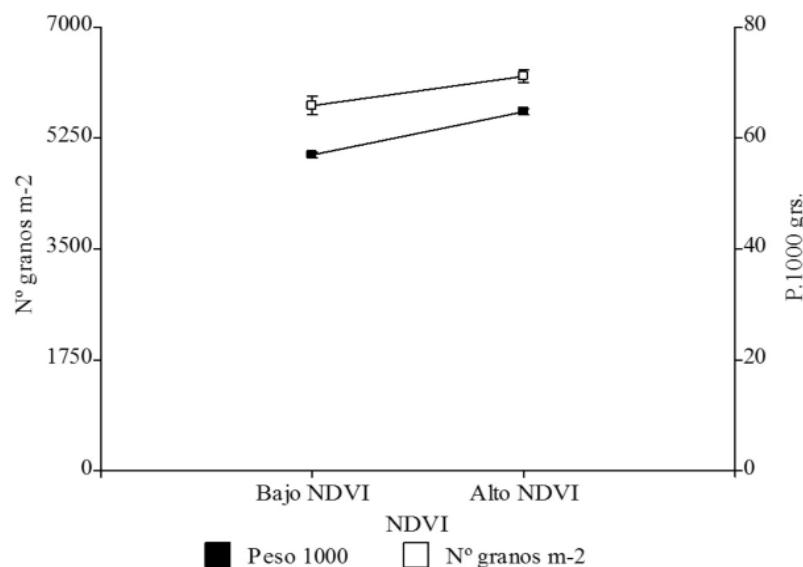


Figura 10: Número de aquenios m⁻² y peso de aquenios en sitios con alto y bajo NDVI.

No se encontraron diferencias en el contenido de aceite y porcentaje de alto oleico entre sitios con diferente NDVI ($p= 0,1789$ y $p=0,8290$ respectivamente)

CONCLUSIONES

La determinación del NDVI a través de imágenes multiespectrales permitió identificar sitios de mayor potencial de rendimiento en forma previa al control químico de enfermedades de hoja y tallo.

Sitios de alto NDVI presentaron mayores niveles de incidencia y severidad de *Alternaria sp.* que sitios de bajo NDVI. No obstante, en ambos sitios los niveles de incidencia y severidad fueron bajos.

En condiciones ambientales desfavorables para el desarrollo de enfermedades de hojas y tallos, el tratamiento fungicida no presentó incremento significativo en rendimiento, número de aquenios m⁻², peso de aquenios, contenido de aceite y porcentaje de alto oleico. Es necesario evaluar el efecto del control químico de enfermedades del girasol en condiciones ambientales más favorables para las mismas.

El análisis de imágenes aéreas multiespectrales antes de floración permite identificar sitios dentro de un lote con condiciones más favorables al desarrollo de enfermedades foliares. El uso de esta tecnología permitiría hacer más eficientes las aplicaciones destinadas al control químico de enfermedades de hojas y tallos del girasol por identificación de los sitios con mayor probabilidad de daño.

BIBLIOGRAFIA

- Aguirrezaabal, L.A.N., Orioli, G.A., Hernández, L.F., Pereyra, V.R. y J.P. Miravé. 1996. Girasol: Aspectos fisiológicos que determinan el rendimiento. Unidad Integrada Balcarce. ISBN 950-9853 71-2. 94-96 pp.
- Allen S.J., Brown J.F. and J.K. Kochman. 1983. Effects of temperature, dew period and light on growth and the development of *Alternaria helianthi*. *Phytopathology* 73:893-896.
- Asrar, G.; Myneni, R. and Kanemasu, E. 1989. Estimation of plant canopy attributes from spectral reflectance measurements. Chap 7. In G. Asrar (Ed) Theory and applications of optical remote sensing (pp252-296). New York: Wiley.
- Baret, F. and Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetations indices for LAI and APAR assessments. *Remote Sensing of Environment*, 35 pp 161-173.
- Campana D. 2013. Control de enfermedades de fin de ciclo en girasol confitero. Tesis de graduación Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa.
- Debaeke P. & Pérez. 2003. Influence of sunflower (*Helianthus annuus* L.) crop management on *Phoma* black stem (*Phoma macdonaldii* Boerema). *Crop Protection* 22 : 741-752.
- Debaeke P. Estragnat A. and R. Reau. 2003. Influence of crop management on sunflower stem canker (*Diaporthe helianthi*). *Agronomie*, EDP Sciences, 2003, 23 (7), pp.581-592.
- Di Renzo, J.A., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F., Tablada, M., Robledo, C.W. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Escande. A; Quiroz. F; Pérez Fernández. J; Lenardon. S; Álvarez. D; Huguet. N; Pereyra. V; Calviño. P; Marcellan. O; Bazzalo. M, E; Romano. A y A. Vázquez. 2007. Las enfermedades y el manejo del cultivo. 4º Congreso Argentino de Girasol, ASAGIR 2007. pp 133-144.
- Garcia Accinelli G. A., Piñeiro G. y M Oesterheld. 2012. Yield gap causation in sunflower: First results from a remote sensing approach. 18th International sunflower conference 775-780 pp.
- Mieza, M.S., Kovac, F.D. 2007. Monitoreo de Cultivos a Nivel de Lote Mediante Imágenes Satelitales: Aplicaciones en Agricultura de Precisión. Proceedings XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección Mar del Plata, ARGENTINA - 19 al 21 de septiembre de 2007 Editores Raúl Rivas, Alfredo Grisotto, Mónica Sacido, ISBN 978-987-543-127-0
- Pascual D.S., Alonso A.R., Pérez Fernández J. y D. Funaro. 2010. Identificación, evaluación y control de las enfermedades de fin de ciclo en el cultivo de girasol. 5º Congreso argentino de girasol. 1 y 2 de junio de 2010. Bs. As. pp 334.
- Perez Fernández J. y A. Figueruelo. 2008. Enfermedades: Identificación y manejo. En "El cultivo de girasol en la región semiárida pampeana". EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas". Publicación técnica nº 72. pp 65-76.
- Rouphael, Y., G. Colla, S. Fanasca, and F. Karam. 2007. Leaf area estimation of sunflower leaves from simple linear measurements. *Photosynthetica* 45 (2): 306-308 pp.
- Schneiter, A.A., y J.F. Miller 1981. Description of sunflower growth stages. *Crop. Science*. 21: 901-903.
- Sood P. N. and E. Sackston. 1972. Studies on sunflower rust. IX. Effect of temperature and light on infection of sunflower by *Puccinia helianthi*. 50 (9) 1879-1886.
- Sthiemberg H. and Vintal H. Environmental influences on the development of *Puccinia helianthi* on sunflower. 1995. *Phytopathology* 85: 1388-1393.

Metodología de muestreo para el seguimiento de pasturas y cultivos mediante fotografía digital

RESUMEN

El rendimiento de los cultivos depende de la capacidad del dosel para interceptar la radiación solar, que tiene relación directa con el índice de área foliar (IAF), índice de área de planta (IAP), su estructura y su eficiencia en la conversión de la energía. Es posible realizar el seguimiento del crecimiento del cultivo por medio de fotografías digitales. El objetivo de este trabajo es presentar una metodología para el seguimiento de pasturas y cultivos mediante estimación indirecta de cobertura y IAF. Las mediciones se llevaron a cabo en lotes productivos bajo riego de 25 de Mayo, La Pampa, desde 2013 a 2016 en cultivos de maíz y alfalfa. Se seleccionaron Unidades Elementales de Muestreo (UEM) para cada cultivo, constituidas por un área de $5 \times 5 \text{ m}^2$. En cada UEM se tomaron 10 fotografías cenitales y 10 oblicuas desde la siembra hasta floración en maíz, y desde noviembre a abril en alfalfa. En cada visita se orientó el muestreo desde el centro hacia algún punto cardinal, siguiendo el orden N, E, S, O. Se utilizó una cámara digital comercial compacta y para el procesamiento de las mismas, el programa gratuito Can-Eye, con el cual se obtuvieron los valores de IAP y cobertura. Para alfalfa, se pudo observar que existen diferencias entre las UEM dentro del mismo pivote. Para maíz, la evolución del IAF estimado tuvo una tendencia creciente hasta la etapa fenológica de floración, y también pudo notarse diferencias entre ambientes. Esta metodología ofrece buenas perspectivas para obtener mediciones confiables rápidas y objetivas del IAF en forrajes y cultivos, pero su

uso adecuado requiere de una alta intensidad de muestreo.

Palabras clave: cobertura vegetal, índice de área foliar, maíz, alfalfa

INTRODUCCIÓN

La intercepción de la luz por un cultivo es un factor determinante en el desarrollo del mismo, proporcionando la energía necesaria para la fotosíntesis y la transpiración, dos procesos fisiológicos esenciales en el ciclo de las plantas. El rendimiento de los cultivos depende de la capacidad del dosel para interceptar la radiación solar, y en consecuencia, del índice de área foliar (IAF), su estructura, y su eficiencia en la conversión de la energía captada en biomasa (Gifford *et al.*, 1984).

El IAF es una variable adimensional, definida por Watson (1947) como el área total de una cara del tejido fotosintético (e.g. adaxial) por unidad de terreno. También puede ser definido como la cantidad de superficie foliar soportada (m^2) por una determinada superficie de terreno (m^2) (e.g. Aguirre Salado *et al.*, 2010). El IAF es un parámetro dinámico y depende de la especie, la etapa de desarrollo, las condiciones del lugar, la estacionalidad y las prácticas de manejo, por lo que se necesita de mediciones intensivas para dar cuenta de su variabilidad espacial y temporal.

Las mediciones de IAF pueden subdividirse en dos grandes categorías: directas e indirectas (Gower *et al.*, 1999; Breda, 2003; Jonckheere *et al.*, 2004).

Las mediciones directas involucran, en la mayoría de los casos, técnicas de recolección destructiva, requiriendo mayor tiempo y costos. Las técnicas indirectas son más utilizadas, ya que sirven para el muestreo de grandes áreas de forma más rápida (Baret *et al.*, 2010). Ambas técnicas están basadas en la transmittancia de la luz dentro del cultivo (Jonckheere *et al.*, 2004; Weiss *et al.*, 2004), donde a través de la ley de Beer-Lambert, la cantidad total de radiación interceptada por una capa del cultivo depende de la radiación incidente, la estructura de la cubierta y las propiedades ópticas del tejido foliar (Monsi y Saeki, 1953 en Jockheere *et al.*, 2004).

Además del IAF, otra de las variables que permite hacer un seguimiento de los cultivos durante todo su ciclo es el Índice de Área de Planta (IAP), definido por White *et al.* (2000) como el área de la planta por área de terreno. IAF e IAP son importantes para diferentes propósitos, ambos son críticos para investigación de los impactos de las poblaciones de arbustos en la partición de precipitación en escorrentía y evapotranspiración (White *et al.*, 2000). Muchos modelos climáticos y de ecosistemas están fuertemente influenciadas por el IAF (Bonan, 1993; De Chase *et al.*, 1996) y por lo tanto se basan en estimaciones precisas.

El IAF depende de la arquitectura del dosel, y también considera las direcciones en su medición (Kucharik *et al.*, 1999). Andrieu y Baret (1993) y Baret *et al.* (1993) han demostrado que las máximas diferencias se observan a lo largo de la dirección de las mediciones en filas de maíz, cultivos de trigo y remolacha azucarera. Además, el IAF está relacionado con la probabilidad de que un haz de radiación atravesie el canopeo y llegue al suelo. Esta probabilidad es definida como fracción de brecha (gap fraction, Po) y es principalmente sensible a cualquier elemento de vegetación verde o no verdes dentro del volumen de copa, incluyendo no solo hojas, sino también los tallos y pecíolos. En consecuencia, es más adecuado para relacionar la Po con el IAP en lugar de IAF como propone Demarez *et al.* (2008), Normanand Campbell (1989), o Chen y Black (1992). A la inversa de IAF, el IAP se define como la superficie desarrollada total de todos los elementos de la planta por unidad de área de terreno horizontal, es decir, incluye troncos, ramas, tallos y elementos reproductivos independientemente de sus capacidades fotosintéticas potenciales (Burstall y Harris, 1983; Korva, 1996; Korva y Forbes, 1997).

Aprovechando la evolución que ha tenido la tecnología digital en los últimos años, es posible realizar actualmente el seguimiento del desarrollo del cultivo por medio de fotografías digitales y determinar el porcentaje de cobertura del suelo y vegetación aplicando técnicas de interpretación de imágenes (Rodríguez *et al.*, 2000). La fotografía digital se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada para la realización de mediciones, por el gran número de repeticiones posibles y la simplicidad del método, donde las imágenes pueden ser adquiridas con cámaras comerciales y posteriormente procesadas de manera sencilla con la mayoría de los ordenadores actuales, reduciendo de esta manera el gasto y el tiempo asociado a los muestreos (Jockheere *et al.*, 2004). Cabe destacar, que en toda técnica de teledetección los errores pueden ocurrir en cualquier etapa del estudio, tanto en la adquisición de la imagen o en el análisis de las mismas, por este motivo se deberían desarrollar protocolos para evitar y/o disminuir los errores de la metodología (Jockheere *et al* 2004).

El objetivo de este informe es presentar una metodología para el seguimiento de pasturas y cultivos, mediante estimación indirecta de la evolución del IAP en lotes bajo riego de 25 de Mayo, La Pampa. Si bien en este trabajo no se presentan el análisis de los errores de la estimación a través de la metodología usada, existen trabajos previos que documentan errores admisibles y correlaciones altas con el IAP medido a campo. En un cultivo de maíz Beget *et al.* (2010) cuantificaron un error cuadrático medio RMSE= 1,19 y un $R^2 = 0,92$. Por otro lado, para un cultivo de trigo Baret *et al.* (2010) obtuvieron aún mejores ajustes con el IAP medido a campo ($R^2 = 0,97$ y RMSE = 0,25).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio:

Las mediciones a campo se llevaron a cabo en lotes productivos bajo riego del Sistema de Aprovechamiento Múltiple del río Colorado en Colonia 25 de Mayo, La Pampa, Argentina. Los mismos se realizaron durante la campaña 2013-2014 en cultivos de maíz bajo riego gravitacional y alfalfa con riego por pivote central y riego gravitacional. El cultivo de maíz fue sembrado el 28/10/2013 y cosechado 20/04/2014, en tanto que el cultivo de alfalfa se sembró 15/04/2013 correspondiendo a una alfalfa

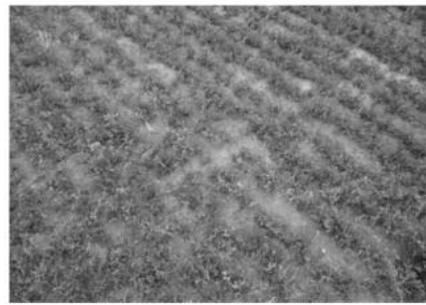
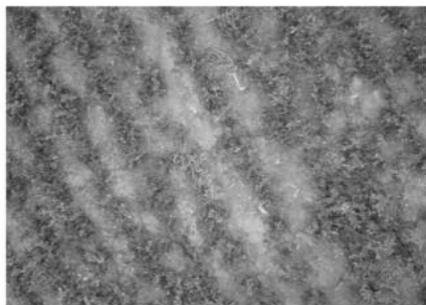


Figura 1: Fotografías a 0° (izquierda) y 57° (derecha) tomadas en los cultivos de alfalfa (arriba) y maíz (abajo).

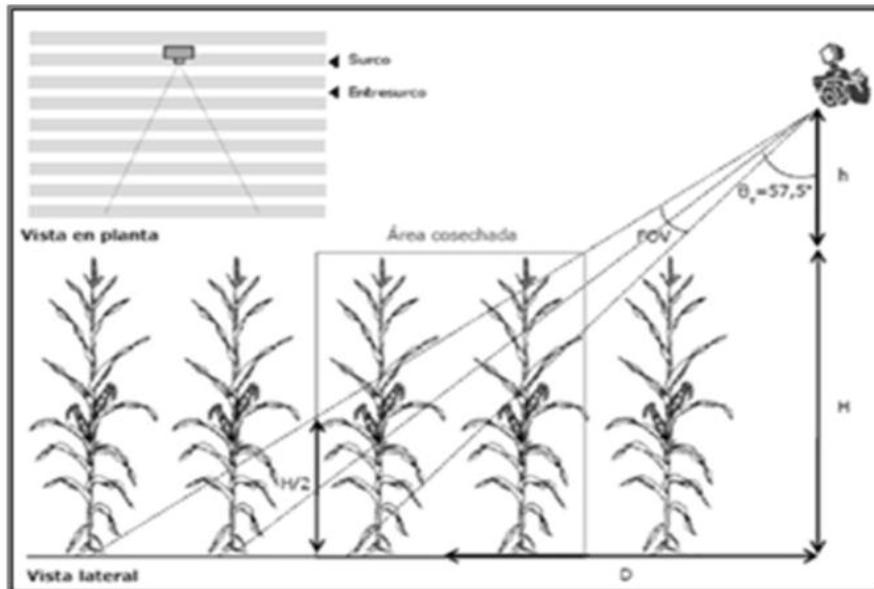


Figura 2: Esquema de adquisición de fotos en el cultivo de maíz, vista en planta y vista lateral. h : distancia entre el tope del canopeo y la cámara; H : altura del canopeo; FOV: campo de visión; D : distancia entre el operador y el centro del área a muestrear. Extraído de Beget et al., 2010.

de primer año, y las fechas de corte fueron: 22/11/2013, 25/01 y 10/03/2014.

Metodología:

Adquisición de fotografías: Con el fin de muestrear la heterogeneidad espacial de los lotes y monitorear la evolución de los cultivos, se seleccionaron 12 Unidades Elementales de Muestreo (UEM) en alfalfa y 6 en maíz.

En cada UEM, constituida por un área de $10 \times 10 \text{ m}^2$, se tomaron 20 fotografías en 5 fechas desde la siembra hasta floración para maíz, y en 9 fechas en

el caso de la alfalfa. Se utilizó una cámara digital compacta Panasonic Lumix (DMC-S1) de 12,1 megapíxeles, posicionada aproximadamente a 1 m por encima del tope del cultivo. Para la estimación de la fracción cubierta, se tomaron 10 fotos con la cámara en dirección cenital (0°), paralela al suelo. En el caso de la estimación de IAP se montó la cámara a una plataforma inclinada utilizando un nivel de burbuja, con la cámara direccionada hacia el cultivo con una inclinación oblicua ($57,5^{\circ}$) y se tomaron 10 fotos (Figura 1). En las etapas más avanzadas del cultivo de maíz, en los que el canopeo superaba los 80 cm



Figura 3: Interfaz del programa Can Eye. Ventana inicial de parametrización.

de altura, se utilizó una barra de aluminio extensora, para poder mantener la distancia (h) entre el cultivo y la cámara (Figura 2).

En el Muestreo a campo se recomienda tomar siempre el mismo número de fotografías, predeterminado antes de empezar el muestreo, en cada uno de los relevamientos. Se requiere un mínimo de 8 imágenes y un máximo de 20 para posterior procesamiento con el programa (Weiss et al, 2003). Todas las imágenes deben tener las mismas características, es decir el mismo tamaño, el mismo formato y deben estar almacenadas en el mismo directorio.

Procesamiento: En primer lugar, se realizó el preprocesamiento de las imágenes, que incluye eliminar objetos no deseados (por ejemplo, operador, destello del sol, etc), lo cual puede realizarse con cualquier programa de edición de imágenes. Se utilizó el programa gratuito Can-Eye (INRA,

<https://www4.paca.inra.fr/can-eye>), para el preprocesamiento procesamiento y de fotografías (Caja 2), con el cual se estimaron los valores de PAI.

Procesamiento de fotografías utilizando el programa Can Eye. Una vez abierto el programa, se debe indicar el tipo de foto a procesar (57° ó 0°) y la orientación (hacia arriba o hacia abajo), lo que conlleva a la selección de la carpeta que contiene las fotos en el directorio de la computadora. Luego se debe ingresar el valor del tamaño del CCD (dispositivo de carga acoplada, que figura en el manual de la cámara) de la cámara utilizada, en este caso 6.17 (Figura 3) y el formato deseado de salida (seleccionar Excel).

Seguidamente, aparece una pantalla con todas las imágenes que contiene la carpeta seleccionada y existe la posibilidad de excluir las fotografías que el usuario no desea. El programa recorta las fotos, considerando la franja central y realiza una clasificación de cada píxel en suelo o vegetación (Figura 4), donde se le debe indicar realizar clasificación por vegetación, *Green Vegetation*.

Se selecciona la opción *Green*, y automáticamente aparece una paleta de índices de brillo, verdor y marrones como se muestra en la Figura 5, los cuales se pueden modificar dependiendo del cultivo y cobertura en cada caso.

A partir de aquí se seleccionan píxeles por color, de la paleta que aparece a la derecha de la pantalla. Otra de las opciones es la selección de píxeles por área, donde se marca sobre la imagen un grupo de píxeles y luego se elige de la paleta de colores a que tonalidad pertenece. El proceso de clasificación RGB permite potencialmente discriminar entre los elementos del canopeo el verdes y no verdes (por ejemplo, hojas senescentes, sombras) con el fin de estimar el IAP (Figura 6). Mediante el procesamiento realizado, se obtiene una imagen binaria en la que se diferencia la vegetación y el suelo.

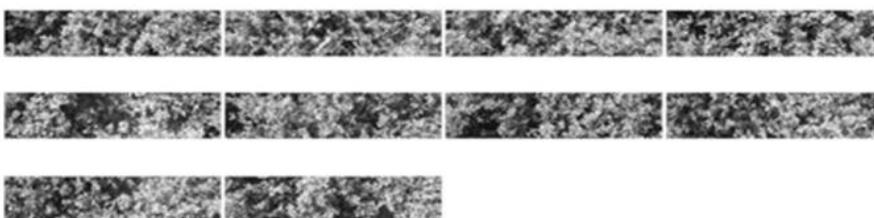


Figura 4: Fotografías recortada lista para ser clasificadas.

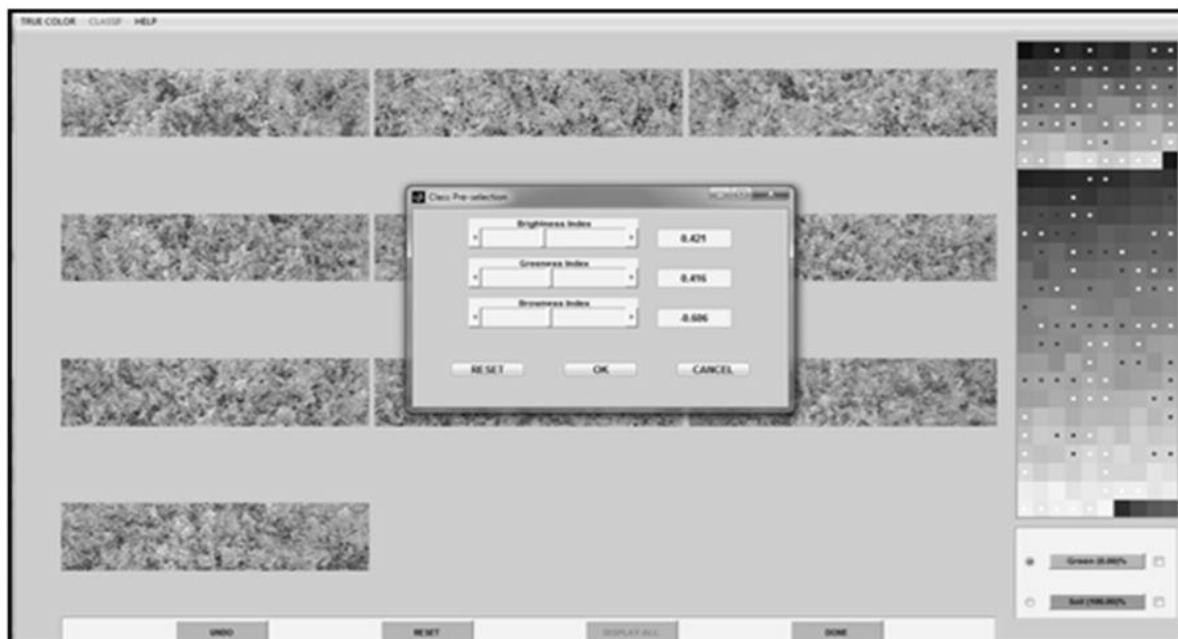


Figura 5: Panel con índices de brillo, verdor y marrones.

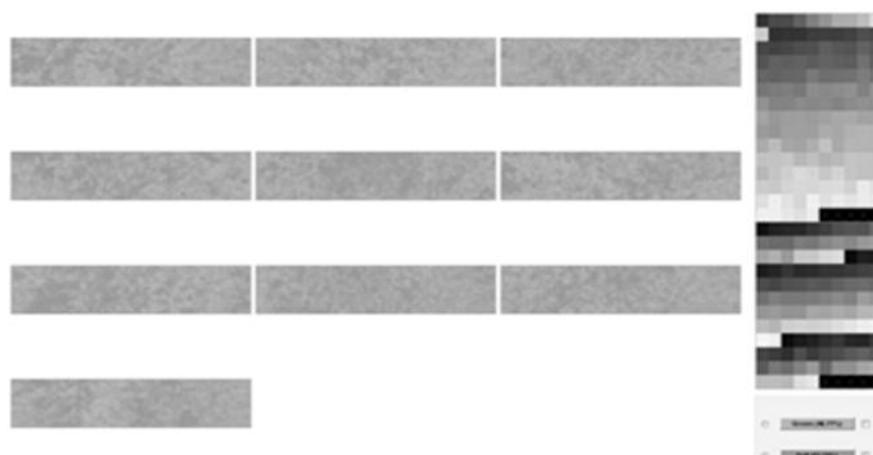


Figura 6: Fotografía clasificada en dos tonos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten describir la evolución temporal de la cobertura y el IAP del cultivo de alfalfa para dos sitios con riego por pivote central y uno gravitacional (Figura 7). Por tratarse de alfalfa para corte, se observa un ciclo de crecimiento del cultivo, correspondiente al período entre 2 cortes sucesivos con destino henificación. Tanto en el caso del IAP y como en el de la cobertura se observa las curvas características de desarrollo para el ciclo y las diferencias entre lugares con distinto potencial de rendimiento (Figura 7). Mediante el seguimiento de la cobertura del cultivo, se puede

observar que existen diferencias entre las UEM dentro del mismo pivote.

Salida del Programa Can Eye: Se genera un archivo en formato Excel oASCII (el usuario selecciona el formato al inicio del proceso), que se almacena en la misma carpeta que contiene las fotos iniciales. En caso del procesamiento de las fotos de 0º el archivo presenta los valores de fracción de cubierta vegetal para cada fotografía procesada y un valor medio de toda la serie. En las fotografías del 57º, el programa arroja un valor de cobertura y de IAP (verdadero y efectivo) para cada fotografía y el promedio de la serie.

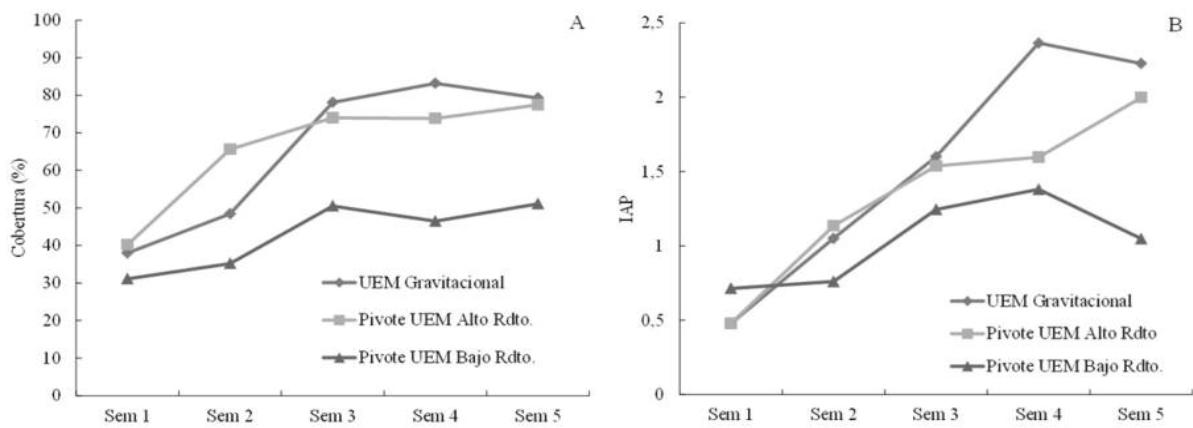
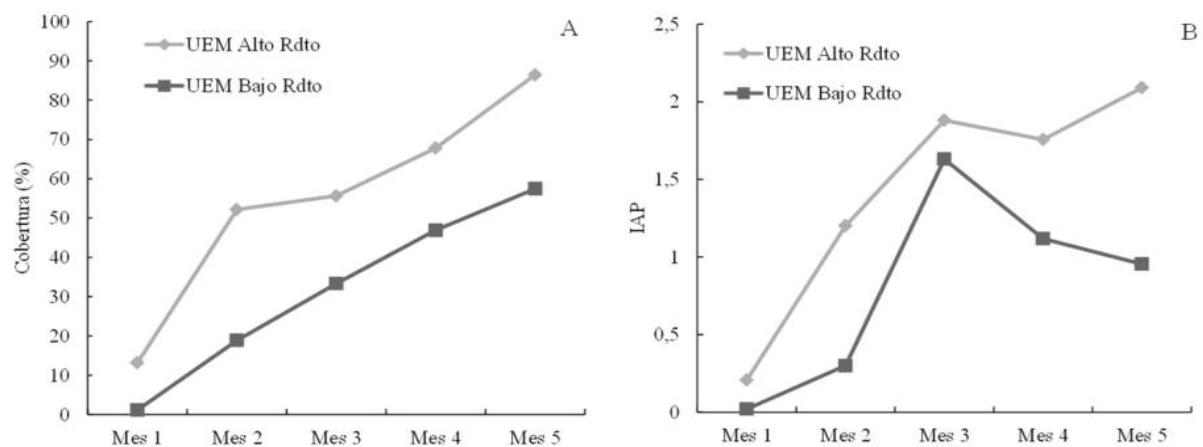


Figura 7: Evolución de la cobertura (A) y el IAP (B) IAP del cultivo de alfalfa bajo riego por pivote y gravitacional en el período de diciembre de 2013 a abril de 2014.



En el caso del maíz, se observa en la evolución de la cobertura del cultivo, el máximo valor en la primera semana de febrero correspondiendo esta con la etapa de floración (Fig. 8). La evolución del IAP presentó una tendencia creciente hasta la etapa fenológica de floración (10 de febrero, Figura 8).

Existieron errores de muestreo en los relevamientos a campo, principalmente cuando el cultivo de maíz superó 1 m de altura. Dichos errores se minimizan si se utiliza una barra extensora para que la fotografía se tome de forma vertical el cultivo sin saturarse con las hojas. En algunos casos, puede resultar difícil diferenciar las hojas verdes de la sombra del suelo o de fondos oscuros o sombreados. En ambos casos, la cantidad de píxeles con hojas verdes, que definen al IAP tienden a subestimar dicho valor.

CONCLUSIONES

Estimaciones rápidas, fiables y objetivas de IAF y cobertura son esenciales para numerosos estudios de la vegetación, siendo estos a menudo parámetros críticos del proceso de respuesta en términos de desarrollo de la cubierta vegetal. En este trabajo se presenta una metodología simple y accesible que puede ser aplicada por la comunidad de productores, investigadores y cualquier interesado en estimar la cobertura vegetal y el índice de área de planta de un cultivo, como indicador del IAF. La fotografía digital tomada en posición cenital y oblicua se propone como una técnica de medición indirecta que permite una adecuada estimación del IAP para estudios de la arquitectura del cultivo. Dicha metodología ofrece buenas perspectivas para obtener mediciones confiables del IAP en forrajes y cultivos

en líneas, pero su uso adecuado requiere de una alta intensidad de muestreo. En cuanto al procesamiento de dichas fotografías, se cuenta con el desarrollo y validación de un programa libre (Can Eye) el cual se ha utilizado en varias investigaciones.

La evaluación y comparación de los resultados obtenidos mediante la aplicación de esta metodología, y la definición de un protocolo de campo normalizado para el uso de la fotografía digital, son necesarias para mejorar esta técnica y alcanzar los estándares de un dispositivo ideal. El uso de una cámara digital, tendría el potencial de superar una serie de problemas técnicos relacionados con la estimación directa e indirecta del índice de área de planta.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al establecimiento Cabaña Curacó, a su encargado Hugo Bardoni y a Juan Pablo D'urzo de la empresa Zille Agro. A Carlos Olivella y Patricio Oricchio del Instituto de Clima y Agua, a Mónica Colipe, Noelia Colotti, Saúl Avendaño y Micaela Pérez de la AER de INTA 25 de Mayo. Este trabajo se financió con los proyectos: PNNAT 1128024 “Evaluación y seguimiento satelital del cambio global” y PRET 1282103 “Gestión de innovaciones para el desarrollo sustentable de la cuenca del río Colorado”.

BIBLIOGRAFIA

- Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J.R., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M., Aguirre-Salado, A. I. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos Spot 5 HRG: Regresión y K-NN. Agrociencia 45 (1): 105-119.
- Andrieu, B., Baret, F. 1993. Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements. In: Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Sinoquet, H. (Eds.), Crop Structure and Microclimate: Characterization and Applications. INRA, Paris, France, pp. 285-322.
- Baret, F.B., Andrieu Folmer, J.C., Hanocq, J.F., Sarrouy, C. 1993. Gap fraction measurement from hemispherical infrared photography and its use to evaluate PAR interception efficiency. In: Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Sinoquet, H. (Eds.), Crop Structure and Microclimate: Characterization and Applications. INRA, Paris, France, pp. 359-372.
- Baret, F.; de Solan, B.; Lopez-Lozano, R.; Ma Kai; 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
- Bonan, G. B. 1993. Importance of leaf area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests. Remote Sens. Environ. 43: 303-314.
- Breda, N. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany, 54, 2403-2417.
- Beget, M. E., Garcia, A., Kandus, M., Di Bella, C., Salerno, J. C. 2010. Estimación del índice de área foliar en maíz a partir de fotos digitales tomadas a un ángulo cenital de 57,5º. IX Congreso Nacional de Maíz. Rosario, Argentina.
- Burstall, L. y Harris P. M. 1983. The estimation of percentage light interception from leaf area index and percentage ground cover in potatoes. J. Agri. Sci. (Cambridge) 100: 241-244.
- Chase, T.N., Pielke, R.A., Kittel, T.G., Nemani, R., and Running, S.W. 1996. Sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index. J. Geophys. Res. 101: 7393-7408.
- Chen, J.M., Black, T.A. 1992. Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions. Agricultural and Forest Meteorology 60, 249-266.
- Demarez, V, Duthoit, S., Weiss, M., Baret, F., Dedieu, G. 2008. Estimation of leaf area index (LAI) of wheat, maize and sunflower crops using digital hemispherical photographs. Agricultural and Forest Meteorology 148: 644-655.
- Gifford, R. M., Thorne, J. H., Witz, W. D. y Giaquinta. R. T. 1984. Crop productivity and photoassimilate partitioning. Science 225: 801-808.
- Gower, S. T., Kucharik, C. J., Norman, J. M., 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, FAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. Remote Sens. Environ. 70: 29-51.
- Jonckheere, I., S., Fleck, K., Nackaerts, B., Muys, P., Coppin, M., Weiss, y F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. Agric. For. Meteorol. 121:19-35.
- Korva, J. T. 1996. Grids in ground cover measurements. Potato Res. 39: 533-540.
- Korva, J. T., y Forbes, G. A. 1997. A simple and lowcost method for leaf area measurement of detached leaves. Exp. Agric. 33: 65-72.
- Kucharik, C.J., Norman, J.M., Gower, S.T. 1999. Characterizing the radiation regime of non-random forest

canopies: theory, measurements, modeling and simplified approach. *Tree Physiology* 19: 695–706.

- Norman, J.M., Campbell, G.S. 1989. Canopy structure. In: Pearcy, R.W., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Rundel, P.W. (Eds.), *Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation*. Chapman and Hall, New York, New York, USA, pp. 301-325.
 - Rodríguez, A., de la Casa, A., Accietto, R., Bressanini, L. y Ovando, G. 2000. Determinación del área foliar en papa (*SolanumtuberosumL.*, var. Spunta) por medio de fotografías digitales conociendo la relación entre el número de pixeles y la altura de adquisición. *Rev. Bras. Agrometeorol.* 8: 215-221.
 - Watson, D. J., 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot.* 11: 41–76.
 - Weiss, M.; Baret, F.; Smith, G.J.; Jonckheered, I. y Coppin, P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination, part II: Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. and For. Met.*, 121: 37-53.
 - White, M. A.; Asner, G. P.; Nemani, R. R.; Privette, J. L.; Running, S. W. 2000. Measuring fractional cover and leaf index in arid ecosystems: digital camera, radiation transmittance, and laser altimetry methods. *Remote Sensing of Environment* 74: 45-57.
-

Uso de índices espectrales en la detección de las características de los cultivos en ambientes delimitados por diferentes características edáficas

RESUMEN

La necesidad de conocer la respuesta del cultivo al potencial de los ambientes a través de información espectral en épocas tempranas tiene un rol clave en la agricultura.

En la región semiárida, las características edáficas inciden en los contenidos hídricos de los suelos, siendo determinante en la productividad de los cultivos. El uso de tecnológicas capaces de determinar la condición del cultivo se ha convertido una herramienta clave. El espectro de la reflectancia de luz por el follaje de las plantas es un indicador preciso de la fracción de la cobertura vegetal, que está altamente asociada con la captura de la radiación y el estado nutrimental de los cultivos. El objetivo del trabajo fue evaluar el uso de índices de vegetación como el NDVI Rojo y NDVI verde obtenidos a partir de fotografías aéreas durante el estado fenológico de floración en el cultivo de maíz como indicadores de la respuesta vegetal a través de la relación entre parámetros como la materia seca aérea (MS), altura de plantas (AP) y el rendimiento de granos (RG). Los resultados del análisis de correlación a través del coeficiente de Pearson indicó que el índice NDVI verde presentó mejor relación con materia seca (0.86) y rendimiento de granos (0.78), mientras que el NDVI rojo mostró una buena relación con la variable altura de plantas (0.86). El análisis se desprende que el uso de índices de vegetación que contemplen información espectral permite establecer la condición del cultivo, ya que permitió establecer diferencias significativas entre sitios con diferencia de altitud.

Palabras clave: Índices de vegetación, imagen multiespectral, parámetros vegetales.

INTRODUCCION

En la región semiárida pampeana central de Argentina los rendimientos del cultivo de maíz presentan importantes variaciones aún dentro del mismo lote (Ghironi y otros 2012), siendo los factores que determinan la productividad del cultivo se destacan la oferta de agua y de nitrógeno (Quiroga 2012, Quiroga y otros 2006). El muestreo intensivo de suelos, con elevada cantidad de muestras, puede permitir identificar atributos del mismo que afectan la productividad pero resulta inviable para los productores por su alto costo (Farrell 2012).

Los sensores remotos, a través de diversos índices espectrales, proveen información, específica y crítica, debido a su capacidad para medir indicadores biofísicos y detectar su variabilidad espacial (ASD, 1999) y ha sido documentada como una tecnología poderosa para mediciones *in situ* de parámetros de cultivos como el IAF, contenido de clorofila en hoja, contenido de agua en la canopia, etc. (Moran *et al.*, 1994, Haboudane *et al.*, 2004 and Thomas *et al.*, 2008), permitiendo identificar áreas de similares características a un costo accesible para los productores.

En la actualidad se están utilizando tecnologías de teledetección para una gestión precisa de los cultivos, siendo clave y de interés durante los últimos años la aplicación en la detección de diferentes fenotipos para caracterizar el rendimiento a nivel de

lote agrícola. (Araus y Cairns, 2014; Liebisch *et al.*, 2015).

El enfoque clásico ha consistido en el uso de sensores multiespectrales y el desarrollo de numerosos índices de vegetación asociados con parámetros de vegetación como la biomasa aérea, la deficiencia de nutrientes y agua, el rendimiento de los cultivos (Petropoulos y Kalaitzidis, 2012). Entre los índices, el Índice de Vegetación Diferenciada Normalizada (NDVI) es el más utilizado. En cuanto al rendimiento y el contenido de nitrógeno (N) de los cultivos varios estudios han demostrado que es posible cuantificarlo satisfactoriamente utilizando datos multiespectrales tanto en los niveles aéreos como en el suelo (Barnes *et al.*, 2000; Boegh *et al.*, 2002). Numerosos autores han desarrollado indicadores a partir de la información de reflectancia obtenida a través de sensores remotos. La respuesta espectral obtenida mediante sensores remotos permite obtener información del status de nitrógeno en hoja, área foliar y biomasa proporcionando características del estado fisiológico de la planta (Ritchie, 2003).

El objetivo del trabajo fue evaluar la relación entre la respuesta espectral proveniente índices de vegetación generados a partir de fotografías aéreas multiespectrales de alta resolución espacial y los componentes vegetales como el rendimiento de granos (RG), altura de plantas (AP), peso de y materia seca total (MS) en el cultivo de maíz sobre ambientes delimitados por diferencias en altimetría.

MATERIALES Y METODOS

La experiencia se realizó durante la campaña agrícola 2012-13 en el área central de Argentina (S 35° 45' 50.7" W 63° 35' 37.7 sobre el cultivo de maíz (*Zea mais*)

Los suelos se caracterizan por no poseer limitantes en la profundidad del perfil, de textura arenosa-franca y con contenidos medios a bajos de materia orgánica (MO). (Bono 1999). En el lote se georreferenciaron dos sitios identificados como L y B con diferencias de altimetría entre ambientes. La identificación de los sitios se realizó a partir de un relevamiento planialtimétrico, utilizando un GPS

Diferencial Trimble. Los datos obtenidos se procesaron utilizando el software GV SIG a través del uso de la herramienta de interpolación mediante el método Kriging generando un modelo digital de elevaciones (MDE). A partir de esta información se realizó la delimitación de sitios por rangos de altimetría. Para evaluar la respuesta espectral entre sitios se tomó una fotografía aérea multiespectral obtenida desde un avión tripulado durante el estadio fenológico de floración del cultivo. La fotografía se obtuvo a través de una cámara Tretacam MCA multiespectral que posee un sensor con un filtro de banda estrecha especificado que se inserta entre la lente y el sensor permitiendo obtener información espectral en la banda verde (550 nm, banda roja (660 nm y banda infrarroja (800 nm).

La altura de vuelo al momento de la toma de la fotografía fue de 2500 m, logrando una resolución espacial de 2 m.. La fotografía fue georeferenciadas a través de puntos de control y proyectadas a Gauss Kruger faja 4.

Con el uso del software libre GV SIG se obtuvo la información de cada banda y a través de la herramienta álgebra de mapas se confeccionaron los diferentes índices a evaluar que se detallan en la Tabla 1.

El híbrido utilizado fue DK 700 y la fecha de siembra fue el 29 de noviembre de 2012.

En cada ambiente se georeferenciaron 6 puntos donde se extrajeron muestras de suelo de 0 a 20 cm de espesor para determinar las fracciones granulométricas (sedimentación), materia orgánica total (MOT, Walkley y Black), fósforo extractable (P, Bray y Kurtz). En muestras de 0-20 cm y 20-60 cm se determinaron los contenidos de nitrógeno de nitratos (Ac. Cromotrópico). Se determinó la disponibilidad hídrica de los suelos (método gravimétrico) al momento de la siembra y durante los estados fenológicos de V6, floración y final del llenado de granos del cultivo en intervalos de 20 cm hasta los 200 cm de profundidad. Entre los estadios de floración y madurez fisiológica y en cada sitio de muestreo se determinaron los contenidos de biomasa aérea y altura de plantas. En el momento de cosecha se extrajeron muestras sobre una superficie de 5,2 m². Estas muestras fueron trilladas, pesadas y acondi-

| | | |
|------------|-------------------------------|---------------------------|
| NDVI rojo | (NIR - ROJO) / (NIR + ROJO) | Rouse, et al. 1973 |
| NDVI verde | (NIR - VERDE) / (NIR + VERDE) | Gitelson y Merzlyak, 1998 |

Tabla 1: Índices de vegetación utilizados en el trabajo.

cionadas en laboratorio para determinar el peso de 1000 g y el número de granos por m². La determinación del porcentaje de humedad de las muestras trilladas se realizó con un higrómetro Tesma Campo. Los datos de humedad tomados al momento de la trilla sirvieron para realizar el ajuste del rendimiento. Los estados fenológicos fueron determinados utilizando la escala desarrollada por Ritchie y Hanway, 1982.

Los resultados se analizaron análisis de correlación, análisis de la varianza (ANOVA) y test de diferencia de medias LSD Fisher con el Software Infostat (Di Rienzo *et al.* 2011).

RESULTADOS

Delimitación de ambientes

El modelo digital de elevaciones elaborado a partir de los datos de DGPS muestra alta variabilidad espacial, lo que las diferencias alcanzan valores de 4 m entre el valor máximo y mínimo.

La Figura 1 muestra un detalle de la localización del ensayo, donde se evidencia la diferencia de altimetría entre sitios. En el ambiente L se sitúan los puntos L 1 al L 6, mientras que el ambiente B se observan los puntos B 1 al B 6.

En la Tabla 2 se muestran las características edáficas de los ambientes delimitados, lo cual indica que el ambiente L presenta menores contenidos de P, NO₃ y MOT. Así mismo, los contenidos texturales presentan un 11% más de arenas que el ambiente B.

Las precipitaciones en el mes de diciembre fueron inferiores en un 57 % respecto del promedio histórico de la zona en el periodo 1921-2010., mientras que en los meses de enero, febrero y marzo las precipitaciones resultaron superiores en un 86 %, 31 %

y 84 % respectivamente. En la Tabla 3 se muestran los contenidos de agua en el suelo para todos los estadios relevados, donde fueron mayores para los sitios B, lo que sugiere que la presencia de sitios con contenidos texturales con mayores contenidos de arenas condiciona la capacidad de retención de agua (CRA) del suelo. En este aspecto, el índice IMO que se define como la relación entre el porcentaje de MO y el porcentaje de A+L da una característica de la calidad de los ambientes. Valores de IMO altos se relacionan con ambientes de buenas condiciones. Un nivel particular de MO puede resultar alto, medio o bajo, dependiendo de la textura del suelo. En suelos de la región semiárida pampeana, con buen manejo y prácticas agronómicas adecuadas, el valor del IMO debería ubicarse por encima de 5 (en un rango de 2 a 12, aproximadamente) (Quiroga, A.; comunicación personal). Un valor de IMO por debajo de este umbral sugiere la pérdida de MO en relación a la fracción arcilla+limo del suelo (Ar+Li).

Suelos con menor IMO pueden condicionar el rendimiento de los cultivos, la respuesta a la fertilización y la eficiencia de uso del agua. (Quiroga *et al.*, 2006) encontraron que ambientes con alta relación de la MO con arcilla + limo (IMO) presentaron una relación directa y positiva con la CRA.

El rendimiento de maíz responde positivamente a un aumento en la cantidad de agua y N aplicado hasta un nivel óptimo correspondiente al rendimiento máximo (Liu y Zhang, 2007; Zand-Parsa y Sepaskhah, 2001).

En la Tabla 4 se muestra los valores promedio de los parámetros vegetales relevados a campo en los 2 ambientes bajo estudio. Todas las variables relevadas muestran valores altos en el sitio B, lo cual sugiere que su comportamiento es dependiente del contenido hídrico del suelo.

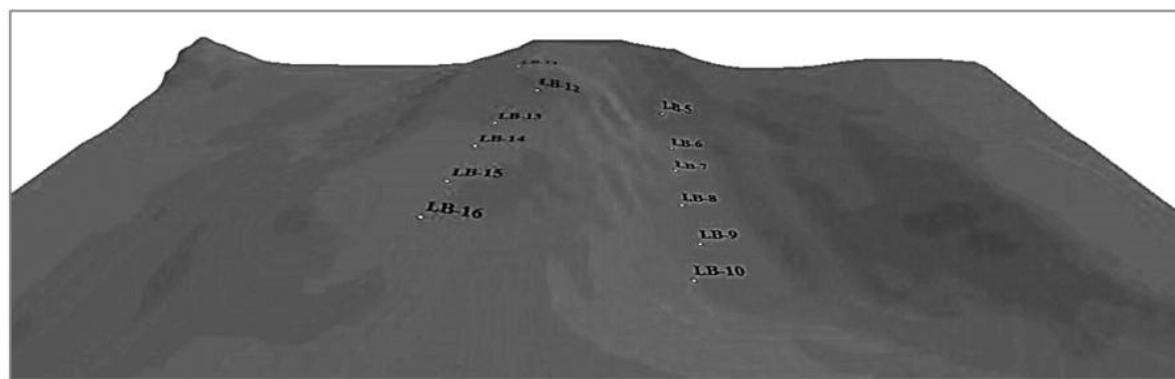


Figura 1: Mapa generado a partir del MDE.

Tabla 2: Información química y física de los sitios evaluados.

| Ambiente | 0-20 cm P(Tn/ha) | 0-20 cm. NO ₃ (Tn/ha) | 20-60 cm. NO ₃ (Tn/ha) | MOT (Tn/ha) | Arcilla (%) | Limo (%) | Arena (%) | A+L (%) |
|----------|---------------------|--|--|----------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| L | 55.21 | 1.29 | 3.09 | 16.95 | 2.17 | 6.17 | 91.67 | 8.33 |
| B | 38.54 | 4.50 | 10.79 | 26.52 | 2.00 | 15.83 | 82.17 | 17.83 |

| | Ambiente B | | Ambiente L | |
|-------------------------|------------|--------|------------|--------|
| | SN | CN | SN | CN |
| AU Siembra 30 noviembre | 281.98 | 258.80 | 100.37 | 100.58 |
| AU estadio V6 3 enero. | 237.04 | 215.42 | 61.74 | 74.20 |
| AU R2 3 febrero | 223.52 | 229.36 | 70.04 | 60.52 |
| AU MF 30 mayo | 505.57 | 507.86 | 106.69 | 123.58 |

Tabla 3: Contenidos hídricos de los sitios evaluados.

| | Ambiente L | | Ambiente B | |
|----------------------|------------|---------|------------|---------|
| | SN | CN | SN | CN |
| Altura plantas (cm) | 171a | 189b | 210c | 220c |
| Materia seca (Kg/ha) | 2974.4a | 4343.4b | 4792.9b | 6232.5c |
| Rendimiento (Kg/ha) | 2505.2a | 5869.9b | 4678.9c | 8055.8d |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Tabla 4: Valores promedio de los parámetros vegetales relevados a campo.

Dentro de los tratamientos se observa valores superiores para el tratamiento CN de ambos sitios, lo que pone de manifiesto que las deficiencias de nitrógeno en el cultivo de maíz como lo que se manifiesta en los tratamientos SN de ambos ambientes trae aparejado una merma en IAF de alrededor de un 60% (Uhart y Andrade, 1995b). El estrés por sequía reduce la altura de la planta (Soler *et al.*, 2007), área foliar (Pandey *et al.*, 2000), fotosíntesis foliar (Shangguan *et al.*, 2000), crecimiento de brotes y rendimiento de grano (Zand-Parsa *et al.*, 2006), mientras que la deficiencia en N provoca una reducción en la producción de biomasa, debido a una menor radiación interceptada por el cultivo que modifica la tasa de expansión de las hojas (Muchow, 1998) afectando el IAF y el contenido de clorofila (Majnooni-Heris *et al.*, 2011; Ding *et al.*, 2005).

Para la variable rendimiento se obtuvo una respuesta mayor para el tratamiento CN del ambiente L respecto del mismo tratamiento del ambiente B.

Análisis de la información espectral

Las evaluaciones de cultivos a través de sensores remotos se basan en la interrelación entre las

características de los cultivos y la reflectancia del dosel en el rango visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio.

En la Figura 2 se muestra los mapas de los índices generados a partir de la obtención de la fotografía aérea relevada durante el estadio fenológico de floración del cultivo.

Análisis de correlación con parámetros vegetales

La Tabla 5 muestra el análisis de correlación entre la respuesta de los IV evaluados y los parámetros vegetales. El NDVI Rojo presentó en general buena relación con todas las variables relevadas, mostrando una $R^2 = 0.86$ con la altura de plantas ($P > 0.001$). El NDVI Verde es el IV de mejor performance, lo cual indica altos valores de correlación con los parámetros vegetales determinados a campo.

CONCLUSIONES

Los índices de vegetación construidos a partir de la fotografía aérea tomadas durante el estadio de floración presentaron relaciones consistentes con

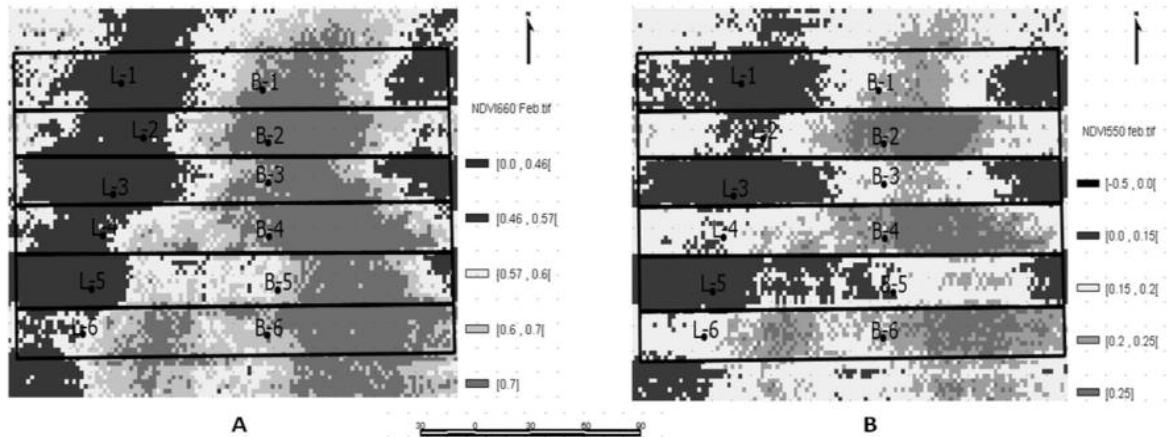


Figura 2: Mapas de IV obtenidos en el estadio de floración del cultivo A) NDVI Rojo, B) NDVI Verde-

Tabla 5: Coeficientes de correlación entre los valores de IV evaluados y los parámetros vegetales.

| | Rendimiento granos (Kg/ha) | Altura. plantas (cm) | MS total (Kg/ha) |
|------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------|
| NDVI Rojo | 0.66 | 0.86 | 0.79 |
| NDVI Verde | 0.78 | 0.75 | 0.82 |

los parámetros vegetales relevados a campo. La variabilidad observada en las características de los cultivos y detectada en los índices utilizados obedece a las diferencias en los contenidos hídricos condicionados por la altimetría y las características edáficas de los ambientes bajo estudio.

BIBLIOGRAFIA

- Araus J. L., Cairns J. E. 2014. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends Plant Sci.* 19, 52–61. 10.1016/j.tplants.2013.09.008 [PubMed] [Cross Ref]
- ASD (Analytical Spectral Devices). 1999. Technical guide. Analytical Spectral Devices. Boulder, CO, USA.
- Barnes E. M., Clarke T. R., Richards S. E., Colaizzi P. D., Haberland J., Kostrzewski M., et al. 2000. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data, in Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture (Bloomington, MN:), 16–19.
- Boegh E., Søgaard H., Broge N., Hasager C. B., Jensen N. O., Schelde K., et al. 2002. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sens. Environ.* 81, 179–193. 10.1016/S0034-4257(01)00342-X [Cross Ref]
- Bono, A.; J. Montoya y F. Babinec. 1999. Fertilización en Girasol. Resultados de tres años de estudio. Publicación técnica nº 48. EEA Anguil. INTA Argentina.
- Ding, L., Wang, K.J., Jiang, G.M., Biswas, D.K., Xu, H., Li, L.F., Li, Y.H., 2005. Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years. *Ann. Bot.* 96, 925-930.
- Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, and C. W. Robledo. InfoStat versión. 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Farrell M. 2012. Estudio de la temperatura de la cobertura vegetal e índices de vegetación en girasol en ambientes con deficiencias hídricas. Publicación técnica Nº 90 Ediciones INTA. pp 15-20.
- Ghironi E., Corró Molas A., Gili A., Hevia E., Reinoso H. 2012. Manejo sitio específico de densidades en los cultivos de girasol, maíz y sorgo en región semiárida pampeana central. Publicación técnica Nº 90 Ediciones INTA. pp 21- 55.
- Gitelson, A. A. and M. N. Merzlyak. 1998. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int. J. Remote Sens.* 18: 2691-2697.
- Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., & Strachan, I. B. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337–352.
- Liebisch F., Kirchgessner N., Schneider D., Walter A., Hund A. 2015. Remote, aerial phenotyping of maize traits with a mobile multi-sensor approach. *Plant Methods* 11, 9. 10.1186/s13007-015-0048-8 [PMC free article] [PubMed] [Cross Ref].
- Liu, W.Z., Zhang, X., 2007. Optimizing water and fertilizer input using an elasticity index: a case study with maize in

- the loess plateau of china. *Field Crops Res.* 100, 302-310.
- Majnooni-Heris, A., Zand-Parsa, Sh., Sepaskhah, A.R., Kamgar-Haghghi, A.A., Yasrebi, J., 2011. Modification and validation of maize simulation model (MSM) at different applied water and nitrogen levels under furrow irrigation. *Arch. Agron. Soil Sci.* 57, 401-420.
 - Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., & Vidal, A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49, 246–263.
 - Muchow, R. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. I. Leaf growth and leaf nitrogen. *Field Crops research*, 18: 1-16.
 - Quiroga A. 2012. Necesidad de jerarquizar y categorizar factores que afectan la producción y sustentabilidad. Publicación técnica Nº 90 Ediciones INTA. pp 5-9.
 - Quiroga A., Ormeño O. y Rojas S. 2006. Respuesta ambiental de maíz ante diferentes tecnologías aplicadas en la zona semiárida. Boletín de divulgación técnica Nº 91. Ediciones INTA. pp 1-9.
 - Pandey, R.K., Maranville, J.W., Admou, A., 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. *Agric. Water Manage.* 46, 1-13.
 - Petropoulos G. P., Kalaitzidis C. 2012. Multispectral vegetation indices in remote sensing: an overview. *Ecol. Model* 2, 15–39.
 - Ritchie, S.W., J.J. Hanway.1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special Report Nº 48.
 - Ritchie, L. G. 2003. Use of ground- based canopy reflectance to determine ground cover, nitrogen and water status and final yield in wheat. Utah State University. Logan, UT, USA.
 - Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55, 95–107.
 - Rouse, J. W., R.H. Hass, J. A. Schell, and D. W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA. NASA SP 1: 309-317.
 - Shangguan, Z.P., Shao, M.A., Dyckmans, J., 2000. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat. *Environ. Exp. Bot.* 44, 141-149.
 - Soler, C.M.T., Hoogenboom, G., Sentelhas, P.C., Duarte, A.P. 2007. Impact of water stress on maize grown off-season in a subtropical environment. *J. Agron. Crop Sci.* 193, 247-261.
 - Thomas, V., Treitz, P., Mccaughey, J. H., Noland, T., & Rich, L. 2008. Canopy chlorophyll concentration estimation using hyperspectral and lidar data for a boreal mixed-wood forest in northern Ontario, Canada. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1029–1052.
 - Uhart, S.; Andrade, F. 1995b. Nitrogen deficiency in maize: I Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Science*, 35: 1376-1383.
 - Zand-Parsa, S., Sepaskhah, A.R., 2001. Optimal applied water and nitrogen for maize. *Agric. Water Manage.* 52, 73-85.
 - Zand-Parsa, S., Sepaskhah, A.R., Rownaghi, A. 2006. Development and evaluation of integrated water and nitrogen model for maize. *Agric. Water Manage.* 81, 227-256.
-

*Nivel
Predial:
Caso*

5

Análisis espacio-temporal en la productividad de los cultivos en la Región Semiárida Pampeana

RESUMEN

En la región semiárida, las disparidades de las precipitaciones inciden en los contenidos hídricos de los suelos, que determinan cierta irregularidad en la productividad de los cultivos. Por otra parte, los ambientes poseen limitantes naturales que provocan diferencias en los contenidos hídricos. El objetivo del trabajo es evaluar el uso de historia de mapas de rendimiento para analizar la variabilidad espacio-temporal y su efecto sobre el rendimiento de los cultivos en la región semiárida pampeana. Con 5 años de datos de rendimiento de un lote agrícola del NE de La Pampa se realizó un estudio espacio-temporal a través de un análisis de correlación entre el rendimiento y las precipitaciones distribuidas en diferentes períodos: barbecho largo (BL), barbecho corto (BC), crecimiento vegetativo del cultivo (CC), floración (F) y llenado del grano (LLG).

Los resultados muestran una buena correlación entre el rendimiento y las precipitaciones ocurridas en el período de BL en los ambientes de baja altitud, mientras que en el período de LLG los valores de correlación (> 0.7) se registraron en ambientes de mayor altitud.

Palabras Clave: mapa de rendimiento, precipitaciones, región semiárida, correlación.

INTRODUCCION

El factor que más afecta el rendimiento en las regiones semiáridas es la variabilidad de la humedad contenida en el perfil edáfico (Cantero-Martínez

et al., 2003; Zhu *et al.*, 2013).

La disponibilidad de agua para los cultivos donde las precipitaciones no están uniformemente distribuidas y se producen largos períodos de sequía, depende de las condiciones del suelo para almacenar agua de manera eficaz durante el barbecho (Fengrui *et al.*, 2000; Fernández *et al.*, 2008; Moret *et al.*, 2006). Entre los atributos más importantes que determinan la eficiencia de almacenamiento de agua son la textura del suelo (Kurwakumire *et al.*, 2014; Tremblay *et al.*, 2012), la profundidad del suelo (Kurwakumire *et al.*, 2014; Tremblay *et al.*, 2012); Fernandez *et al.*, 2008; Grealish and Fitzpatrick, 2014; Sadras and Calviño, 2001) y la topografía (Tagarakis *et al.*, 2012; Urricariet *et al.*, 2011). Estos factores también influyen en el ciclo de nitrógeno (Gregory *et al.*, 2006; Porporato *et al.*, 2003; Savin *et al.*, 2001) y crea una heterogeneidad espacial de los contenidos de nitrógeno disponibles, lo que aumenta la variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos como se determina por diferentes regímenes de humedad del suelo. Por lo tanto, en años secos la variabilidad de rendimiento de los cultivos es considerablemente mayor que en las estaciones húmedas (Kravchenko *et al.*, 2005).

La interacción entre las condiciones de suelo y clima también afecta fuertemente la respuesta a la adición de fertilizantes, especialmente en años secos (Hoffmann *et al.*, 2015). Por lo tanto, es necesario estudiar esta interacción a fin de mejorar la capacidad de predecir rendimientos de los cultivos y la respuesta al manejo de fertilizantes sitio- específica. Al respecto, Basso *et al.* (2012) utilizaron mapas de rendimiento de un lote agrícola correspondiente

a un ambiente mediterráneo e identificaron las zonas de alto y bajo rendimiento y de la estabilidad del rendimiento diferente según variabilidad de las precipitaciones. El objetivo del trabajo es evaluar el uso de historia de mapas de rendimientos para analizar la variabilidad espacio-temporal y su efecto sobre el rendimiento de los cultivos en la región semiárida pampeana.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se llevó a cabo en un lote de 50 hectáreas ubicado al NE de la provincia de La Pampa, Argentina (37.76° S, 63.60° W, 123,2 MNM) durante cinco campañas agrícolas. Los cultivos utilizados fueron maíz (*Zea mais*) (2007/2008, 2009/2010, 2011/2012) y girasol (*Helianthus annuus*) (2008/2009 y 2010/2011). El suelo se caracteriza como Haplustol entico de textura franco arenoso, según el US Soil Taxonomy (USDA NRC, 2014), con contenidos bajos de materia orgánica. La precipitación media anual es de 650 mm (1940-2012), distribuidos en primavera y otoño. La temperatura media anual es de 20°C , con 35°C máximo mensual para el mes de enero y 11°C mínima para el mes de julio.

Para detectar ambientes con diferencia topográfica se realizó un modelo digital de terreno (MDT) a partir de datos aportados por Differential Global Positioning Systems (DGPS) con precisión submetrómico. Con los datos obtenidos se creó una base de datos con valores X, Y y Z, corregidos por la altura ortometrómica. Posteriormente, con el uso del software GV SIG (<http://www.gvsig.org>) se realizó el MDT con una resolución espacial de 5m.

Para generar el mapa se utilizó el método de interpolación Kriging (Krige, 1951), cuyo método requiere de la estimación de la dependencia espacial mediante la realización de un semivariograma que grafica la correlación espacial entre los datos en función de la distancia entre ellos. (Journel y Huijbrets, 1978).

Los mapas de rendimiento fueron obtenidos de una máquina cosechadora equipada con un sistema de DGPS y monitor de rendimiento (flujo de masa de granos y sensor de humedad). Los datos de rendimiento registrados por el monitor se asocian a la coordenada de posición. La lectura de los mapas de rendimientos obtenidos desde la cosechadora se realizó con el software de SMS 3.0 (Ag Leader Technology, Inc), expresando el rendimiento ajusta-

do a 14% de humedad. Posteriormente, los puntos de rendimientos se procesaron para eliminar valores de rendimiento improbable y atípico utilizando el valor promedio \pm el desvío estándar.

Con los puntos corregidos se obtuvieron mapas de rendimiento elaborados a partir del método de interpolación lineal, la resolución espacial 5 m. Los mapas se registraron en Transverse Mercator (TM) 84 Gauss Kruger faja 4.

Las precipitaciones totales anuales para cada campaña agrícola fueron distribuidas en períodos llamados: barbecho largo (BL) considerado desde el mes de marzo a fines de agosto, barbecho corto (BC) desde el mes de septiembre hasta la fecha de siembra del cultivo, crecimiento vegetativo del cultivo (CC) desde la fecha de siembra del cultivo hasta inicios del estado reproductivo, floración (F) corresponde al periodo comprendido entre el inicio del estado reproductivo del cultivo y el estadio de R1 para el cultivo de maíz y R2 a R6 para el cultivo de girasol. El periodo de llenado del grano (LLG) fue considerado desde el estadio de R2 hasta el estadio de R5 para maíz y R6 a R7 para girasol.

La longitud en días de los períodos difiere según el tipo de cultivo y la fecha de siembra.

Posteriormente se realizaron análisis de correlación entre el rendimiento y la precipitación ocurrida en cada periodo.

Se utilizó el coeficiente de Pearson calculado a partir de Infostat (Di Rienzo, 2011) para analizar la correlación. Los mapas espaciales fueron creados desde GV SIG 1.12.

RESULTADOS

El mapa de altimetría obtenido a partir del relevamiento planialtimétrico se puede observar en la Figura 1. Los valores máximos y mínimos hallados corresponden a 122 y 124.5 m respectivamente. A partir de la información generada queda definido sitios de baja altitud comprendido en el rango de 122 y 123 m, el cual posee un área de 13 has. Otro ambiente denominado de altitud media, cuyos valores rondan los 123 y 123.2 m, siendo su área de 26 has. El resto, denominado ambientes de lomas, que posee una superficie de 13 has y su valor de altimetría oscila entre 123.2 y 124.5 m.

La Tabla 1 muestra la distribución de la precipitación anual en los 5 períodos determinados anteriormente, observando la campaña agrícola 2008-09

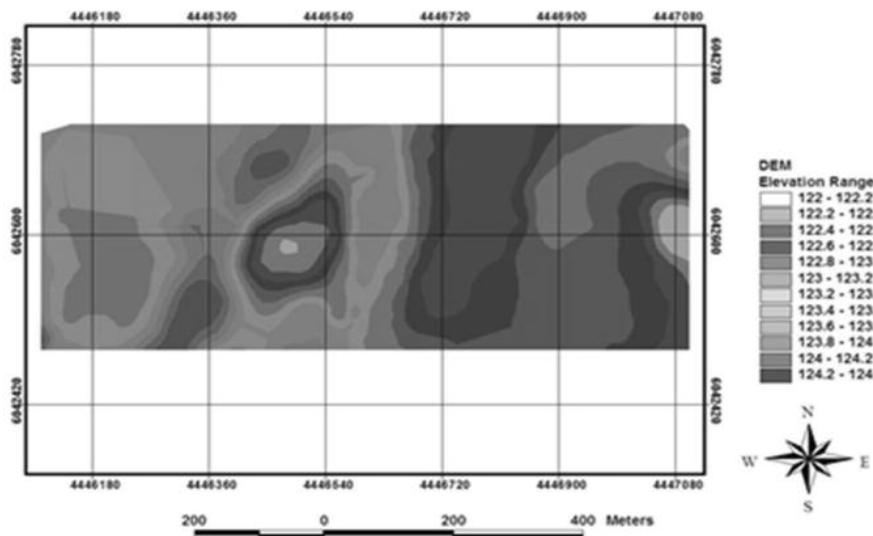


Figura 1. Modelo digital del terreno del área de estudio.

como la de menos régimen pluviométrico anual (441 mm), mientras que la campaña 2011-12 fue la que registró mayor precipitación respecto a las otras campañas (1238 mm).

La regularidad de las precipitaciones durante los períodos muestra a la campaña 2007-08 como la menos variable ($DE \pm 22.5$ mm), mientras que la más variable fue la campaña 2008-09 ($DE \pm 112.3$ mm). En particular, este comportamiento es una característica de ambientes semiáridos, que generalmente se produce por precipitaciones muy variables y escasas, y se recibe poca o ninguna lluvia durante las etapas críticas de crecimiento del cultivo, lo que resulta en bajos rendimientos (Asseng, Turner y Keating, 2001; Kar, Kumar y Martha, 2007; Monti y Venturi, 2007). Por otra parte, la alta variabilidad en los patrones de lluvia puede ocasionar excesos que condicionan los contenidos hídricos en el suelo, produciendo un efecto adverso para el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Angus *et al.*, 1980; Sadras, 2002). Dentro de los períodos también se observa alta variabilidad.

Durante la temporada 2007-08, en maíz, se produjeron rendimientos promedio de 5.6 Tn ha^{-1} con un total de precipitaciones de 576 mm (Figura 2a),

mientras que para la campaña agrícola 2009-10, el rendimiento medio fue superior a 6.5 Tn ha^{-1} (Figura 2c) cuando la precipitación fue de un total de 708 mm.

Sin embargo, para la temporada 2011-12 (Figura 2e) hubo un exceso de precipitaciones durante el período de floración y llenado de granos, registrando 542 mm. Esta situación redujo los rendimientos llegando a un valor de 5.39 Tn ha^{-1} . Durante los períodos en los cuales se cultivó girasol, la precipitación total fue prácticamente la misma para ambos años, sin embargo, hubo una diferencia en el rendimiento promedio debido a la distribución de las precipitaciones. Durante la temporada 2011, la precipitación para el período de barbecho y floración fue de 175 y 101 mm más que en el mismo período de 2009. Sin embargo, para el período de floración se registró un aumento en el nivel de precipitación para el año 2009 del orden de 195 mm que no se reflejó en un aumento del rendimiento.

En la temporada 2012-11 (Figura 2d) de girasol tuvo un rendimiento promedio de 2.9 Tn ha^{-1} con una contribución de 194 mm de precipitación durante el período de barbecho corto, que muestra la importancia del agua almacenada en el suelo, que consti-

| | Año | BL | BC | CC | F | LLG | Total precipitación |
|---------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|
| Maiz | 2007-2008 | 155 | 118 | 113 | 107 | 83 | 576 |
| Girasol | 2008-2009 | 40 | 19 | 284 | 78 | 20 | 441 |
| Maiz | 2009-2010 | 82 | 109 | 348 | 73 | 96 | 708 |
| Girasol | 2010-2011 | 2 | 194 | 89 | 179 | 12 | 476 |
| Maiz | 2011-2012 | 194 | 170 | 332 | 309 | 233 | 1238 |

Tabla 1: Distribución de la precipitación (mm) durante los estadios de barbecho, etapa vegetativa, floración y llenado de granos para las campañas en estudio.

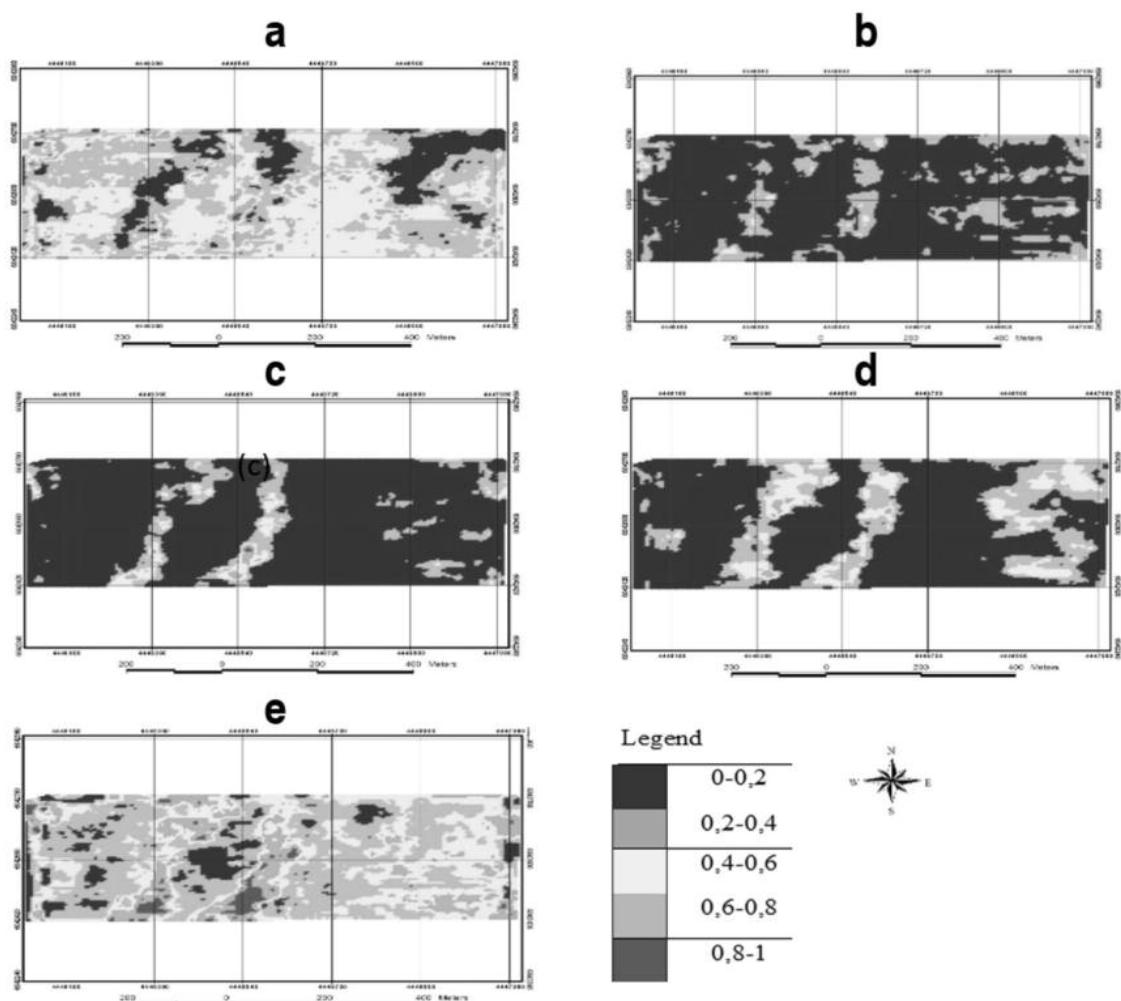


Figura 3: Mapas de correlación espacial entre rendimiento de granos y las precipitaciones ocurridas durante BL (a), BC (b), CV (c), FL (d) y LLG (e). Los colores representan diferentes valores del Coeficiente de Pearson de acuerdo con la leyenda.

tuye el 30% de las necesidades de agua del cultivo durante el cultivo en crecimiento, la floración y la estación de llenado de grano (Díaz Zorita y Duarte, 1997). Durante 2008-09, el rendimiento promedio de girasol fue considerablemente inferior a 1,84 Tn ha⁻¹, con un rango entre 1,5 y 2,5 Tn ha⁻¹ para las zonas de alta y baja de altitud, respectivamente (Figura 2b).

El comportamiento del rendimiento fue diferente en algunos años. En ambientes semiáridos, durante los años con precipitaciones normales los rendimientos altos se manifiestan en sitios de baja altitud y decrecen en ambientes más altos (Rockstrom et al 1999; Stone, 1985). Sin embargo, cuando se manifiesta un mayor nivel de precipitación la tendencia suele ser a la inversa. La causa se

debe al movimiento del agua pendiente abajo y mejores condiciones del suelo en sitios de menor altitud, que en años húmedos, generan condiciones de saturación (Kaspar, 2004; Kutcher, 2005).

La Figura 3 muestra el mapa de correlación espacial entre el rendimiento y las precipitaciones ocurridas durante las etapas de barbecho, etapa de crecimiento, floración, y llenado del grano, durante las 5 campañas agrícolas en estudio.

La correlación entre rendimiento y las precipitaciones ocurridas en el periodo de BL indica que los valores mayores a 0.5 ($p < 0.05$) del coeficiente de Pearson corresponden a ambientes con altitud media, mientras que los ambientes con valores de altitud alta, los valores del coeficiente variaron entre 0 y 0.2 ($p < 0.05$). En los periodos de BC, CC y F los

valores del coeficiente de Pearson varían entre 0 y 0,5 ($p < 0.05$) mostrando que en los ambientes de mayor altitud, el rendimiento es dependiente de las precipitaciones.

En el periodo LLG los valores de coeficiente de Pearson para los ambientes de mayor altitud alcanzan valores entre 0,8 y 1 ($p < 0.05$), lo cual indica la fuerte dependencia de las precipitaciones durante el periodo en que dura la etapa de llenado de granos. En ambientes de menor altitud se observa valores bajos del coeficiente de Pearson (menores a 0,4), lo cual indica que el aporte de agua por precipitaciones no afecta al rendimiento final.

CONCLUSIONES

La alta variabilidad de las precipitaciones detectada entre años y dentro del año es una característica de la región semiárida y afecta a los cultivos de manera diferente. Los mapas de correlación espacial son un método acorde para estimar las características espacio-temporales del rendimiento e indican, no solo que ambientes son los dependientes de la condición hídrica, sino también los momentos o períodos claves en los que se necesita aporte hídrico. Esto permitirá mejorar aspectos de manejo del agua a través del impulso de nuevas tecnologías que ayuden a captar con mejor eficiencia el agua aportada por las lluvias, como así también mejoras en la infiltración del agua de escorrentía provocada por las precipitaciones.

BIBLIOGRAFIA

- Basso, B., Fiorentino, C., Cammarano, D., Cafiero, G., Dardanelli, J., 2012. Analysis of rainfall distribution on spatial and temporal patterns of wheat yield in Mediterranean environment. European Journal of Agronomy 41, 52–65. doi:10.1016/j.eja.2012.03.007
- Calviño, P.A., 1999. Interannual variation in soybean yield : interaction among rainfall , soil depth and crop management. Field Crops Research 63, 237–246.
- Cantero-Martínez, C., Angas, P., Lampurlanés, J., 2003. Growth, yield and water productivity of barley (*Hordeum vulgare L.*) affected by tillage and N fertilization in Mediterranean semiarid, rainfed conditions of Spain. Field Crops Research 84, 341–357. doi:10.1016/S0378-4290(03)00101-1
- Fengrui, L., Songling, Z., Geballe, G.T., 2000. Water use patterns and agronomic performance for some cropping

systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China. Agriculture, Ecosystems & Environment 79, 129–142.

- Fernandez, R., Quiroga, A., Noellemyer, E., Funaro, D., Montoya, J., Hitzmann, B., Peinemann, N., 2008. A study of the effect of the interaction between site-specific conditions, residue cover and weed control on water storage during fallow. Agricultural Water Management 95, 1028–1040. doi:10.1016/j.agwat.2008.03.010
- Grealish, G.J., Fitzpatrick, R.W., 2014. Assisting nonsoil specialists to identify soil types for land management: an approach using a soil identification key and toposequence models. Soil Use and Management n/a–n/a. doi:10.1111/sum.12108
- Gregoret, M.C., Dardanelli, J., Bongiovanni, R., Díaz-Zorita, M., 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol. Ciencia Del Suelo 24, 147–159.
- Hoffmann, M.P., Jacobs, A., Whitbread, A.M., 2015. Crop modelling based analysis of site-specific production limitations of winter oilseed rape in northern Germany. Field Crops Research 178, 49–62. doi:10.1016/j.fcr.2015.03.018
- Kravchenko, A.N., Bullock, D.G., 2000. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. Agronomy Journal 92, 75–83. doi:10.1007/s100870050010
- Kravchenko, A.N., Robertson, G.P., Thelen, K.D., Harwood, R.R., 2005. Management, Topographical, and Weather Effects on Spatial Variability of Crop Grain Yields. Agronomy Journal 97, 514. doi:10.2134/agronj2005.0514
- Kumhálová, J., Kumhála, F., Kroulík, M., Matějková, Š., 2011. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. Precision Agriculture 12, 813–830. doi:10.1007/s11119-011-9221-x
- Kurwakumire, N., Chikowo, R., Mtambanengwe, F., Mapfumo, P., Snapp, S., Johnston, A., Zingore, S., 2014. Maize productivity and nutrient and water use efficiencies across soil fertility domains on smallholder farms in Zimbabwe. Field Crops Research 164, 136–147. doi:10.1016/j.fcr.2014.05.013
- Moret, D., Arrue, J., Lopez, M., Gracia, R., 2006. Influence of fallowing practices on soil water and precipitation storage efficiency in semiarid Aragon (NE Spain). Agricultural Water Management 82, 161–176. doi:10.1016/j.agwat.2005.07.019
- Porporato, A., Döodoric, P., D'Odorico, P., Laio, F., Rodriguez-Iturbe, I., 2003. Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. I. Modeling scheme. Advances in Water Resources 26, 45–58. doi:10.1016/S0309-1708(02)00094-5
- Sadras, V.O., Calviño, P.A., 2001. Quantification of Grain Yield Response to Soil Depth in Soybean, Maize, Sunflower,

and Wheat. *Agronomy Journal* 93, 577–583.

- Savin, M., Görres, J., Neher, D., Amador, J.A., 2001. Biogeophysical factors influencing soil respiration and mineral nitrogen content in an old field soil. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 429–438.
 - Tagarakis, A., Liakos, V., Fountas, S., Koundouras, S., Gemtos, T.A., 2012. Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. *Precision Agriculture* 14, 18–39. doi:10.1007/s11119-012-9275-4
 - Tremblay, N., Bouroubi, Y.M., Bélec, C., Mullen, R.W., Kitchen, N.R., Thomason, W.E., Ebelhar, S., Mengel, D.B., Raun, W.R., Francis, D.D., Vories, E.D., Ortiz-Monasterio, I., 2012. Corn Response to Nitrogen is Influenced by Soil Texture and Weather. *Agronomy Journal* 104. doi:10.2134/agronj2012.0184
 - Urricariet, S., Niborski, M., Kvolek, C.M., 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia Del Suelo* 29, 49–59.
 - USDA NRC, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 11th ed. USDA NRCS.
 - Zhu, Q., Lin, H.S., Doolittle, J.A., 2013. Functional soil mapping for site-specific soil moisture and crop yield management. *Geoderma* 200-201, 45–54. doi:10.1016/j.geoderma.2013.02.001
-

Efecto de la fertilización nitrogenada sitio-específico de maíz tardío en la Región Semiárida Pampeana

RESUMEN

La información sobre la respuesta sitio específico del cultivo de maíz tardío a la fertilización nitrogenada en la región semiárida pampeana es escasa. El objetivo del trabajo fue determinar el incremento de productividad asociado a la fertilización nitrogenada de maíz de siembra tardía en dos sitios del mismo lote con diferente aptitud productiva. Dentro del lote se georeferenciaron dos sitios identificados como L (Loma) de menor potencial productivo y B (Bajo) de mayor potencial productivo en base al análisis de imágenes multiespectrales, relevamiento planialtimétrico y mapas de rendimiento. En cada sitio se planteó un ensayo con dos tratamientos de fertilización nitrogenada: 0 kg ha⁻¹ de N (Testigo) y 120 kg ha⁻¹ de N (fertilizado). El rendimiento de grano en el sitio B siempre fue mayor al obtenido en L. No obstante, la magnitud de la diferencia de rendimiento fue dependiente del año ($p < 0,0001$). En todos los años el tratamiento fertilizado presentó mayor rendimiento en relación al testigo. El incremento de rendimiento debido a la fertilización fue dependiente del año ($p < 0,0001$) y de 3.371, 1023 y 1585 kg ha⁻¹ para las campañas 2011/12, 2013/14 y 2014/15 respectivamente. El sitio no afectó la eficiencia de uso del nitrógeno ($p = 0,2293$). Por otro lado, el año tuvo un efecto significativo en la EUN de fertilización ($p < 0,0001$). La eficiencia de uso del nitrógeno fue de 28, 8 y 14 kg de grano producido por cada kg de nitrógeno aplicado tanto en los sitios L como en B, para la campaña 2011/12, 2013/14 y 2014/15 respectivamente. Para las condiciones de la experiencia, la respuesta a la fertilización fue similar

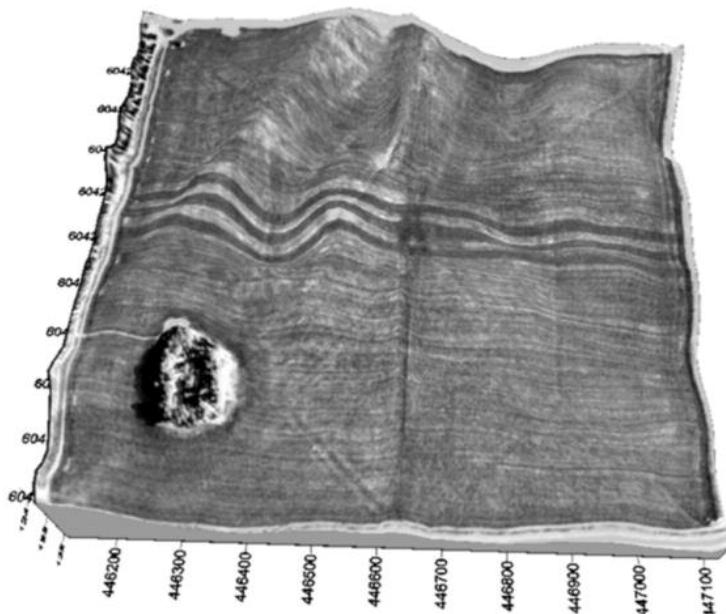
en sitios de alto y bajo potencial productivo. Esto indicaría que la estrategia de fertilización en maíz tardío debería ser similar entre sitios de diferente potencial productivo.

Palabras claves: Fertilización, maíz tardío, Sitio-Específico.

INTRODUCCIÓN

La región semiárida pampeana se caracteriza por la gran variabilidad en la oportunidad y cantidad de precipitaciones. Asimismo, en los últimos años se ha incrementado la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. Esta situación genera en el sector productivo agrícola ganadero estrategias de adaptación que permiten disminuir los efectos negativos de esta variabilidad. Entre ellas se destacan prácticas como la acumulación de agua durante los barbechos, el mantenimiento de la cobertura de rastrojos y la diversificación temporal de la ocurrencia de períodos críticos de los cultivos, entre otras. Con el mismo objetivo, durante los últimos años se ha incrementado la superficie destinada a siembras tardías en el cultivo de maíz. Esta opción es más frecuente en sitios con baja capacidad de retención de agua y en zonas con menor régimen hídrico. Por otro lado, se observan diferencias en la productividad de sitios del mismo lote aun cuando reciben el mismo manejo cultural. Quiroga et al (2006) encontraron en el cultivo de maíz temprano y en el mismo lote, rendimientos medios de 2069 kg ha⁻¹ en sitios de Loma mientras que en sitios Bajos se obtuvieron 7445 kg ha⁻¹. Los sitios de Loma presentaron un margen

Figura 1: NDVI de imágenes multiespectrales en 3D



bruto negativo aún en los tratamientos sin fertilización. En el sitio Bajo, con mayor disponibilidad de agua útil a la siembra y en floración, la fertilización incrementó los rendimientos y el margen bruto. Lan et al (2008) encontraron que la fertilización variable produjo incrementos de rendimiento de 11 y 33 % en las campañas 2004 y 2005 mientras que el ahorro de insumos fue de 32 y 25 % respectivamente. Mamo et al (2003) encontraron que solamente la mitad de la superficie del lote respondió a la fertilización con nitrógeno. Por otro lado, mencionan que aproximadamente el 60 % de la superficie respondió de la misma manera en diferentes años por lo que debería ser considerada la variación interanual dentro de la fertilización sitio específico. Espósito et al (2012) encontraron que la fertilización variable del cultivo de maíz en el sur de Córdoba fue más rentable en siembras tempranas que en siembras tardías. El primer paso para la evaluación de la fertilización sitio específico a campo es la estimación de las diferencias en la respuesta en los diferentes sitios. Si bien existen antecedentes en la respuesta sitio específico en siembras tempranas, la información disponible en fechas tardías es escasa.

El objetivo del trabajo fue determinar el incremento de productividad asociado a la fertilización nitrogenada de maíz de siembra tardía en dos sitios del mismo lote con diferente aptitud productiva.

MATERIALES Y METODOS

La experiencia se realizó en la planicie mediana norte de La Pampa, en el establecimiento “La Barrancosa” ($S\ 35^{\circ}\ 45'\ 50.7''\ W\ 63^{\circ}\ 35'\ 37.7''$) cercano a la localidad de General Pico durante la campaña 2011/12, 2013/14 y 2014/15. Dentro del lote se georeferenciaron dos sitios identificados como L (Loma) de menor potencial productivo y B (Bajo) de mayor potencial productivo en base al análisis de imágenes multiespectrales, relevamiento planialtimétrico y mapas de rendimiento histórico. La cámara utilizada se denomina Tretacam MCA multiespectral y posee un sensor con un filtro de banda estrecha especificado que se inserta entre la lente y el sensor (Figura 1). Para el relevamiento planialtimétrico se utilizó un GPS Diferencial Trimble. En cada sitio se planteó un ensayo con dos tratamientos de fertilización nitrogenada: 0 kg ha⁻¹ de N (Testigo) y 120 kg ha⁻¹ de N (fertilizado). Los tratamientos fueron aplicados en fajas con 3 repeticiones. Cada faja constó de 44 surcos distanciados a 0,52 m. y 1000 m de largo, que atravesaron los sitios L y B. Los ensayos fueron sembrados con sembradora marca Agrometal Mega Tx en siembra directa neumática, con fertilización profunda a la siembra con 50 kg ha⁻¹ de fertilizante (20-17-2-4) y con densidad variable según el sitio. En el sitio Loma la densidad fue de 42.842 plantas ha⁻¹ logradas y en el sitio Bajo fue de

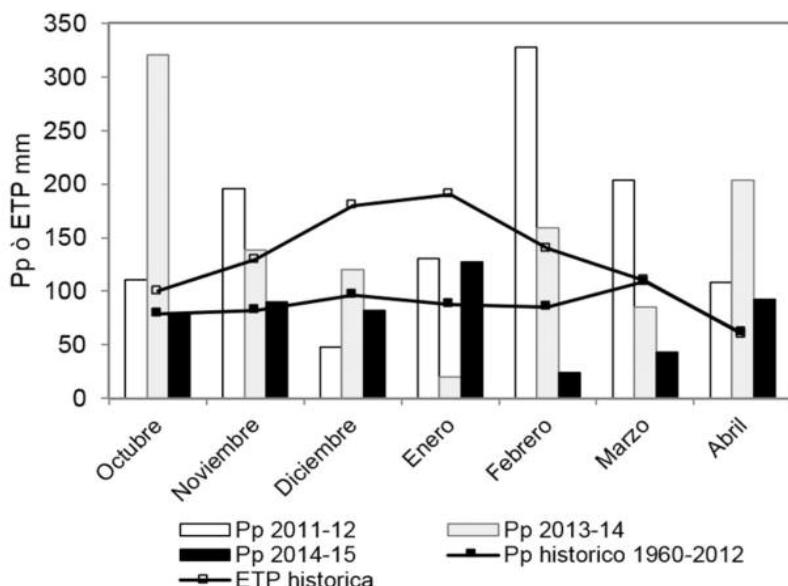


Figura 2: Precipitaciones (Pp) durante el ciclo del cultivo de maíz tardío para las campañas 2011/12, 2013/14 y 2014/15, promedio histórico de la zona (1960-2012) y evapotranspiración (ETP) promedio histórico.

56.090 plantas ha^{-1} logradas. Mediante pulverización terrestre se fertilizó con fertilizante Solmix (30-0-0-2,6) en dosis equivalente a 120 kg ha^{-1} de nitrógeno en la línea, en el estado de 1-2 hojas verdaderas. Los híbridos utilizados fueron DK 700, DK 190 y DK 7010 y las fechas de siembra tardías el 29/11/2011, 10/12/2013 y 8/12/2014, respectivamente. En cada sitio se extrajeron muestras de suelo de 0 a 20 cm de espesor para determinar las fracciones granulométricas (sedimentación), materia orgánica total (MOT, Walkley y Black), fósforo extractable (P, Bray y Kurtz I). En muestras de 0-20 cm y 20-60 cm se determinaron los contenidos de nitrógeno de nitratos (Ac. Cromotrópico). La disponibilidad hídrica de los suelos a la siembra, floración (R_1) y madurez fisiológica (MF) se determinó a intervalos de 20 cm hasta los 200 cm de profundidad por método gravimétrico. Los estados fenológicos fueron determinados utilizando la escala desarrollada por Ritchie y Hanway, 1982. La eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) fue calculada como el cociente entre el rendimiento en grano y los kg ha^{-1} de nitrógeno aplicado. Las variables evaluadas fueron rendimiento en grano y número de granos m^{-2} . En cada faja y sitio se cosechó una superficie de 5,2 m^2 que fue trillada, pesada y estimado el contenido de humedad a través de higrómetro Tesma Campo. Los datos se analizaron mediante ANOVA y las pruebas de diferencias de medias a través del método LSD de Fisher. Se utilizó el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2011).

RESULTADOS

Las precipitaciones ocurridas durante los meses de desarrollo del cultivo de maíz tardío (diciembre a marzo) fueron diferentes entre campañas. Para la campaña 2011/12 fueron superiores en un 87% respecto del promedio histórico de la zona (1960-2014) con un aporte de 710 mm. durante el ciclo. En 2013/14 resultaron similares al promedio histórico y de 384 mm., mientras que en la campaña 2014/15 fueron inferiores en un 26 % y de 276 mm. En la Figura 2 se presenta el balance hídrico y la distribución de las precipitaciones durante los meses de desarrollo del cultivo con una gran variabilidad mensual entre años.

En la Tabla 1 se describen las características edáficas de cada sitio. Los contenidos de arcilla + limo, materia orgánica total y nitrógeno de nitratos fueron mayores y los de fósforo menores en los sitios B respecto a L. El agua útil a la siembra siempre fue superior en el B con incrementos que variaron entre 2 y 2,7 veces en relación a sitios L ($p<0,0001$). En los sitios B se registró presencia de napa freática entre 2 a 2,6 m. de profundidad.

El rendimiento de grano y número de granos no presentó interacción significativa entre los tratamientos, sitios y años evaluados ($p=0,3829$; $p=0,7841$ respectivamente). Tampoco se observó interacción entre los tratamientos de fertilización y los sitios analizados ($p=0,3069$ y $p=0,4974$ respectivamente). Estos resultados indican que la estrategia de fertilización de maíz tardío debería ser la

Tabla 1: Características edáficas en los 6 sitios evaluados.

| Campaña | Sitio | Textura | | | N NO ₃ ⁻ 0 - 60 cm Kg ha ⁻¹ | P 0 - 20 cm Kg ha ⁻¹ | Profundidad | | Agua útil | | Altitud m s nivel del mar |
|---------|-------|------------|-----------|--------------|--|---------------------------------------|-------------|----------------------|------------------------|-----|---------------------------------|
| | | Arena % | Limo % | Arcilla % | M.O.T. % | | Napa m | Siembra mm/200 cm | Floración mm/200 cm | | |
| 2011/12 | L | 92 | 6 | 2 | 0,7 | 3 | 56 | | 101 | 66 | 124 |
| | B | 82 | 16 | 2 | 1,03 | 11 | 39 | 2,6 | 271 | 227 | 122 |
| 2013/14 | L | 84 | 13 | 3 | 1,02 | 54,4 | 64,2 | | 111 | 34 | 128 |
| | B | 65 | 28 | 7 | 1,84 | 93,1 | 49,7 | 2 | 289 | 153 | 124 |
| 2014/15 | L | 74 | 19 | 2 | - | 37,2 | 70 | 3 | 126 | 78 | 128,5 |
| | B | 74 | 24 | 7 | - | 18,7 | 43 | 2 | 263 | 226 | 127,5 |

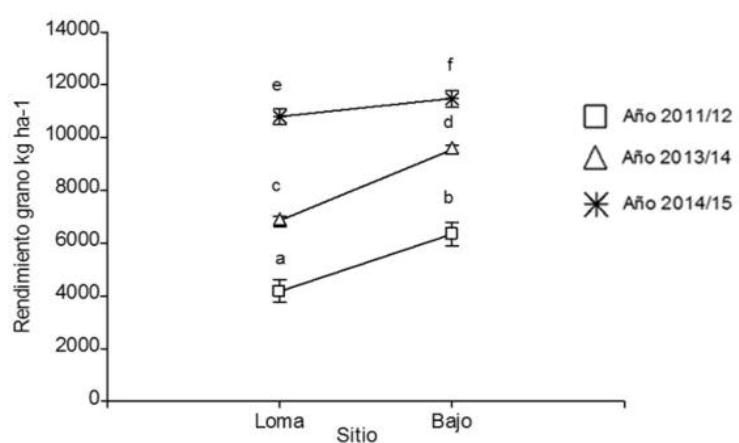


Figura 3: Rendimiento de grano de maíz tardío en los sitios Loma y Bajo para los años evaluados. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

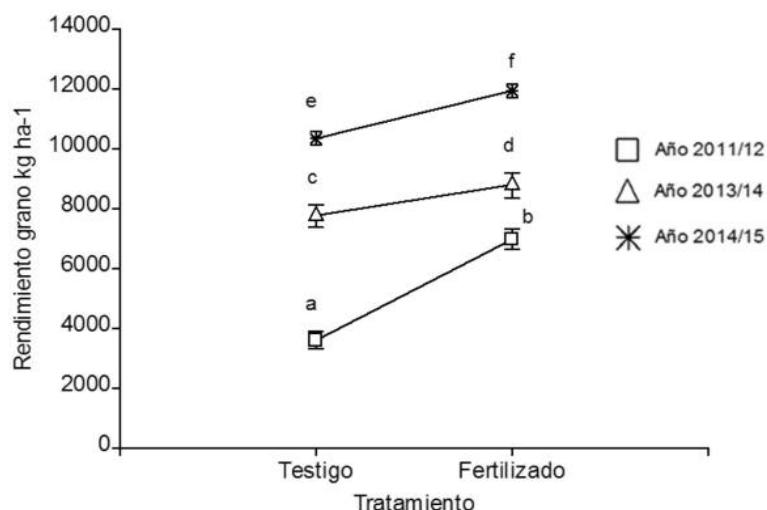


Figura 4: Rendimiento de grano de maíz tardío en los tratamientos testigo y fertilizado para los años evaluados. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

misma en sitios de alto y bajo potencial productivo de la región semiárida pampeana.

El rendimiento de grano en el sitio B siempre fue mayor al obtenido en L. No obstante, la magnitud de la diferencia de rendimiento fue dependiente del año ($p < 0,0001$) Figura 3. Esto podría deberse tanto a cambios en las condiciones ambientales durante

el ciclo del cultivo como a diferencias en las características edáficas en los sitios evaluados.

En todos los años el tratamiento fertilizado presentó mayor rendimiento en relación al testigo. El incremento de rendimiento debido a la fertilización fue dependiente del año ($p < 0,0001$). Los rendimien-

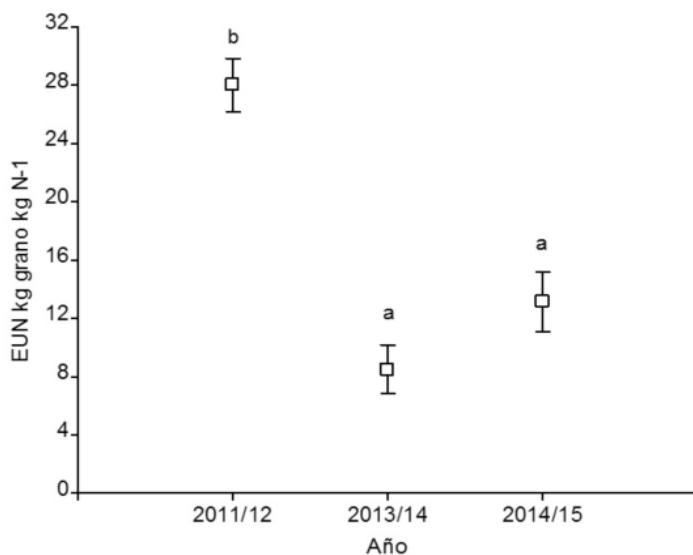


Figura 5: Kilos de granos producidos por cada kilo de nitrógeno aplicado para los años evaluados. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

tos obtenidos en los diferentes años se muestran en la Figura 4. El incremento de rendimiento debido a la fertilización fue de 3371, 1023 y 1585 kg ha⁻¹ para las campañas 2011/12, 2013/14 y 2014/15 respectivamente.

El rendimiento de grano estuvo relacionado con el número de granos m⁻². Resultados similares fueron obtenidos por (Saks et al 2012, Ghironi et al 2012).

El efecto de la fertilización sobre la EUA varió en los diferentes años ($p < 0,0001$). La eficiencia del uso del agua se incrementó en el tratamiento fertilizado en los años 2011/12 y 2014/15 mientras que en el año 2013/14 no presentó diferencias significativas.

El sitio no afectó la eficiencia de uso del nitrógeno ($p = 0,2293$). Por otro lado, el año tuvo un efecto significativo en la EUN de fertilización ($p < 0,0001$) Figura 5.

Estos valores son similares a los encontrados por Bono y Alvarez (2012) en maíces de siembra temprana en la misma región con dosis de 80 a 100 kg ha⁻¹ de N en 44 sitios.

CONCLUSIONES

Para las condiciones de la experiencia, la fertilización nitrogenada incrementó los rendimientos de maíz tardío en todos los años y sitios evaluados.

Por otro lado, el efecto de la fertilización fue diferente en distintos años. Esto coincide con los resultados obtenidos por Mamo et al (2003) y Lan et al. (2008).

La respuesta a la fertilización fue similar en sitios

de alto y bajo potencial productivo. Esto indicaría que la estrategia de fertilización en maíz tardío debería ser similar entre sitios de diferente potencial productivo.

BIBLIOGRAFIA

- Bono, A., Alvarez, R. 2012. Fertilización de maíz en la región semiárida y subhúmeda pampeana. XIX Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo, XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Abril 2012.
- Di Rienzo, J.A., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F., Tablada, M., Robledo, C.W. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Espósito, G., Balboa, G., Castillo, C., Balboa, R., Degioanni, A. Fecha de siembra y fertilización variable de maíz sobre haplustoles de Córdoba. 2012. XIX Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo, XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Abril 2012
- Ghironi, E.;A. Corró Molas, A. Gili. 2012. Manejo sitio-específico de densidades en los cultivos de girasol, maíz y sorgo en la región semiárida pampeana central. ISSN 0325-2132. Publicación técnica Nº 90. Avances de la agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana. Cap. IV: Agosto, 2012.
- Lan, Y., S. Zhang, W. Li, W.C. Hoffmann, & C. Ma. 2008. Variable rate fertilization for maize and its effects based on the site-specific soil fertility and yield. Agricultural Engineering International: the CIGRE journal. Manuscript. IT 08 002. Vol.X. December, 2008.
- López, M. V., Arrúe, J.L. 1997. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage

in a semi-arid region of Spain. *Soil & Tillage Research* 44: 35-54.

- Mamo, M., G.L. Malzer, D.J. Mulla, D.R. Huggins, and J. Strock. Spatial and Temporal Variation in Economically Optimum Nitrogen Rate for Corn. 2003. *Agronomy Journal*. 95: 958-964. July-August. 2003.
 - Quiroga, A., Ormeño, O., Rojas, S. 2006. Respuesta ambiental del cultivo de maíz, ante diferentes tecnologías aplicadas, en la zona semiárida. ISSN 0325-2167. Boletín de Divulgación Técnico Nº 91. Manejo de plagas y tecnología de cultivos en sistemas mixtos de producción. Noviembre, 2006
 - Ritchie, S.W. & J.J Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special Report Nº 48.
 - Sacks, M.G., Fernandez, R., Gili, A., Quiroga, A. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada en distintos genotipos de maíz en la región semiárida pampeana. XIX Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo, XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Abril 2012.
-

Uso de la topografía local en la determinación de ambientes intra-lote para agricultura de precisión

RESUMEN

En este trabajo proponemos el uso del índice de posición topográfico (TPI), que permite obtener mapas de topografía local para un entorno especificado por el usuario, para la delimitación de ambientes productivos en Agricultura de Precisión. Este estudio se realizó sobre una parcela de 100 ha en el NE de la provincia de La Pampa donde la principal limitante para el desarrollo de cultivos es la humedad de suelo usualmente relacionada con la topografía de las parcelas. Por lo tanto, se diseñó y validó una metodología basada en mapas topográficos generados mediante DGPS, un parámetro que presenta en la zona una alta correlación con el rendimiento y que no presenta variabilidad temporal significativa. En particular se utilizó un índice que permite obtener la topografía local para un entorno dado (TPI). A partir del mapa de TPI óptimo se delimitaron los ambientes productivos utilizando clasificaciones no-supervisadas (algoritmo ISODATA). También, se incluye una alternativa para calcular el entorno óptimo para calcular el TPI a partir de la función de autocorrelación. Los resultados muestran que los mapas de TPI permiten caracterizar más adecuadamente las variaciones observadas en el rendimiento que el mapa topográfico; la correlación entre rendimiento y TPI fue superior ($r = 0.74$) a la obtenida entre rendimiento y topografía ($r = 0.54$). Los mapas de ambientes generados a partir de mapas topográficos, mapas de TPI y mapas de rendimiento, muestran también una performance superior de los mapas de TPI evaluados mediante la fiabilidad general obtenida de las matrices de confusión (62% para

TPI y 47% para el mapa topográfico). A partir de los resultados obtenidos estimamos que esta metodología simple y robusta podrá utilizarse en forma operativa para la delimitación de ambientes en zonas con condiciones similares a las locales.

Palabras Clave: *TPI, clasificación no-supervisada, VRT, La Pampa.*

INTRODUCCION

En Argentina, las técnicas de Agricultura de Precisión (AP) comenzaron a implementarse en la década de 1990, promovidas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (Bragachini *et al.*, 2011). Estas técnicas dan origen a lo que se conoce como Aplicación Variable de Insumos (VRT por sus siglas en inglés): en lugar de realizarse aplicaciones uniformes de semillas, fertilizantes, herbicidas, (insumos en general) en toda una parcela o lote, los mismos se distribuyen de acuerdo a las particularidades de cada punto. Para que la aplicación selectiva de insumos sea posible, además de contar con el equipamiento adecuado, resulta clave la delimitación de zonas homogéneas, denominadas ambientes, en cada lote (Moral *et al.*, 2010). Estos ambientes deben presentar características propias estables en el tiempo (a escala agronómica), y que definan su potencial y/o requerimientos específicos. Para la determinación de estos ambientes, una estrategia general consiste en utilizar diferentes modelos digitales (mapa digital), agrupando pixeles mediante alguna metodología definida por el usuario. Este proceso se conoce

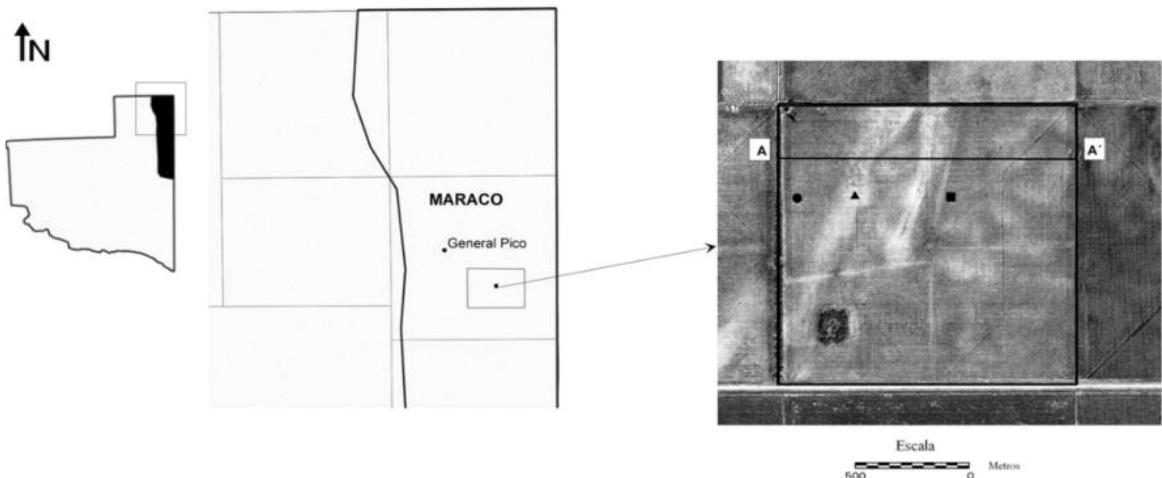
como segmentación o clasificación del mapa digital. Por ejemplo, en (Justo *et al.*, 2011) se aplica una estrategia que utiliza mapas de rinde, en tanto (Peralta and Costa, 2013) utilizan mapas de conductividad eléctrica aparente (ECa, por sus siglas en inglés). En particular, en la provincia de La Pampa, resulta preponderante la utilización de mapas de rinde de múltiples campañas (Melchiori *et al.*, 2013) en la delimitación de ambientes para la VRT. Esta práctica puede conducir a errores, ya que diferentes circunstancias ocasionales (mala calibración de equipos, presencia de malezas, condiciones climáticas excepcionales) pueden introducir variaciones en el rinde sin que ello signifique necesariamente la existencia de patrones espaciales permanentes en el tiempo que condicen el mismo. También, una vez que se ha realizado aplicación variable de insumos, los resultados dependen no sólo del potencial natural del lote, sino de la estrategia utilizada, sesgando más aún la delimitación de ambientes. Esto muestra que resulta necesaria una metodología que utilice variables estables en el tiempo, para caracterizar la variabilidad natural de un lote. Una opción a considerar es la topografía, teniendo en cuenta su relación con la textura del suelo y la disponibilidad de agua en la zona de estudio situada al NE de la Provincia de La Pampa. En la literatura podemos encontrar diferentes estudios que relacionan la topografía de un lote con el rendimiento. Por ejemplo en (Kravchenko and Bullock, 2000) se muestra como la elevación tiene la mayor influencia en un

cultivo, así como en (Marques da Silva and Silva, 2008), donde se presenta una fuerte dependencia entre el rinde de un cultivo y la topografía, en particular con parámetros derivados de la misma como pendiente y otros índices topográficos que reflejan la disponibilidad de agua (índice de humedad, distancia a líneas de acumulación de flujo). En la provincia de Buenos Aires, (Franco *et al.*, 2012) analizan la relación entre atributos topográficos y rendimiento. En el establecimiento rural donde se desarrolló el presente estudio, desde el año 2008, se determinan los ambientes para la aplicación variable de semillas y fertilizantes mediante la segmentación de mapas topográficos (Mieza *et al.*, 2014), y también se han llevado a cabo estudios piloto sobre la taza óptima para la aplicación de semillas y fertilizantes (Ghironi *et al.*, 2012). Del análisis de los mapas de rinde en áreas representativas, se observa que el rendimiento parece tener correlación más alta con la topografía local del lote, que con los valores absolutos de elevación. Por tanto, el principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de una metodología robusta y de aplicación operacional para la determinación de ambientes, basado en un índice de topografía local.

MATERIALES Y METODOLOGIA

Área de estudio

Para el desarrollo del presente trabajo se seleccionó un lote representativo de 100 ha en un establecimiento agrícola situado a 10 km al SE de la ciu-



*Figura 1: Localización de la parcela e imagen satelital de alta resolución donde se aprecian las ondulaciones arenosas de orientación SO-NE. Se indican además una transecta (AA') y puntos representativos (círculo: ambiente media loma, triángulo: ambiente loma, cuadrado: ambiente bajo). Fuente: Mieza *et al.* 2016.*

| Muestra | Arcilla % | Limo % | Arena % | MO % | Δh (m) |
|----------------|-----------|--------|---------|------|----------------|
| Loma | 2.72 | 6.0 | 91.28 | 0.76 | +1.5 |
| M. loma | 2.72 | 16.0 | 81.28 | 1.01 | +0.6 |
| Bajo | 4.00 | 17.00 | 79.00 | 1.16 | 0 |

Tabla 1. Resultados análisis de suelo en puntos representativos.

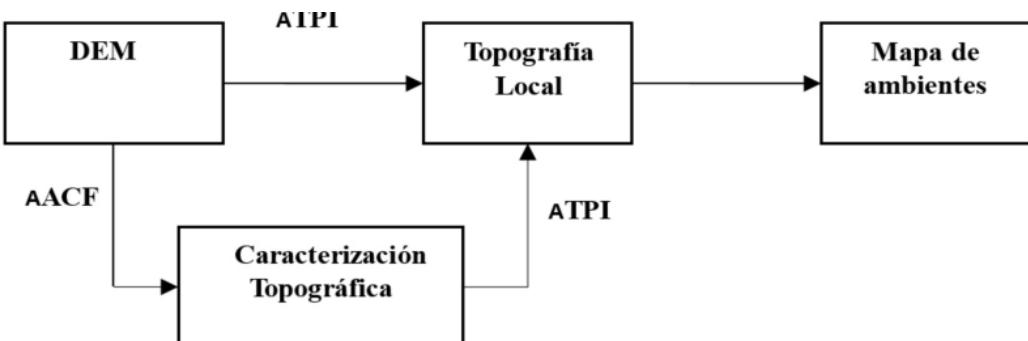


Figura 2: Esquema de la metodología utilizada para la confección de los mapas de ambientes.

dad de General Pico, en la provincia de La Pampa. Como característica topográfica predominante de la zona se observan ondulaciones arenosas con orientación SO-NE. En la Figura 1 se presenta la ubicación junto con una imagen satelital de alta resolución del lote (IKONOS), donde se aprecian las características topográficas. En la imagen también se indica un corte transversal (AA') utilizado para analizar los resultados, así como tres puntos donde fueron realizados análisis de suelo, cuyos resultados se encuentran en la Tabla 1.

Los puntos elegidos corresponden a tres lugares representativos, identificados como loma (correspondiente a las partes más elevadas del terreno), media loma (altura intermedia), y bajo. El diferencial de altura Δh entre los puntos de mayor y menor elevación del lote es sólo de 1.5 m. El análisis realizado se refiere a textura del suelo (arcilla, limo, arena) y materia orgánica (MO), expresados en porcentaje.

Metodología

La metodología para este trabajo consta de dos etapas: una primera instancia orientada a la generación de un mapa de ambientes a partir de la topografía local, y una segunda para la evaluación de los resultados. En la Figura 2 se presenta un esquema general de la primera etapa. A partir de un modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) se genera un mapa de topografía local por medio del Índice de posición topográfica (TPI, por sus siglas en inglés), utilizando en la implementación del mismo entornos circulares de diferentes radios. Luego,

mediante una clasificación no supervisada del mismo se genera un mapa de ambientes. Una alternativa más sofisticada, aunque más compleja para aplicaciones operativas, consiste en caracterizar previamente la topografía del lote para elegir el entorno óptimo para el cálculo del TPI a partir de la función de autocorrelación (ACF, por sus siglas en inglés) (Mieza *et al.*, 2016).

DEM y mapa topográfico. Se generaron un DEM y un mapa topográfico del lote. A tal fin se utilizó un receptor GPS diferencial (Trimble R3) montado en un cuatriciclo. Las mediciones fueron realizadas siguiendo una grilla semiregular, tomando mediciones cada 20 m en trayectorias separadas por 50 m (promedio). Luego de recolectados, se aplicó la corrección diferencial a los datos, para posteriormente generar un DEM y un mapa topográfico utilizando el software QGIS (versión 2.8.2). Teniendo en cuenta las especificaciones del receptor GPS y la distancia a la base, se calculó la precisión de las mediciones en ± 12 mm en dirección horizontal y ± 22 mm en dirección vertical.

Mapa de topografía local. El TPI, es un indicador de elevación relativa local. Este índice es el resultado de comparar la elevación absoluta de cada punto de un DEM con la elevación promedio de los puntos en un entorno predeterminado del punto. El TPI se define en cada punto p_0 del lote como la diferencia entre la altura z_0 del punto p_0 y la altura promedio \bar{z} de los puntos en un entorno predeterminado (usual-

mente circular) del punto p_0 (Weiss, 2001) (De Reu *et al.*, 2013).

$$TPI(p_0) = z_0 - \bar{z}$$

Valores positivos de TPI (para cierto punto del lote) indican una loma local, mientras que valores negativos, un bajo local, y valores próximos a cero indican zonas de pendiente constante. El tamaño y forma del entorno utilizado para el cálculo del TPI es crítico, y es lo que le da su carácter de índice local. Entornos mayores (de decenas de kilómetros) se pueden utilizar para caracterizar topografía a gran escala, mientras que entornos de decenas de metros son aplicables a escala de lote. Esta metodología se puede utilizar con entornos definidos con criterios asociados a patrones topográficos del terreno. La principal dificultad en la utilización del TPI para delimitar ambientes a nivel lote es decidir el entorno a utilizar para su cálculo. Cabe destacar que los paquetes de software de uso común (por ejemplo QGIS) permiten, en general, el cálculo de TPI a partir de un DEM utilizando entornos circulares centrados en el punto, cuyo radio que puede ser elegido por el operador. La utilización de entornos de forma más general no está usualmente incluida en paquetes de software, aunque se pueden programar.

Caracterización de las estructuras topográficas.

Una alternativa para caracterizar las estructuras topográficas del lote es el uso de ACF. La metodología utilizada es una variante de la propuesta en (Heilbronner, 1992) para el análisis de materiales. La función de autocorrelación describe el grado de correlación entre una imagen y versiones desplazadas de la misma, en todas las direcciones posibles. La ACF de una imagen es una grilla de las mismas dimensiones de la imagen, donde el valor en cada pixel representa el grado de correlación entre la imagen original y la imagen centrada en dicho pixel. Así, la ACF alcanza su máximo valor en el centro de la imagen, que es cuando no ocurre desplazamiento. Cuando la imagen presenta estructuras isotrópicas, la ACF muestra una tasa de decaimiento similar en todas las direcciones. Cuando la imagen presenta patrones anisotrópicos, la tasa de decaimiento no es similar en todas las direcciones, y las curvas de nivel aparecen alargadas en la dirección de mayor correlación, revelando, en nuestro caso, la estructura

topográfica del terreno. Segmentando esta imagen, a cierta proporción del máximo absoluto, se obtiene una figura que permite caracterizar la topografía del terreno. En el presente trabajo, siguiendo el lineamiento utilizado en (de Ronde *et al.*, 2004), se utilizó como punto de corte a 0.39 del valor máximo. Tal como fuera explicado, el cálculo de mapas TPI utilizando entornos no circulares requiere conocimientos de programación, pero no así utilizar la ACF. Una vez determinada la figura aplicando el corte en las curvas de nivel, se puede determinar su área, con ella el entorno circular de igual área, para realizar un cálculo de TPI estándar. Esta metodología fue aplicada y testeada en el presente trabajo.

Generación de mapas de ambientes. Todos los mapas de ambientes fueron generados a partir de una clasificación no-supervisada del mapa tomado de base. Clasificación no-supervisada es la identificación de grupos que aparecen de manera natural en una imagen (Campbell, 1996). El proceso se realiza de manera automática, a partir de un algoritmo y diferentes parámetros que elige el operador. Para generar los mapas de ambientes (a partir del mapa de rinde, el mapa topográfico, y los mapas de TPI) se utilizó el software Erdas Imagine 8.4. Un enfoque similar se presenta, por ejemplo, en (Fraissee *et al.*, 2001). El algoritmo elegido fue ISODATA (Tou and González, 1974), y el número de clases 3, teniendo en cuenta consideraciones prácticas, ya que el objetivo final era generar mapas de prescripción de aplicación efectiva.

Mapa de rinde. Con la finalidad de evaluar los resultados se utilizó un mapa de rinde seleccionado y procesado de forma tal que sirviera como referencia sobre el potencial natural de cada zona del lote. Se analizaron los mapas disponibles de cinco campañas agrícolas y se seleccionó uno representativo de la campaña 2007-2008 (maíz) que estaba completo, adecuadamente calibrado y previo a la implementación de VRT. El mapa fue corregido usando una metodología similar a la propuesta en (Taylor *et al.*, 2007), removiendo outliers y datos erróneos producidos por variaciones en el desplazamiento de la cosechadora. Finalmente, se generó una grilla regular de 15 x 15 m utilizando como método de interpolación krigging (Oliver and Webster, 1990), y se estandarizó según lo propuesto en (Blackmore, 2000).

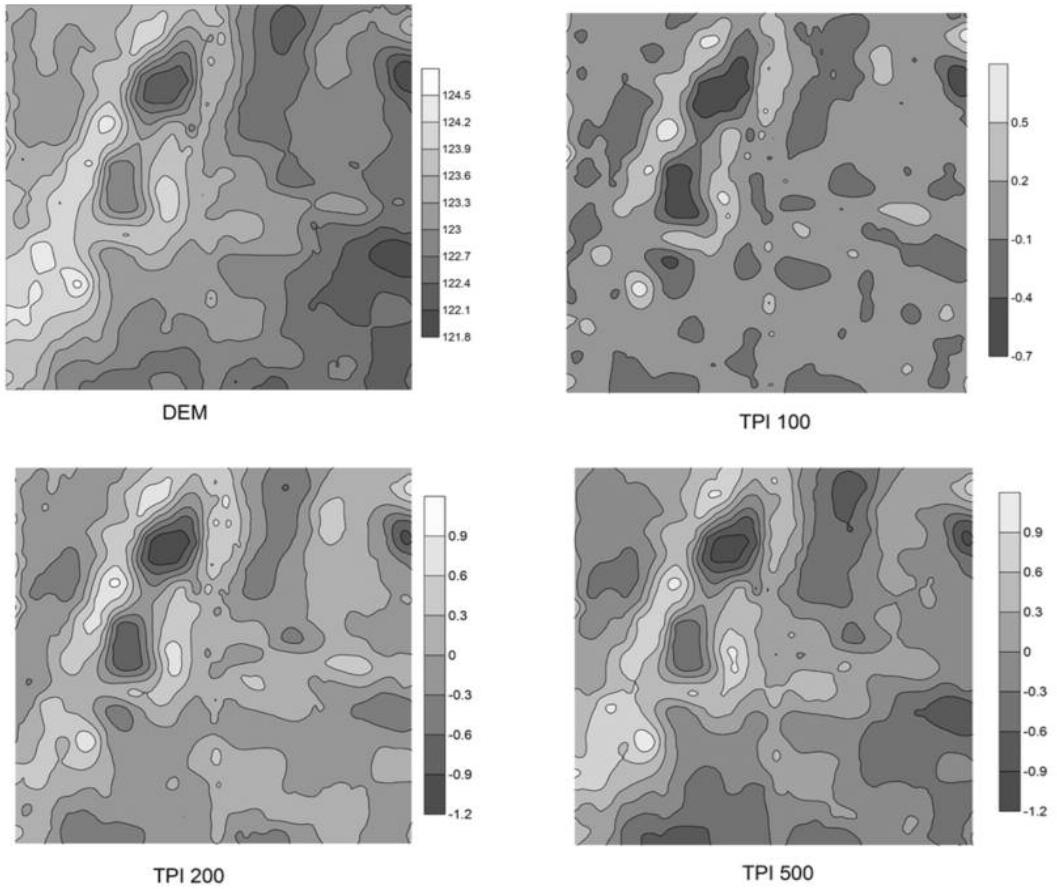


Figura 3: Curvas de nivel (en mnm) y mapa TPI (en m) para entorno circular de radios 100 m, 200 m y 500 m.

Validación. La validación de los resultados se realizó en dos instancias. En primer lugar, se evaluó la eficacia de los mapas TPI (en contraste con el mapa topográfico) para caracterizar las limitaciones y potenciales agronómicos del lote. Se calculó la correlación entre dicho mapa de rinde y los diferentes mapas calculados (topográfico, TPI). En segunda instancia, se evaluaron los mapas de ambientes generados a partir de los mapas TPI, y del mapa topográfico. Este proceso se realizó por medio de matrices de confusión, y utilizando como referencia un mapa de ambientes generado a partir del mapa de rinde seleccionado como referencia. Esta metodología es de uso habitual en el ámbito de la teledetección para evaluar mapas temáticos (mapas donde los píxeles tienen valores asociados a una categoría, como loma, media-loma y bajo). En la misma se presentan los píxeles correctamente clasificados (de acuerdo a la imagen de referencia), junto con los píxeles asignados a categorías erróneas. De

la misma, se derivan índices de uso estándar como la fiabilidad del productor, fiabilidad del usuario, y fiabilidad general. Una descripción acabada del método se puede encontrar en (Foody, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mapa topográfico y TPI. A partir de los datos recolectados con el GPS diferencial, se generaron un DEM, y posteriormente un mapa topográfico (curvas de nivel), y mapas de índice TPI utilizando entornos circulares de radios entre 100 m y 500 m, con un paso de 50 m. El límite inferior (100 m) fue elegido en función de la resolución del DEM, teniendo en cuenta que las mediciones realizadas con el GPS fueron en pasadas separadas por 50 m. El límite superior (500 m) fue elegido en función de las medidas del lote (1000 x1000 m). En la Figura 3 Figura se pueden apreciar el mapa topográfico y los mapas TPI para los radios 100 m, 200 m y 500 m.

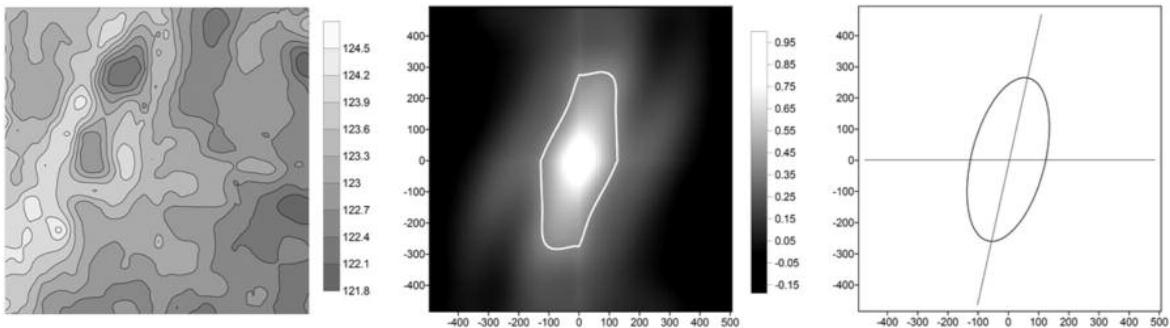


Figura 4: A la izquierda mapa topográfico en mnm, en el centro imagen de ACF donde se muestra la figura que representa forma y orientación de las características topográficas obtenida a partir de segmentar la imagen ACF, y a la derecha elipse utilizada para aproximarla. En la imagen central y derecha distancias en metros. Fuente: Mieza et al. (2016).

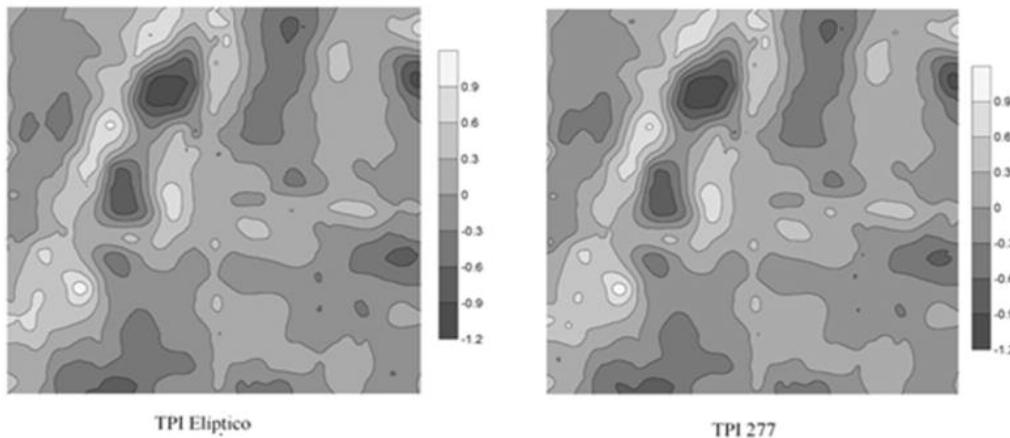


Figura 5: Mapa TPI con entorno elíptico (izq.) y mapa TPI con radio 277 (der.). Fuente: Mieza et al. (2016).

Determinación de la estructura topográfica. Una vez generado el mapa topográfico, la metodología propuesta para la caracterización de la topografía por medio de la ACF fue aplicada. Del análisis de la ACF, tomando una curva de nivel a 0.39 del nivel máximo, se obtuvo un entorno con forma aproximadamente elíptica que representa la forma y orientación de las características topográficas del terreno. En la misma queda claramente revelado el patrón anisotrópico con orientación SO –NE que se fotointerpretaba en la imagen satelital. Por razones prácticas, para el cálculo del TPI y para facilitar la comparación con mapas de TPI calculados con entornos circulares, dicha forma fue aproximada por una elipse de eje menor $a = 256$ m, eje mayor $b = 350$ m, y con orientación $\phi = 73^\circ$ respecto del eje horizontal. En la Figura 4 se pueden observar el mapa topográfico, la figura determinada con la ACF, y la elipse utilizada para su aproximación.

El radio correspondiente a un círculo del área de la región determinada por la ACF fue calculado en

277 m. Se generaron mapas TPI utilizando la elipse determinada como entorno, así como un entorno circular de 277 m, los cuales pueden apreciarse en la Figura 5. Es de destacar que los mapas no presentan, a simple vista, diferencias significativas.

Evaluación de los mapas topográficos. Para evaluar la eficacia del mapa topográfico y de los mapas TPI para caracterizar la variabilidad del lote, se generaron diagramas de dispersión (Figura 6).

Se observó una correlación negativa entre la topografía y el mapa de rinde estandarizado, donde las áreas de mayor elevación (lomas) se corresponden con áreas de menor rinde, mientras que los lugares de menor altitud presentaron mayores valores de rinde. Un comportamiento similar fue observado cuando se correlacionó el mapa de rinde estandarizado con los diferentes mapas TPI.

El coeficiente de correlación de Pearson (r) y el intervalo de confianza del 95% para r ($[r_1, r_2]$) entre el mapa de rinde estandarizado y los diferentes

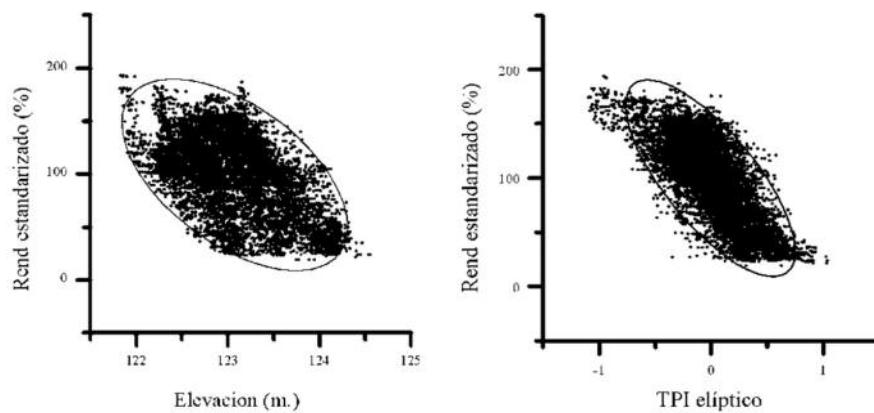


Figura 6: a) Diagrama de dispersión para la variable rinde estandarizado vs las variables elevación y b) ídem para TPI elíptico.

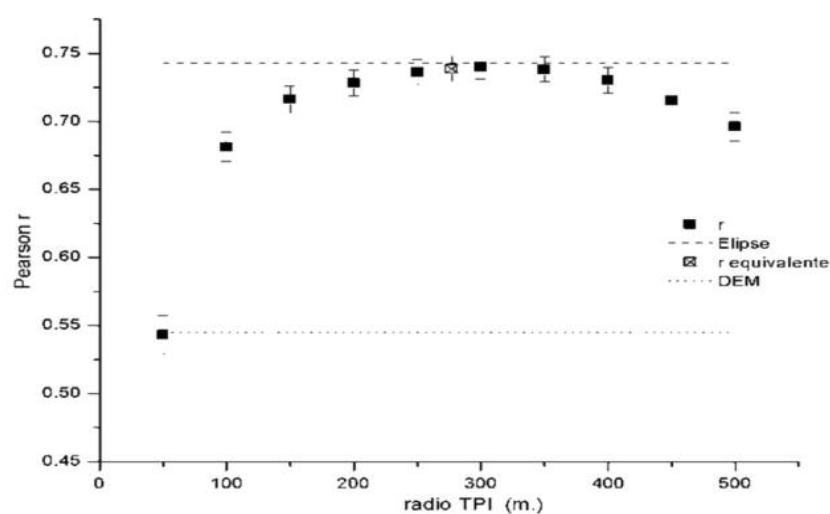


Figura 7: Coeficiente de correlación entre rinde estandarizado y mapa TPI para todos los entornos.

Tabla 2: Coeficientes de correlación e intervalo de confianza.

| Mapa | Pearson r | r_1 | r_2 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| TPI 100 | 0,681 | 0,670 | 0,692 |
| TPI 150 | 0,716 | 0,706 | 0,726 |
| TPI 200 | 0,728 | 0,718 | 0,737 |
| TPI 250 | 0,736 | 0,727 | 0,745 |
| TPI 300 | 0,740 | 0,731 | 0,749 |
| TPI 350 | 0,738 | 0,729 | 0,747 |
| TPI 400 | 0,730 | 0,720 | 0,739 |
| TPI 450 | 0,715 | 0,705 | 0,725 |
| TPI 500 | 0,696 | 0,685 | 0,706 |
| TPI Elíptico | 0,742 | 0,729 | 0,74 |
| TPI 277 | 0,738 | 0,733 | 0,751 |
| Topografía | 0,544 | 0,530 | 0,558 |

mapas topográficos (mapa topográfico, TPI con diferentes radios, TPI elíptico) se muestra en la Tabla 2 y en la Figura 7.

El máximo valor absoluto de r se obtuvo para el entorno elíptico. La comparación estadística de los coeficientes de correlación muestra que no existe diferencia (con un nivel de confianza del 95%) para los mapas TPI elíptico y el TPI con un entorno circular de radio entre 250 m y 350 m (incluido el entorno de radio equivalente al elíptico, calculado en 277 m). En cambio sí se observa diferencia con los mapas TPI calculados con otros radios, pero en todos los casos el desempeño es superior (con una confianza del 95%) al presentado por el del mapa topográfico. Por lo tanto, concluimos que cualquier mapa TPI, calculado con entornos circulares acordes a las variables involucradas, resulta más eficaz que el mapa topográfico para caracterizar la variabilidad natural del lote.

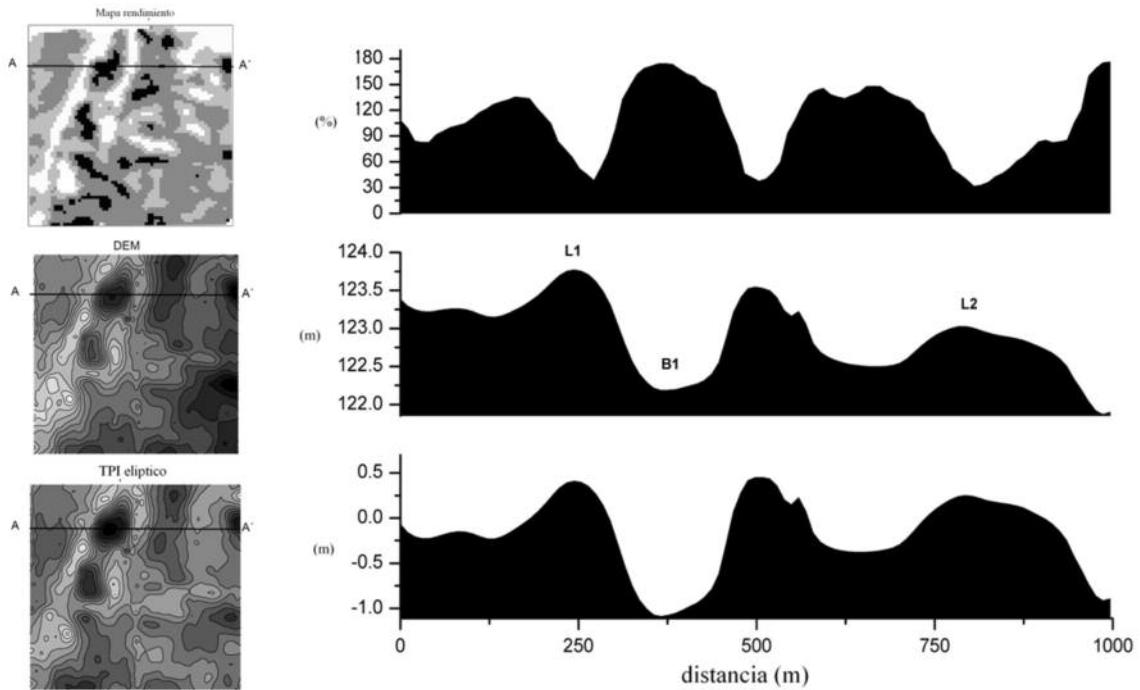


Figura 8: Comparación del perfil AA' en el mapa de rinde estandarizado, el mapa topográfico, y el mapa TPI elíptico. Fuente: Mieza et al. (2016).

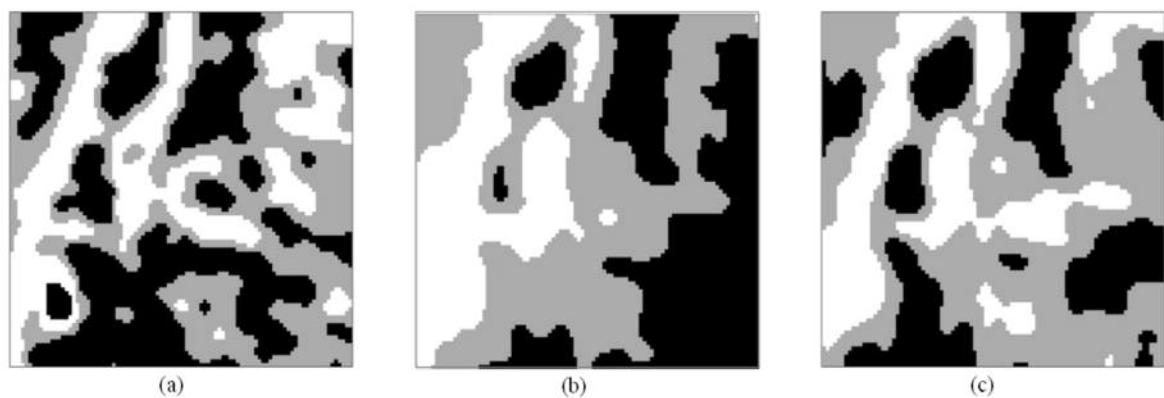


Figura 9: Mapa de ambientes basado en: mapa de rinde (a), mapa topográfico (b), y TPI elíptico (c). Las zonas en color blanco corresponden al ambiente loma, en color gris para media loma y en negro para bajo. Fuente: Mieza et al. (2016).

Para ilustrar los resultados, en la Figura 8 se presenta el perfil AA' para el mapa de rinde estandarizado, el mapa topográfico, y el mapa TPI elíptico.

En los perfiles, L1 es la mayor elevación topográfica y el rinde, como era esperado, presenta los menores valores. Sin embargo, L2 es un máximo local pero los valores de rinde son tan bajos como en el máximo absoluto. Un comportamiento similar se observa en el bajo local B1.

Mapas de ambientes. A partir del mapa topográfico, y de los diferentes mapas TPI (para todos los radios calculados y para el entorno elíptico) se procedió a generar los mapas de ambientes, por medio de una clasificación no supervisada en tres clases, tal como fuera explicado con anterioridad. Con la misma metodología se generó un mapa de ambientes a partir del mapa de rinde estandarizado, para ser utilizado como referencia en la evaluación de todos los mapas de ambientes. En la Figura 9 se

Tabla 3: Matriz de confusión para el mapa de ambientes generado a partir del mapa topográfico.

| Imagen clasificada (ambientes por DEM) | Imagen de referencia (ambientes por rinde) | | | | |
|---|--|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| | Bajo | M Loma | Loma | Total | Fiabilidad del usuario (%) |
| Bajo | 1500 | 1525 | 105 | 3130 | 48 |
| M Loma | 1232 | 1249 | 622 | 3103 | 40 |
| Loma | 182 | 807 | 1184 | 2173 | 54 |
| Total | 2914 | 3581 | 1911 | 8406 | |
| Fiabilidad del productor (%) | 51 | 35 | 62 | | Fiabilidad general: 47% |

Tabla 4: Matriz de confusión para el mapa de ambientes generado a partir del mapa TPI elíptico.

| Imagen clasificada (ambientes por DEM) | Imagen de referencia (ambientes por rinde) | | | | |
|---|--|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| | Bajo | M Loma | Loma | Total | Fiabilidad del usuario (%) |
| Bajo | 1764 | 1317 | 49 | 3130 | 56 |
| M Loma | 557 | 1988 | 558 | 3103 | 64 |
| Loma | 18 | 710 | 1445 | 2173 | 66 |
| Total | 2339 | 4015 | 2052 | 8406 | |
| Fiabilidad del productor (%) | 75 | 50 | 70 | | Fiabilidad general: 62% |

pueden apreciar, junto al mapa de ambientes generado en base al mapa de rinde, los mapas de ambientes generados en base al mapa topográfico y en base al TPI elíptico.

Luego de la clasificación, las clases obtenidas (nombradas de manera automática como clase 1, clase 2 y clase 3 por el software), fueron asociadas y renombradas en concordancia con su aparente correspondencia con el lote de referencia como loma, media loma, y bajo.

Para comparar los mapas de ambientes, se calcularon las matrices de confusión, utilizando como referencia el mapa de ambientes generado a partir del mapa de rinde estandarizado. Las matrices de confusión, junto con la fiabilidad del usuario, del productor, y general, se presentan en la

Tabla 3 para el mapa de ambientes generados en base al mapa topográfico, y en la Tabla 4 para el mapa de ambientes generado a partir del mapa TPI elíptico. Comparando ambas matrices, se observa que la fiabilidad general utilizando el TPI elíptico es significativamente mayor (62% contra 47%). En general, en todas las mediciones de fiabilidad se obtiene un mayor resultado cuando se utiliza el mapa generado a partir del TPI elíptico. Es decir, la segmentación basada en el TPI elíptico es más fiable

que la segmentación basada en un mapa topográfico, mostrando una elevada correspondencia entre los máximos y mínimos locales del lote, y los valores de rinde.

CONCLUSIONES

En Agricultura de Precisión, en particular para la aplicación variable de insumos, resulta clave disponer de una estrategia operativa y estable en el tiempo para delimitar los diferentes ambientes en un lote. Una de las opciones utilizadas es la segmentación a partir de mapas de rendimiento, los cuales pueden no ser representativos de la variabilidad natural de las parcelas dado que pueden ser influenciados por la mala calibración de los sensores, errores en el funcionamiento del equipamiento, prácticas agronómicas de VRT, o condiciones climáticas extremas. En la zona NE de La Pampa se ha observado una alta correlación entre el rendimiento de los cultivos y los mapas topográficos de las parcelas obtenidas mediante DGPS. En particular, se observó una mayor correlación entre la topografía local y el rinde de un cultivo, que la existente con la topografía general del lote. En el presente trabajo se presenta una manera operativa de utilizar la topografía

local para delimitar ambientes, por medio del TPI utilizando mayoritariamente software libre. Los mapas TPI resultaron estadísticamente más precisos (con una confianza del 95%) que la topografía general del lote para caracterizar la variabilidad espacial, y la fiabilidad de los mapas de ambientes generados a partir de los mapas TPI resultó, en todos los casos, mayor que la obtenida con los mapas de ambientes generados a partir de mapas topográficos. La aplicación óptima de esta estrategia requiere cálculos de mapas TPI con entornos no circulares, lo cual puede resultar difícil, sin embargo, en este trabajo se presenta una alternativa igualmente eficaz, y operacionalmente aplicable, ya que no requiere conocimientos avanzados de programación y puede implementarse utilizando funciones pre-programadas en paquetes de software libre. Cabe destacar que esta metodología es potencialmente aplicable a cualquier área donde la limitación sea la humedad en suelo, y ésta pueda ser asociada a la topografía. La aplicación de esta metodología requiere únicamente disponer de un modelo digital de elevación de la parcela, el cual se obtuvo, en el presente trabajo, por medio de un GPS diferencial. Con el advenimiento de nuevas tecnologías como imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar), se podría especular en un sistema remoto para generar los DEM de las parcelas. Finalmente, los promisorios resultados obtenidos apuntan a la viabilidad de utilizar esta metodología con fines operativos.

AGRADECIMIENTOS

Queremos dedicar este trabajo a la memoria del Ing. Agr. Daniel Martínez, excelente persona y amigo, con quien comenzamos a desarrollar aplicaciones en Agricultura de Precisión en el NE de La Pampa, quien con gran pasión y entrega compartió con nosotros sus conocimientos.

BIBLIOGRAFIA

- Blackmore, S., 2000. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Comput. Electron. Agric.* 26, 37–51. doi:10.1016/S0168-1699(99)00075-7
- Bragachini, M., Mendez, A., Vélez, J.P., 2011. Argentina, un referente mundial en tecnología de Agricultura de Precisión - Articulos [WWW Document].
- Campbell, J.B., 1996. INTRO REMOTE SENSING 2ND/ED PB. Taylor & Francis.
- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., Chu, W., Antrop, M., De Maeyer, P., Finke, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J., Crombé, P., 2013. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology* 186, 39–49. doi:10.1016/j.geomorph.2012.12.015
- de Ronde, A.A., Heilbronner, R., Stünitz, H., Tullis, J., 2004. Spatial correlation of deformation and mineral reaction in experimentally deformed plagioclase–olivine aggregates. *Tectonophysics* 389, 93–109. doi:10.1016/j.tecto.2004.07.054
- Foody, G.M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sens. Environ.* 80, 185–201.
- Fraisse, C.W., Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Trans. ASAE* 44, 155–166.
- Franco, C., Peralta, N., Domenech, M., Costa, J., 2012. Relación Cuantitativa entre atributos topográficos y rendimiento, inta.gob.ar.
- Ghironi, E., Corró Molas, A.E., Gili, A., Hevia, E., Reinoso, H., 2012. Manejo sitio-específico de densidades en los cultivos de girasol, maíz y sorgo en la región semiárida pampeana central, Avances de la agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana. INTA.
- Heilbronner, R.P., 1992. The autocorrelation function: an image processing tool for fabric analysis. *Tectonophysics* 212, 351–370. doi:10.1016/0040-1951(92)90300-U
- Justo, C., Lardone, A., Barraco, M., Scianca, C., Miranda, W., Noellemyer, E., Abadie, G., 2011. Delimitación de zonas de manejo a partir de monitores de rendimiento, Memoria técnica. EEA General Villegas. 2011-2012.
- Kravchenko, A.N., Bullock, D.G., 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92, 75–83.
- Marques da Silva, J.R., Silva, L.L., 2008. Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosyst. Eng.* 101, 183–190. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.07.003
- Melchiori, R.J.M., Albarenque, S.M., Kemerer, A.C., 2013. Uso, adopción y limitaciones de la agricultura de precisión en Argentina. *Curso Int. Agric. Precisión.* 12. 2013 07 17-19, 17 al 19 julio 2013. Manfredi, Córdoba. AR.
- Mieza, M.S., Cravero, W.R., Kovac, F.D., Bargianno, P.G., 2016. Delineation of site-specific management units for operational applications using the topographic position index in La Pampa, Argentina. *Comput. Electron. Agric.* 127, 158–167. doi:10.1016/j.compag.2016.06.005
- Mieza, M.S., Kovac, F.D., Martínez, D.E., 2014. Agricultura

de Precisión: experiencias y potencial de aplicación en La Pampa, in: Di Liscia, M.S. (Ed.), Resultados Finales: Proyectos de Investigación Científica Y Tecnológica Orientados Al Desarrollo Productivo Provincial. EdUNLPam, p. 193.

- Moral, F.J., Terrón, J.M., Silva, J.R.M. da, 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil Tillage Res.* 106, 335–343. doi:10.1016/j.still.2009.12.002
 - Oliver, M.A., Webster, R., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 4, 313–332. doi:10.1080/02693799008941549
 - Peralta, N.R., Costa, J.L., 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Comput. Electron. Agric.* 99, 218–226. doi:10.1016/j.compag.2013.09.014
 - Taylor, J.A., McBratney, A.B., Whelan, B.M., 2007. Establishing Management Classes for Broadacre Agricultural Production. *Agron. J.* 99, 1366. doi:10.2134/agronj2007.0070
 - Tou, J.T., González, R.C., 1974. Pattern recognition principles. Addison-Wesley Pub. Co.
 - Weiss, A., 2001. Topographic position and landforms analysis. pp. 200–200.
-

*Nivel
Predial:
Caso*

8

Variabilidad edáfica y su implicancia en la producción del cultivo de alfalfa bajo riego

RESUMEN

Los suelos de los valles de inundación presentan una importante heterogeneidad debido a su origen aluvional, tal es el caso de la cuenca media del río Colorado (sudoeste de la provincia de La Pampa, Argentina). Allí, los rendimientos de alfalfa varían considerablemente dentro de los lotes, producto de la heterogeneidad espacial del suelo. El objetivo fue identificar y evaluar diferentes variables edáficas y su relación con la producción del cultivo de alfalfa bajo riego. Durante el período de noviembre 2014 a marzo 2015, se realizaron 4 cortes, cuantificando la producción de materia seca (MS, kg/ha) por corte manual (5 muestras de 0,2m² en el estado de 10% de floración). En los mismos sitios de corte se realizaron calicatas hasta 1,2m de profundidad determinando profundidad de capas, pH, cationes de intercambio, CIC y CE. Mediante la utilización de imágenes satelitales se caracterizó la producción, observándose una alta variabilidad espacial de la producción dentro del lote ($3222 \pm 0,27$ kg/ha); diferenciando 2 ambientes (zona de alta y zona de baja producción). Resultados preliminares muestran variación de la productividad en diferentes zonas, entre 1700-5100 Kg MS/ha totales, y con promedios de 1885 y 4129 kg MS/ha para ambientes de baja y alta producción, respectivamente ($p<0,05$). En cuanto a los análisis de suelo, se encontraron variaciones de la CE, entre 1-6, y 6-18 dS/m, y la concentración de Na intercambiable varió entre 0,7-2, y 3-6 meq/100g, en ambos casos para zonas de alta y baja productividad respectivamente. Estas variaciones se correlacionaron negativamente con producción

por corte, $r=-0.79$, $p=0.02$ para CE y $r=-0.83$, $p=0.01$ para Na intercambiable. La identificación de los factores que condicionen la productividad (en este caso, CE y Na) es fundamental para realizar prácticas de manejo que disminuyan el efecto de los mismos, mejorando no solo la productividad, sino también la eficiencia del agua, nutrientes y recursos disponibles.

Palabras clave: *ambientes, producción, pasturas, cultivos bajo riego.*

INTRODUCCIÓN

En general, los suelos de la cuenca alta y media del río Colorado (sudoeste de la Provincia de La Pampa - Argentina) pertenecen al orden Entisol, presentando poco desarrollo debido a las condiciones climáticas particulares de la zona (aridez, vientos fuertes, balance hídrico deficitario, salinidad). Se caracterizan por carecer de horizontes definidos, por la deposición de grandes cantidades de arena, baja concentración de arcilla y escaso contenido de materia orgánica (MO) (Panigatti, 2010). Por estas particularidades es que se definen como suelos áridos, no desarrollados, de muy baja fertilidad y con problemas de salinidad. Dichas condiciones y, consecuentemente, la cantidad y calidad de la cobertura vegetal han sido insuficientes para modificar sus propiedades originales. En términos espaciales, su origen aluvional ha dado lugar a una importante heterogeneidad en los suelos de la región, lo que origina variabilidad en la producción de los cultivos dentro de cada lote (Panigatti, 2010). En este sentido,

do, los rendimientos de alfalfa varían considerablemente, producto de dicha heterogeneidad espacial, dada por su origen y manejo de riego, afectando propiedades las físicas y químicas del suelo.

Uno de los desafíos actuales, es poder manejar la variabilidad una vez conocidas las brechas productivas. Una alternativa de manejo que ha cobrado importancia, es la delimitación de zonas de uniforme (a través de imágenes aéreas, índice verde, relieve, etc). Éstas se definen como subregiones dentro de los lotes con características relativamente homogéneas, en las que resulta apropiada una única proporción de insumos (Doerge, 1999). Luchiari *et al.*, (2000) establecieron que estas características de homogeneidad conducen a resultados similares en cuanto a rendimiento potencial del cultivo, eficiencia en el uso de insumos e impacto ambiental.

Una problemática frecuente de la zona bajo riego de La Pampa, es la aparición de sectores donde los cultivos implantados presentan menor desarrollo, principalmente de la parte aérea vegetal. Estas zonas con productividad reducida alternan con áreas donde la vegetación presenta mayor desarrollo. Una de las características sobresalientes de este fenómeno es el abrupto cambio entre la superficie “afectada” y la “no afectada”, siendo las dimensiones de las áreas de baja productividad del orden de metros.

El principal recurso forrajero en la cuenca media del río Colorado es la alfalfa (*Medicago sativa L.*), es

por ello que la heterogeneidad edáfica adquiere relevancia productiva y económica. Para esta pastura, la variabilidad en el rendimiento se manifiesta generalmente al año de implantada, y con una distribución muy heterogénea.

El reconocimiento de la importancia de esta variabilidad, y su estudio es fundamental para realizar prácticas que apunten a hacer un uso más eficiente de los recursos disponibles, como agua y nutrientes, por ejemplo realizando aplicaciones diferenciales de riego y fertilizantes. Esto conlleva a una reducción del impacto ambiental y ayuda a la planificación territorial, identificando las limitantes y riesgos para la producción a fin de conocer y maximizar el potencial productivo de los suelos.

La producción de los cultivos varía dentro de los lotes, como consecuencia de la variación que presentan diversos factores, entre ellos, principalmente las propiedades del suelo (Godwin y Miller, 2003; Taylor *et al.*, 2003). En el marco de esta problemática, se planteó como objetivo identificar y evaluar diferentes variables edáficas y su relación con la producción del cultivo de alfalfa bajo riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio involucra el margen derecho del río Colorado, en el sudoeste de la provincia de La Pampa (Figura 1). Aquí el desarrollo de las áreas



| Símbolo | Orden Predominante | Desarrollados sobre |
|---------|---------------------------------|--|
| M | Molisol | Llanuras medianas |
| EM | Entisol con Molisol subordinado | Lomas relictos |
| E1 | Entisol | Médanos y planicies arenosas |
| E2 | Entisol | Materiales limosos en pendientes muy fuertes |
| E3 | Entisol | Rodados Tehuelches |
| E4 | Entisol | Materiales aluviales salinizados |
| B | Entisoles someros y basaltos | Coladas lávicas |
| R | Entisoles someros y otras rocas | Afloramientos rocosos |
| A | Aridisol | Lomadas y planicies con tosca |

Figura 1. Clasificación de las aptitudes y usos de los suelos en la Provincia de la Pampa. Se puede apreciar que la localidad de 25 de Mayo se clasifica como tierra con riego y el tipo de suelo predominante es el Entisol. Adaptado de Ediciones INTA, Cruzate y Panigatti, (2008).

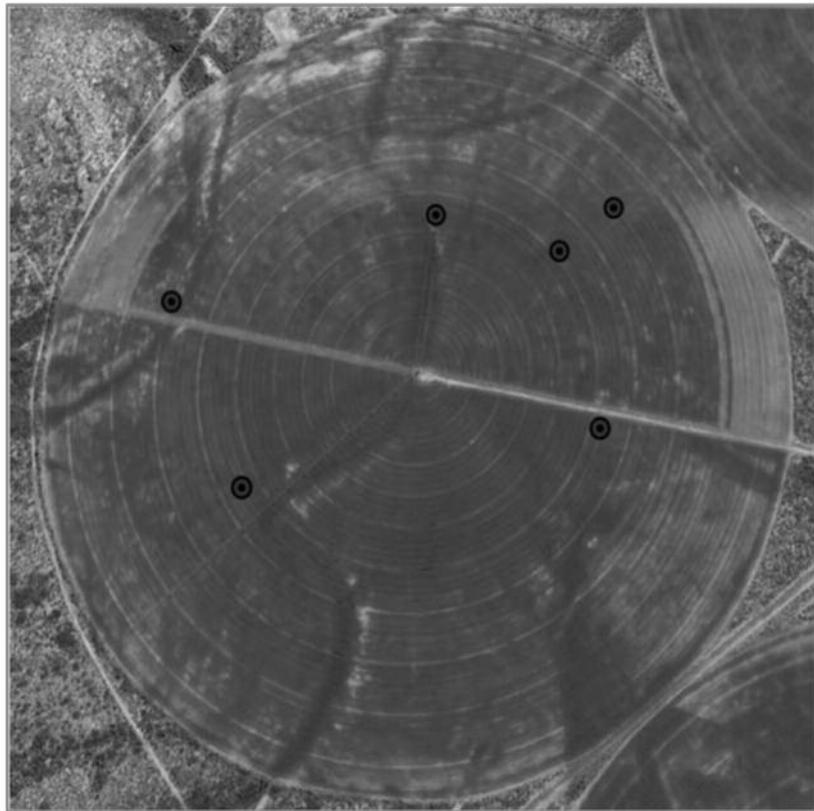


Figura 2. Zona de estudio:
lote de alfalfa bajo riego con
pivote central del estableci-
miento Zille Agro S.A.

bajo riego ha sido consecuencia de la acción conjunta del Estado y de empresas privadas. En ellas se han desarrollado principalmente cultivos de cereales, forrajeros y hortícolas (Sánchez, 2013). En la actualidad, los cultivos que prevalecen en la cuenca media alta son: alfalfa (*Medicago sativa*), maíz (*Zea mays*) y sorgo (*Sorghum bicolor*) con riego gravitacional y riego por pivote central.

El análisis de las condiciones ambientales de la región permite comprender que la realización de actividades productivas basadas en la agricultura sería imposible sin la aplicación de técnicas de regadío. El clima es continental con una media anual de 15 °C, aunque se registran amplitudes térmicas diarias y anuales elevadas. El promedio de precipitaciones oscila en 250 mm (período 1939-1994), siendo los meses más lluviosos los de octubre a marzo. Las variaciones climáticas condicionan el proceso de producción en la agricultura y hacen que mantenga una secuencia de labores rutinarias a lo largo del año.

Desde el punto de vista de los procesos pedogénéticos el factor climático, a través de la baja cantidad de agua de precipitación, el régimen térmico, los vientos fuertes y el balance hídrico muy deficitario, determinan un escaso desarrollo de suelos. La

lixiviación es casi nula ya que la poca cantidad de agua caída no alcanza a lavar las sales más solubles. El proceso de pedogénesis está en su fase inicial, los contenidos de materia orgánica y nitrógeno son bajos. Los suelos formados bajo tales condiciones climáticas y presentando tales características pertenecen al orden Entisoles y se clasifican como Torripsammentes Tipicos y Torriortentes (Cano *et al.*, 1980).

En un perfil pedológico de la zona se puede observar que, con excepción de las lomas con ripio, los suelos de las demás geoformas presentan una sucesión de estratos constituidos por arenas eólicas depositadas sobre un material aluvial; por debajo se distinguen un manto de ripio y un estrato impermeable subyacente al ripio. El material eólico arenoso es no carbonatado y no salino. Este estrato aluvial varía de texturas moderadamente finas hasta moderadamente gruesas (franco arcillo - arenosa hasta franco arenosa), es de color pardo rojizo claro y presenta además contenidos de carbonatos y sales en paleocauces. En cambio, en las formas positivas del relieve, generalmente no presentan contenido importante de sales. Tanto el color como las acumulaciones salinas no se consideran resultado de la

pedogénesis actual o pasada sino características heredadas de los sedimentos que transporta el río Colorado.

Todos los suelos de la zona descansan a una cierta profundidad sobre un manto de ripio, mezclado con un material que, por lo menos en su parte superior, varía entre texturas arenosa hasta franco arcillo-arenosa.

Diseño del muestreo

El trabajo se llevó a cabo en el establecimiento Zille Agro S.A., ubicado a $37^{\circ} 54' 53,28''S$ y $67^{\circ} 46' 16,55''O$, en un lote con cultivo de alfalfa bajo riego con pivot central con una superficie aproximada de 70 ha (Figura 2). Para el muestreo dirigido de suelos, se determinaron zonas de rendimiento homogéneo a partir de imágenes aéreas, datos de sensores remotos, las cuales se chequearon a campo. En cada zona (bajo y alto rendimiento de alfalfa) se realizó una calicata y se colectaron muestras de suelo a diferentes profundidades o capas.

Reconocimiento y cuantificación la productividad del cultivo de alfalfa

Los métodos más eficientes de implementación de manejo variable, tienen como punto de partida la

conformación de una base de datos digital y georeferenciada de la zona de estudio. La información se obtuvo a partir de imágenes satelitales y drones, mediante índices de vegetación, caracterizando las condiciones del suelo, o el crecimiento y desarrollo de un cultivo (Moran *et al.*, 1997; Senay *et al.*, 1998).

Para la estimación del rendimiento, se cuantificó la producción de materia seca (MS) por corte manual sobre cada sitio de muestreo. Se tomó una muestra de $0,2m \times 1m$ de manera perpendicular a las hileras de siembra, y se cortó cuando el cultivo de alfalfa alcanzó el 10% de floración, o cuando los rebrotos de la corona midieron aproximadamente 5 cm. Las muestras se secaron y pesaron expresando su valor en tn MS/ha (Ed. INTA, 2014). La información obtenida fue fundamental, permitiendo visualizar y analizar las diferentes zonas de forma fácil y simple.

El muestreo de suelos en las diferentes zonas homogéneas identificadas a través de la información georeferenciada, se realizaron en puntos estadísticamente representativos del comportamiento de cada zona. En cada uno de los sitios seleccionados se determinó: profundidad de cada capa de suelo, pH 1:2,5, cationes de intercambio (Helmke *et al.*, 1996, Suarez, 1996) y conductividad eléctrica en extracto de pasta de saturada (Rhoades, 1996).

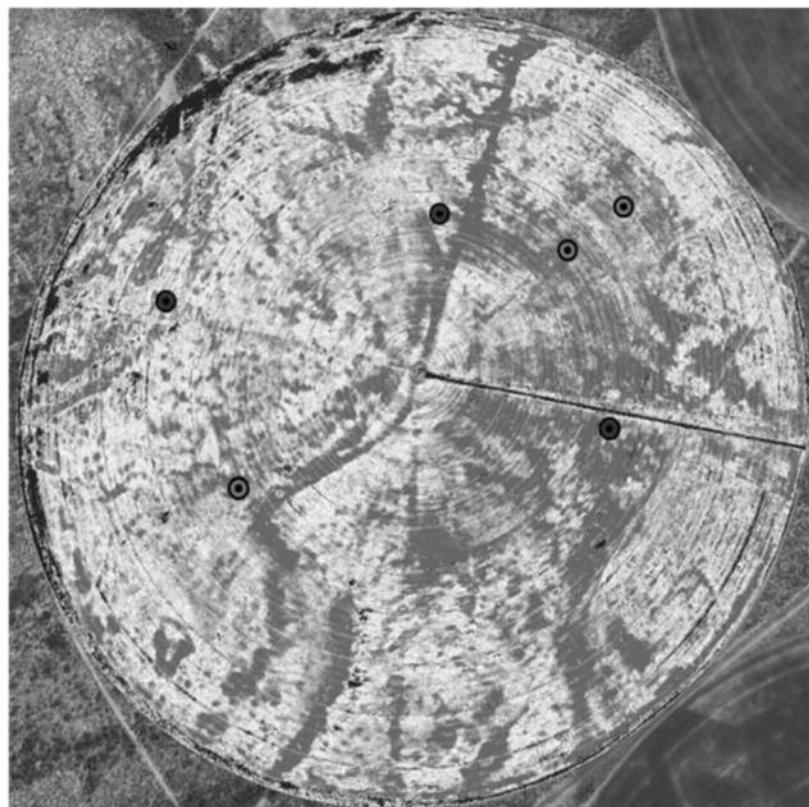


Figura 3. Imagen de NDVI de alta resolución espacial (50cm por pixel) obtenida a partir de un dron sobre el pivote de alfalfa bajo riego. Zonas rojas y verdes indican baja productividad y alta productividad, respectivamente.

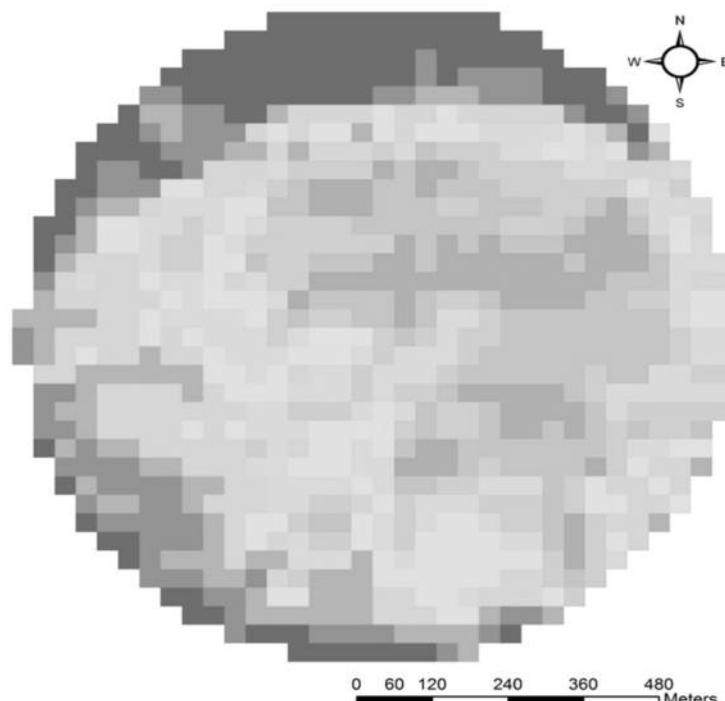


Figura 4. Imagen de NDVI de media resolución espacial (30m por pixel) obtenida a partir del satélite Landsat sobre el pivot de alfalfa bajo riego.

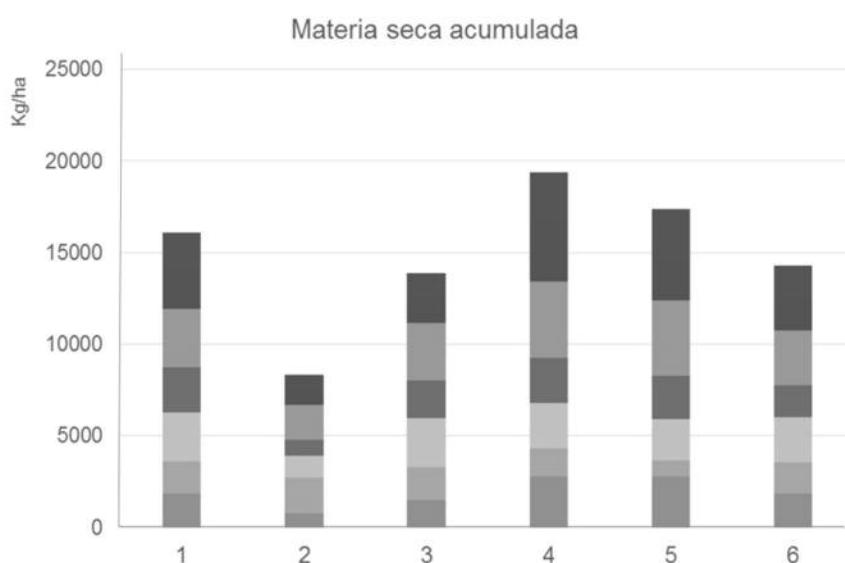


Figura 5. Productividad acumulada de alfalfa en cada uno de los sitios desde noviembre de 2014 a marzo 2015.

Los análisis se realizaron en los laboratorios de la AER 25 de mayo de INTA y en el laboratorio de suelo de la Estación Experimental de INTA Anguil “Guillermo Covas” (EEA-Anguil).

RESULTADOS

A partir del uso de imágenes de alta resolución (30cm por pixel) y media resolución (30m por pixel), se observó una alta variabilidad espacial de la producción de alfalfa dentro del lote ($3222 \pm 0,27$

kg/ha); con lo cual se diferenciaron 2 ambientes, zona de alta y zona de baja producción (Figura 3 y 4).

La productividad de alfalfa en promedio varió entre ambientes en un 45% (Figura 5).

En cuanto a los análisis de suelo (Tabla 1), se encontraron variaciones de la CE, entre 1-6 y 6-18 dS/m para zonas de alta y baja productividad respectivamente, estas variaciones se correlacionaron negativamente con producción por corte ($r = -0.79$, $p=0.02$). La concentración de Na intercambiable varió entre 0,7-2 y 3-6 meq/100g para sitios de alta

Tabla 1. Análisis físico-químico de suelos. En la tabla se describe la clase textural, % de Materia orgánica (% MO), P ppm, pH, conductividad eléctrica (CE), N total, Na+ intercambiable y densidad aparente (DA) de los sitios utilizados en el presente trabajo.

| Sitio | Profundidad | A+L | Arcilla | Limo | Arena | Textura | MO total % | P ppm | pH | CE | N total (%) | Na intercambiable (cmolc/kg = meq/100g) | DA (g/cm3) |
|-------|-------------|-------|---------|-------|-------|----------------|------------|-------|------|------|-------------|---|------------|
| 1 | 0-30 | 56,02 | 19,66 | 36,35 | 43,98 | Franco | 1,17 | 10,10 | 7,83 | 3,51 | 0,07 | 1,52 | 1,20 |
| 2 | 0-30 | 37,42 | 17,47 | 19,95 | 62,58 | Franco Arenoso | 0,40 | 7,80 | 7,94 | 8,90 | 0,02 | 4,55 | 1,20 |
| 3 | 0-30 | 39,66 | 16,90 | 22,77 | 60,34 | Franco Arenoso | 0,22 | 12,30 | 7,86 | 1,56 | 0,07 | 0,67 | 1,30 |
| 4 | 0-30 | 51,96 | 20,74 | 31,22 | 48,00 | Franco | 0,54 | 9,10 | 7,87 | 2,02 | 0,03 | 0,67 | 1,20 |
| 5 | 0-30 | 20,16 | 11,71 | 8,45 | 79,84 | Franco Arenoso | 0,49 | 13,50 | 7,82 | 1,28 | 0,04 | 0,71 | 1,34 |
| 6 | 0-30 | 34,29 | 3,54 | 30,75 | 65,71 | Franco Arenoso | 1,65 | 17,80 | 7,75 | 3,34 | 0,08 | 1,29 | 1,19 |

y baja productividad respectivamente, correlacionándose negativamente con producción por corte ($r=-0.83$, $p=0.01$).

La identificación de los factores que condicionen la productividad (en este caso, CE y Na+) es fundamental para realizar prácticas de manejo que disminuyan el efecto de los mismos, mejorando no solo la productividad del cultivo, sino también la eficiencia del agua y los nutrientes disponibles.

CONCLUSIÓN

La información recopilada pone de manifiesto las importantes diferencias en algunos rasgos edáficos dentro del lote, en donde la variabilidad en el desarrollo del cultivo coincide en buena medida con la distribución de algunas de las propiedades edáficas.

Los sectores del lote con menor desarrollo del cultivo corresponden generalmente a zonas donde la CE aparente es mayor, en la cual la producción disminuye considerablemente. Además, la alta CE coincide a su vez con muchas de las zonas con alto contenido de sodio.

Los suelos sódicos o salino-sódicos pueden suponer un impedimento para el desarrollo normal del cultivo, debido por un lado al efecto tóxico del sodio en la planta, y por otro a los efectos del sodio sobre la dispersión de las arcillas, que puede ocasionar problemas de infiltración y de emergencia del cultivo.

Mediante el uso de imágenes satelitales se ha conseguido diferenciar dentro del lote, comportamiento diferente en cuanto a desarrollo del cultivo y en consecuencia, en su productividad.

Se ha constatado la utilidad de las imágenes para pronosticar diferencias de rendimiento dentro

del lote, estas anomalías en el desarrollo de cultivos se han podido relacionar con características del suelo (conductividad eléctrica y contenido de sodio).

Todo ello resalta la utilidad de la teledetección en el diagnóstico del cultivo y en la delimitación de zonas dentro de un lote agrícola. Este tipo de estudios constituyen el paso previo fundamental para implementar un manejo diferencial dentro de la parcela.

BIBLIOGRAFIA

- Cano, E., Casagrande, G., Conti, H., Salazar Lea Plaza, J., Peña Zubiate, C., Maldonado Pinedo, D., Martínez, H., Hevia, R., Scoppa, C., Fernández, B., Montes, M., Musto, J., Pittaluga, A. 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa. ISAG, Buenos Aires. 493 p.
- Doerge, T. A. 1999. Management zone concepts. SSMG-2. In: Information Agriculture Conference. Stewart Center, Purdue, IN.
- Ediciones INTA. 2014. Avances en alfalfa. Ensayos territoriales-red de evaluación de cultivares de alfalfa. ISSN 1515-4602 Año 14 Nº14.
- Godwin, R. y C. Miller. 2003. A review of the technologies for mapping within-field variability. Biosyst. Eng. (2003), 1-15.
- Helmke, P.A. y D.L. Sparks. 1996. Chapter 19 Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. In: Sparks DL (Ed.), Methods of soil analysis Part 3-chemical methods, USA: SSSA - ASA Madison WI pp.551-573.
- Luchiari, A. Jr.; Shanahan, J.; Francis, D.; Schlemmer, M.; Schepers, J.; Liebig, M. ; Schepers, A. and S. Payton. 2000. Strategies for establishing management zones for sites speci-

fic nutrient management. Precision Agriculture Center, ASA, CSSA and SSSA, Madison.

- Moran, M.S., Inoue, Y., Barnes, E.M. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Rem. Sens. Environ.* 61, 319–346.
 - Panigatti, J.L. (2010) Argentina: 200 años, 200 suelos. Ediciones INTA, Buenos Aires.
 - Rhoades, J. D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks DL (Ed.), Methods of soil analysis. Part 3: Chemical methods. USA: SSSA - ASA, Madison WI pp. 417-436.
 - Sánchez, R. M. 2013. Estimación de los requerimientos hídricos de los principales cultivos en el Valle Bonaerense del río Colorado. Informe Técnico N° 40. INTA. 31 p.
 - Senay, G.B., Ward, A.D., Lyon, J.G., Fausey, N.R., Nokes, S.E. 1998. Manipulation of high spatial resolution aircraft remote sensing data for use in site-specific farming. *Trans. ASAE* 41 (2), 489–495.
 - Suarez, D.L. 1996. Chapter 20 Beryllium, magnesium, calcium, strontium and barium. In: Sparks DL (Ed.), Methods of soil analysis Part 3-chemical methods, USA: SSSA - ASA Madison WI pp575-601.
 - Taylor, J., G. Wood, R. Earl y R. Godwin. 2003. Soil factors and their influence on within-field crop variability. Part II: Spatial analysis and determination of management zones. *Biosyst. Eng.* 84(4), 441–453.
-

**Nivel
Local:
Caso**

1

Calidad de agua para uso ganadero bovino para los departamentos Chalileo y Limay Mahuida (La Pampa)

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la calidad de agua para uso ganadero bovino en los departamentos Chalileo y Limay Mahuida (La Pampa). Se recopilaron análisis de calidad de agua de la red de pozos de APA, que se vincularon al software libre y gratuito gvSIG para realizar cálculos y generar mapas de distribución de cada variable. Además de aquellos elementos tenidos en cuenta en los análisis de APA, se incluyeron algunas relaciones entre los mismos de importancia para evaluar la calidad de agua para uso ganadero. Dichas relaciones fueron extraídas de bibliografía y consultadas a profesionales del área de Producción Animal de INTA. También se calcularon las combinaciones hipotéticas de los elementos, es decir, las formas probables en que se combinarían los cationes y aniones según su solubilidad. Previa evaluación del comportamiento estadístico de los datos, se realizaron interpolaciones para generar mapas de las variables de interés, que fueron luego clasificados según rangos de importancia de cada variable para uso ganadero. De esta manera, quedaron constituidos los mapas de las siguientes variables: Residuos Sólidos Totales (RST), Sales según Bavera, Cloruro de Sodio (ClNa), Sulfatos Totales (SO₄), Sulfatos de Sodio (SO₄Na), Sulfatos de Magnesio (SO₄Mg), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), relación Calcio/Magnesio (Ca/Mg), relación Sulfatos/Cloruros (SO₄/Cl), Flúor (F), Arsénico (As) y Nitratos (NO₃), todas expresadas en miligramos por litro (mg/l). Los mapas resultantes permitieron determinar que superficie del área de estudio posee agua de cada categoría. Por ejemplo

para sales totales, un 4% del área posee agua deficiente, un 42% agua apta, un 25% agua buena a muy buena y, un 29% agua mala a condicionada. La disponibilidad de esta información en formato digital mediante un SIG constituye una herramienta muy útil para la planificación, la toma de decisiones y el ordenamiento territorial, tanto a nivel público como privado.

Palabras clave: bebida animal, mapas, SIG

INTRODUCCION

La provincia de la Pampa dispone de una superficie de alrededor de 14 millones de hectáreas donde la principal actividad productiva es la ganadería bovina con sus distintas especializaciones: Cría, Cría-Recria, Ciclo Completo, Invernada y Tambo. Disponer de información referente a la calidad y accesibilidad del recurso agua para el abastecimiento de la demanda de estos sistemas productivos, constituye una herramienta estratégica de gran relevancia para la región. Sabemos que el agua constituye un elemento de suma importancia para el ganado ya que, entre otras funciones, transporta nutrientes y regula la temperatura corporal. Si bien el consumo de agua por parte de los animales depende de la raza, estado fisiológico, época del año, edad y tipo de alimentación, entre otras variables, se estima que un animal adulto consume entre un 8-10% de su peso vivo en agua por día. La escasez de agua en la región, así como su mala calidad, constituyen elementos que limitan seriamente el nivel productivo, pudiendo afectar el estado sanitario de los ani-

males por disminución del consumo de alimento, la pérdida de peso y trastornos digestivos, entre otros. A pesar de su importancia, resulta difícil determinar la calidad de agua para bebida de los animales, ya que no se pueden asignar límites absolutos para definir la aptitud de la misma. Ingestas de sustancias tóxicas en cortos períodos de tiempo pueden no tener efectos, el consumo de algunos nutrientes en elevadas concentraciones puede ser peligroso a largo plazo, los minerales en el agua pueden no ser tóxicos para el animal, pero pueden acumularse en carne y leche a concentraciones problemáticas para el consumo humano, por citar sólo algunos ejemplos.

Una primera aproximación para medir la calidad del recurso disponible, lo constituye la determinación de los Residuos Sólidos Totales (RST). Así, pueden establecerse ciertos rangos de concentración de sales. Un agua deficiente ($< 1000 \text{ mg/l}$), es aquella que por su bajo contenido salino no contribuye con minerales a la dieta animal y debe administrarse suplementación. Un agua muy buena (1000 a 2000 mg/l) contiene sales en cantidad adecuada para cubrir las necesidades no cubiertas por las pasturas. Por su parte, el contenido salino de un agua buena (2000 a 4000 mg/l) supera las necesidades del animal pero el sobrante puede eliminarse fácilmente, no generando complicaciones. El agua aceptable (4000 a 8000 mg/l) puede causar diarreas a animales no acostumbrados a la misma. El agua mala (8000 a 12000 mg/l) debe emplearse en animales acostumbrados pero con suma precaución y en ciertas épocas del año. Por último, el agua condicionada ($> 12000 \text{ mg/l}$) sólo debe utilizarse por un corto tiempo cuando no existe otra fuente de agua cercana ya que produce diarreas intensas y mortandades (Roberto *et al.*, 2008).

El efecto de la salinidad total se agrava cuando la

misma está dada principalmente por sulfatos o éstos se encuentran en relación 1:2 con los cloruros. Los sulfatos pueden ser de Calcio, Sodio o Magnesio, y confieren al agua propiedades purgantes y un sabor amargo que luego de un determinado tiempo produce cierto acostumbramiento en los animales. Los sulfatos en niveles superiores a 0.5 g/l interfieren con la absorción de Cobre y llegan a producir intoxicaciones cuando superan los 3 g/l (Sager, 2000). En algunas áreas del Caldenal se hallan mayores niveles de sales totales principalmente de sulfato de magnesio, que contribuye a la reducción significativa de los riesgos por una hipomagnesemia, aspecto que en otras zonas constituye un problema de significancia (Roberto *et al.*, 2008). El agua según el contenido de sulfato requiere suplementación con Cobre independiente del sistema productivo que se trate. Por lo tanto, el tenor salino total da una idea general de la calidad de agua, pero es sumamente importante determinar los elementos que la componen así como la cantidad de cada uno de ellos. Es por ello que, Bavera (2011) realiza una clasificación para calidad de agua para bebida de ganado bovino teniendo en cuenta las concentraciones de Cloruro de Sodio, Sulfatos y Magnesio presentes en el contenido de sales totales (Tabla 1).

El objetivo del presente trabajo fue clasificar el agua para uso ganadero bovino en los departamentos Chalileo y Limay Mahuíd y, generar una serie de mapas de distribución de las variables de interés para la región. En un segundo paso, se utilizó la capa de lotes catastrales para evaluar la cantidad de títulos que poseen determinada calidad de agua. Esta información en su conjunto, permite mejorar el aprovechamiento del recurso en zonas donde es limitado y facilitará el diseño de alternativas para moderar el déficit (tajamares, acueductos).

Tabla 1. Clasificación de las aguas para bebida de ganado bovino según su salinidad (adaptado de Bavera 2011).

| Cría | Invernada Pastoril | Tambo bovino y engorde a corral | | Sales totales (g/l) | Cloruro de Na (g/l) | Sulfato (g/l) | Magnesio (g/l) |
|--------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------|----------------|
| Deficiente | Deficiente | Deficiente | Menos de | 1 | - | - | - |
| Muy Buena | Muy Buena | Muy Buena | Más de | 1 | 0.6 | 0.5 | 0.2 |
| Muy Buena | Muy Buena | Buena | Hasta alrededor de | 2 | 1.2 | 1 | 0.25 |
| Buena | Aceptable | Aceptable | Hasta alrededor de | 4 | 2.4 | 1.5 | 0.3 |
| Aceptable | Mala | Mala | Hasta alrededor de | 7 | 4.2 | 2.5 | 0.4 |
| Mala | - | - | Hasta alrededor de | 11 | 6.6 | 4 | 0.5 |
| Condicionada | - | - | Hasta alrededor de | 13 | 10 | 7 | 0.6 |



Figura 1. Ubicación del área de estudio (departamentos Chalileo y Limay Mahuida, La Pampa).

MATERIALES Y METODOS

Descripción del área de estudio

El área de estudio comprendió los departamentos de Chalileo y Limay Mahuída ubicados en el sector occidental de la provincia de La Pampa, cubriendo un área aproximada de 1.873.951 hectáreas (Figura 1). La región se caracteriza por una muy baja densidad poblacional. Según datos del Censo Nacional de Población y Vivienda del año 2010 se registran 3488 habitantes (INDEC, 2012).

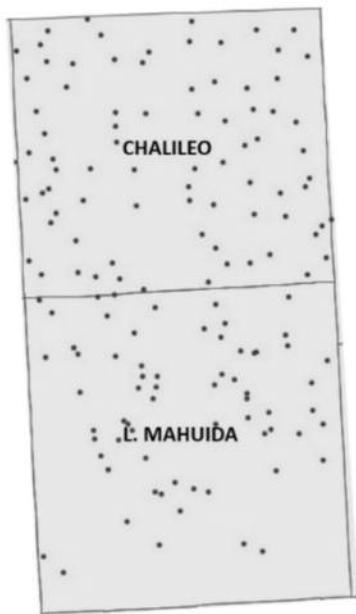
Según el Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa, se distinguen tres sub-regiones naturales: a) llanuras aluviales del Atuel-Salado, b) cordones medanosos y planicies arenosas y, c) llanura aluvial antigua con modelado eólico (INTA *et al.*, 2004). En general, la región posee suelos muy pobres, sin ningún tipo de desarrollo y con predominio de médanos y planicies arenosas. Este escenario en conjunto con las escasas precipitaciones determina condiciones climáticas de características semidesérticas, condicionantes para el desarrollo de actividades agropecuarias (Sec. Rec. Hídricos de La Pampa, 2012). El departamento Chalileo y la franja norte de Limay Mahuida forman parte de la “Región Central”, donde la acción

fluvial de los ríos Atuel y Salado, sumado a la acción eólica, generaron un paisaje de cordones medanosos intercalados con planicies residuales, donde es posible reconocer pastizales sammófilos, arbustales perennifolios y bosque caducifolio (Caviglia *et al.* 2010).

El promedio anual histórico de las precipitaciones (serie de 32 años) para las localidades de la región son: Santa Isabel 473.5 mm (\pm 207.3 mm), La Pastoril 465.9 mm (\pm 246.0 mm), L. Mahuída 352.6 mm (\pm 187.2 mm) y, La Reforma 381.9 mm (\pm 157.1 mm); siendo el promedio anual histórico para la región de alrededor de 418.5 mm (\pm 182.6 mm) (datos de APA).

La explotación ganadera extensiva en los departamentos del centro oeste provincial está representada por ganadería bovina, ovina y caprina. Históricamente los ovinos fueron cediendo terreno que fue ocupado por la ganadería bovina, que desde la década del '60 hasta la actualidad ha incrementado notoriamente su cantidad y calidad. En general, la mayor parte de las explotaciones del territorio poseen producciones ganaderas de bovinos en coexistencia con caprinos o “mixtas”. Le siguen en número, aquellas cuya producción es solamente caprinera, mientras que los ovinos constituyen una

POZOS RED APA



PROFUNDIDAD NIVEL ESTÁTICO (m)

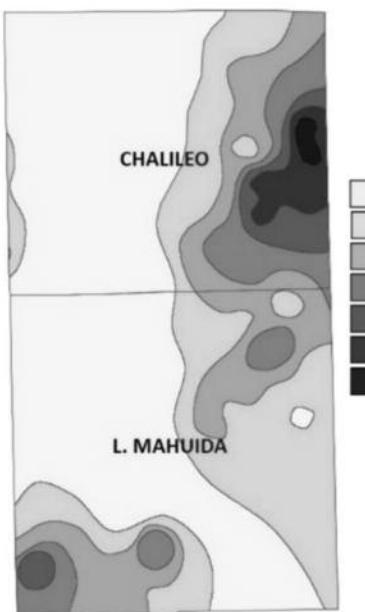


Figura 2. A la izquierda: ubicación de la red de pozos de APA utilizada para el presente trabajo. A la derecha: mapa de profundidad del nivel estático (metros) de los pozos.

producción marginal destinada básicamente al consumo local y familiar (Sec. Rec. Hídricos de La Pampa, 2012).

Bases de datos e información

Las bases de datos utilizadas provienen de los análisis de calidad de agua en pozos de la Administración Provincial del Agua de La Pampa (APA) para los departamentos Chalileo y Limay Mahuida. En un trabajo previo de Roberto *et al.* (2008), donde se mapeó residuos sólidos totales presentaban una gran superficie con aguas en categoría mala a condicionada. Ambos departamentos contienen alrededor de 185 pozos analizados, cuya distribución se visualiza en la Figura 2. Dichos pozos presentan una gran variabilidad de profundidad de nivel estático, con valores por debajo de los 10 m hacia el Oeste de la región, y valores superiores a los 50 m hacia el Noreste de la misma (Figura 2), en general Chalileo presenta niveles freáticos más profundos que Limay Mahuida. Del área total de estudio, casi el 50% presenta profundidades menores a los 10 m, un 38 % entre 10-30 m y, un 12% entre 30-60 m (sólo una muy pequeña zona del departamento Chalileo supera los 60 m de profundidad).

En un primer paso, las bases de datos tuvieron que ser ordenadas y acondicionadas para permitir su vinculación con un Sistema de Información Geográfica libre y gratuito, gvSIG. Posteriormente,

se estudiaron las variables que se pretendían mapear para generar categorías de calidad de agua. Para las clasificaciones se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica acerca de límites de tolerancia del ganado, así como los efectos de distintos elementos en el bienestar sanitario de los animales. Teniendo en cuenta a Bavera (2011), las categorías utilizadas según los límites de cada variable en particular fueron las siguientes: 1) Deficiente: aguas que por su bajo contenido salino no contribuyen con minerales a la dieta presentando los animales síntomas de pica y/o hambre de sal. Esto se soluciona administrando suplementación mineral; 2) Muy buena: agua que contiene sales en cantidad adecuada para cubrir las necesidades minerales que las pasturas no brindan; 3) Buena: aguas cuyo contenido salino supera las necesidades del animal pero sin acarrear serios problemas, pues se eliminan eficientemente los excedentes; 4) Apta: puede causar diarreas a animales no acostumbrados y disminución en la producción; 5) Mala: puede emplearse en animales acostumbrados con precaución, en ciertas épocas y con ciertas pasturas. El estado general de la hacienda es malo, disminuye la producción y puede haber mortandades; 6) Condicionada: debe emplearse por poco tiempo y cuando no existe otra fuente de agua cercana y con mucha precaución. Produce diarreas intensas, mortandad y 7) No apta: no debe emplearse para el ganado en ninguna circunstancia.

Una vez ubicados espacialmente los pozos, a través del software se realizaron las interpolaciones de las variables de interés y, por otro lado mediante una planilla de cálculo (Microsoft Excel), se calcularon las combinaciones hipotéticas. Las mismas son cálculos complementarios al análisis de agua que se efectúan para determinar en aguas de elevada salinidad, cuál de ellas es relativamente mejor, ya que el dato de residuos sólidos totales da la idea de la salinidad de la misma pero no nos dice nada acerca de qué tipo de sales tiene. Estas determinaciones se obtienen expresando las sales en orden creciente de solubilidad, es decir, el orden más probable en que se pueden combinar los cationes y aniones para formarlas (Bavera, 2011).

Una vez efectuados todos los cálculos, se generaron los mapas correspondientes a cada variable para determinar calidad de agua para uso ganadero bovino. Dichas variables fueron: Residuos Sólidos Totales (RST), Sales según Bavera (Tabla 1), Cloruro de Sodio (ClNa), Sulfatos Totales (SO_4), Sulfatos de Sodio (SO_4Na), Sulfatos de Magnesio (SO_4Mg), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), relación Calcio/Magnesio (Ca/Mg), relación Sulfatos/Cloruros (SO_4/Cl), Flúor (F), Arsénico (As) y Nitratos (NO_3), todas expresadas en miligramos por litro (mg/l).

Es sabido que el contenido de sales en agua de bebida puede ser problemático para el animal tanto por déficit como por exceso. Aguas con un tenor salino $< 1 \text{ g/l}$ provocan “hambre de sal” si el animal no consume pastos de buena calidad y es necesario la suplementación mineral. En el otro extremo, un valor límite de sales totales sería de $7-11 \text{ g/l}$ siempre que predomine el cloruro de sodio y no se presenten valores altos de Magnesio y Sulfatos. Cuando los valores son más elevados se presenta un desbalance mineral en el animal originando menor apetito y consumo de alimentos, acompañado de una disminución del peso corporal, debilidad y diarrea. Aguas con contenido salino entre $4-5 \text{ g/l}$ pueden influir favorablemente en el desarrollo y crecimiento y, aún con tenores más altos si los pastos son de mala calidad (aguas engordadoras) (Bavera, 2011).

Los cloruros pueden ser de Ca, Mg, Na y K, siendo los dos últimos los menos perjudiciales, y el de Na el más frecuente. Si bien resultan menos nocivos que los sulfatos, con concentraciones de 15 g/l de cloruro de sodio, los animales solo mantienen el peso corporal y, con valores $> 20 \text{ g/l}$ se produce anorexia, pérdida de peso, deshidratación y los ani-

males entran en un estado letárgico. Si existe presencia de cloruro de magnesio, el límite admitido es de sólo 2 g/l . La intoxicación crónica produce debilidad y pérdida de peso (Bavera, 2011).

Los sulfatos más comunes son los de sodio y magnesio, siendo el de calcio el menos perjudicial. Le otorgan al agua un sabor amargo y repugnante. Concentraciones $> 800 \text{ mg/l}$ afectan el metabolismo mineral y causan deficiencia en cobre, zinc, hierro y manganeso. También pueden tener un efecto laxante (en especial, el de Mg), producir casos esporádicos de polioencefalomalasia y afectar negativamente los microorganismos ruminantes. Sin embargo es un elemento necesario ya que es activante de la digestión de celulosa y necesario para formar aminoácidos azufrados en el rúmen. También actúa sobre el equilibrio ácido-básico por alterar el tenor de calcio y fósforo normal en suero. En animales de cría acostumbrados, el máximo tolerable de sulfatos es de 4 g/l (Bavera, 2011). La relación sulfatos/cloruros cobra importancia cuando el contenido de residuos sólidos totales del agua es de 7 g/l o superior. En este caso, si la relación es 1:2 no es aconsejable su uso.

El calcio y el magnesio contribuyen a la dureza del agua, nombre que deriva de la propiedad que tienen dichos cationes de precipitar las soluciones jabonosas. Hay que tener en cuenta que en aguas superficiales la dureza es directamente proporcional al residuo seco o conductividad eléctrica pero, en aguas subterráneas, depende además del tipo de depósito geológico que el agua ha atravesado. El calcio por su parte es necesario para numerosas funciones: la formación de huesos y dientes, el crecimiento muscular, la producción de leche, la transmisión de impulsos nerviosos, la regulación del ritmo cardíaco, la coagulación de la sangre, la permeabilidad de las membranas, la contracción muscular, la secreción de hormonas y la actividad enzimática. Contenidos muy altos de calcio reducen la absorción del manganeso y zinc, y afectan el metabolismo de fósforo, magnesio y algunos oligoelementos, provocando la reducción del consumo y por ende, de la ganancia de peso. El magnesio es responsable de la activación de más de 300 enzimas y, por lo tanto, esencial para todos los procesos de biosíntesis. También tiene un papel relevante en la actividad de la flora celulolítica del rumen mejorando la digestibilidad de la celulosa. Por el contrario, un contenido elevado en el agua produce un sabor

Tabla 2. Límites de seguridad y máximo para agua de bebida de ganado vacuno. Fuente: adaptado de Sager (2000).

| VARIABLE | LIMITE SEGURIDAD mg/l | LIMITE MAXIMO mg/l |
|---------------|--------------------------|-----------------------|
| Sales Totales | 7000 | 12000 |
| Cloruros | 7000 | 10000 |
| Sulfatos | 300 | 700 |
| Nitratos | 250 | 500 |
| Nitritos | 1 | 2,5 |
| Magnesio | 250 | 400 |
| Calcio | 120 | 1000 |
| Arsénico | 0,3 | 0,5-1 |
| Fluoruros | 1,5 | 2 |

amargo intenso, desagradable y puede provocar diarrea cuando se une con el cloro. Los vacunos adultos pueden admitir concentraciones de 0,5 g/l (Bavera, 2011). Si existe una alta concentración de calcio en el agua, los animales toleran mejor los sulfatos. Por ello resulta muy útil calcular la relación Ca/Mg (debe ser ≥ 2), ya que el calcio ayuda a reducir los sulfatos.

La mayoría de las aguas ricas en flúor son duras, en las que el calcio y el magnesio actúan favorablemente dificultando la absorción del mismo por el tubo digestivo. Es beneficioso en pequeñas cantidades (hasta 2 mg/l) ya que ayuda a mantener la dureza de los dientes y huesos, pero en exceso, puede producir lesiones en los mismos así como retardar el crecimiento por intoxicación crónica. También puede provocar osteomalacia, osteoporosis y exostosis. Un valor normal de flúor en agua de bebida sería 0,8-1,5 mg/l, con valores entre 2-5 mg/l puede haber moteado de dientes y, valores de 15-16 mg/l produce intoxicación crónica. Hay que aclarar que la provincia de La Pampa presenta valores de flúor que van desde 1 a 13 mg/l y el animal acostumbrado tiende a acumularlo en el tejido óseo sin mayores cambios en el peso corporal (Bavera, 2011).

El arsénico es un elemento común en las aguas subterráneas ya que deriva de minerales depositados por emanaciones volcánicas, sin embargo, en aguas ricas en sales de calcio y magnesio, aparecerá en muy baja concentración. La presencia de arsénico está muy asociada a la de flúor. Su forma inorgánica es la más tóxica derivada del uso de herbicidas y pesticidas, siendo la forma trivalente más tóxica que la pentavalente. Aún en dosis pequeñas puede acumularse principalmente en hígado y riñón.

Esta intoxicación crónica produce depresión, falta de apetito, debilidad, diarreas sanguinolentas por gastroenteritis hemorrágica. Sin embargo, en el país no hay casos documentados de este tipo de intoxicación debido a la corta estadía del animal en el campo. Se considera como valor máximo de tolerancia 0,5 a 1 mg/l, aunque no es recomendable exceder los 0,3 mg/l (Bavera, 2011).

En general, los Nitratos y Nitritos son poco frecuentes en agua, salvo en contacto con terrenos contaminados por materia orgánica, fertilizantes nitrogenados, etc. Los Nitratos por sí solos son poco tóxicos pero poseen acción cáustica en grandes cantidades sobre la mucosa digestiva, provocando gastroenteritis. En ciertas ocasiones se reducen a Nitritos en cantidades suficientes para intoxicar (los NO₂ son 2,5 veces más tóxicos que los NO₃). La reducción puede darse en el agua, los alimentos o el tracto digestivo y, una elevada cantidad de NO₃ puede provocar acumulación de nitritos en rumen. Los nitritos se combinan con la hemoglobina de la sangre produciéndose metahemoglobina, incapaz de actuar como portadora de oxígeno, provocando anoxia. Los animales intoxicados presentan diarrea, salivación, cólicos, disnea, temblores, respiración acelerada, etc. Valores de nitratos en agua de hasta 44 mg/l, no tienen efectos en los animales (Bavera, 2011).

Resumiendo, se podrían diferenciar dos límites: un límite de seguridad (Lseg) y un límite máximo de tolerancia (Lmáx) (Tabla 2). Si bien es difícil establecer normas rigurosas debido a la gran variabilidad de situaciones, resulta útil tener valores guía que orienten la toma de decisiones en los diferentes sistemas de producción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3, se observan los mapas resultantes para residuos sólidos totales, sales totales según Bavera (ver Tabla 1) y cloruro de sodio. Del análisis y comparación de los mismos, surge que en ambas clasificaciones (RST y Sales Totales según Bavera) las 3 categorías representadas con mayor superficie corresponden a apta (38 a 42%), mala (22 a 26%) y buena (16 a 17%). Las restantes categorías con superficies bastante menores (condicionada 7 a 9%, muy buena 7 a 8% y, deficiente 3 a 4%). Si bien en líneas generales el peso de cada categoría es el mismo, existen algunas diferencias en los porcenta-

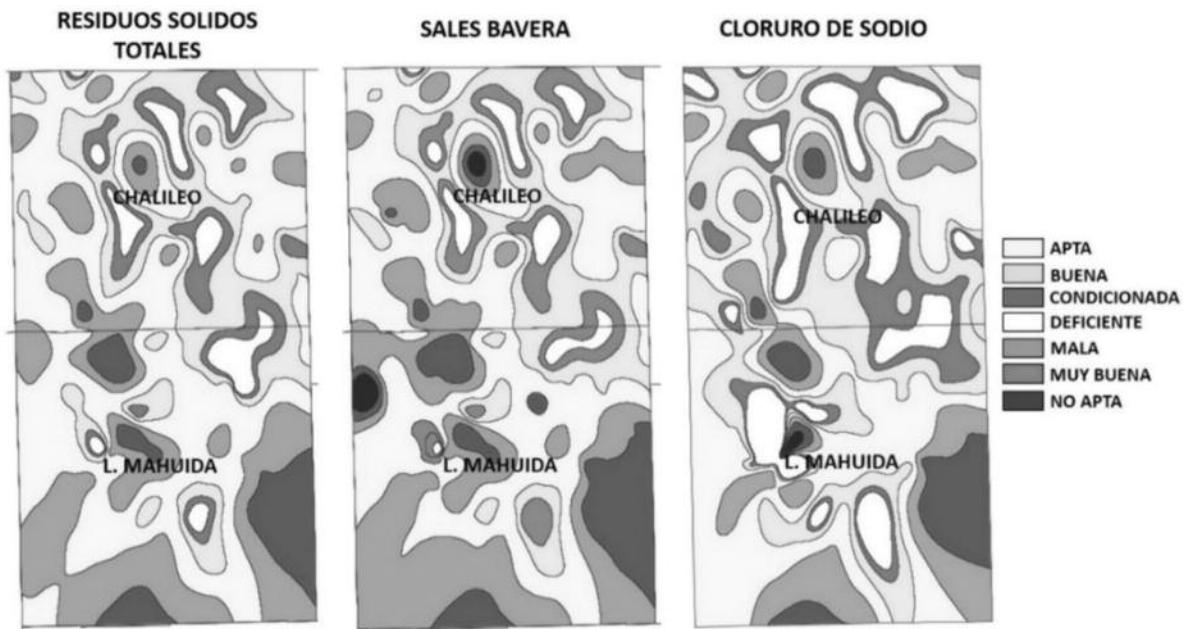


Figura 3. Mapas de Residuos Sólidos Totales, Sales Totales (Bavera, según Tabla 1) y Cloruro de Sodio, en mg/l.

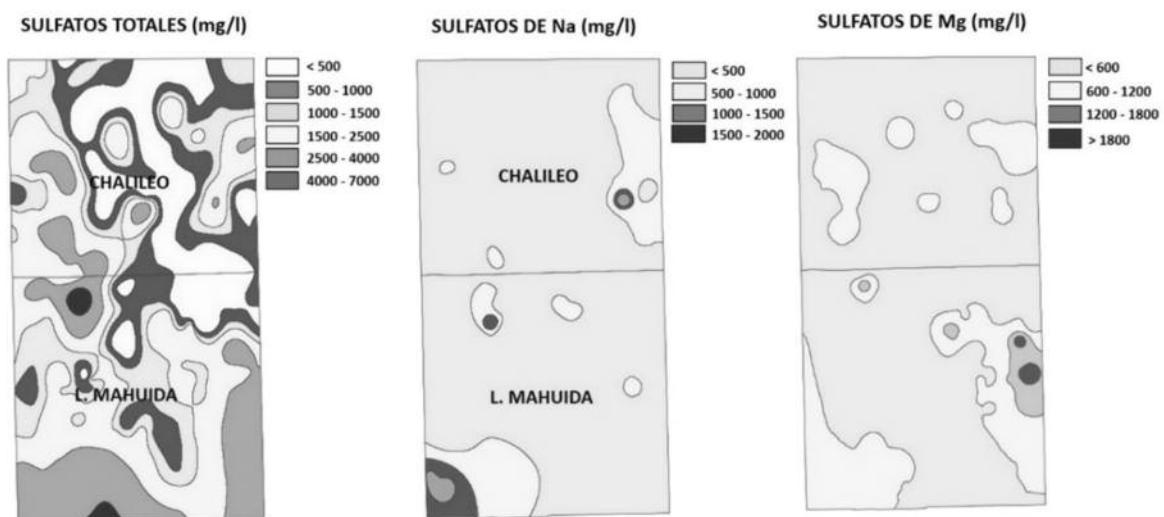


Figura 4. Mapas de Sulfatos Totales, Sulfatos de Sodio y, Sulfatos de Magnesio en mg/l.

jes de superficie. Con el segundo método, algunas categorías aumentan su superficie (+3%, +2% y +1% para mala, condicionada y muy buena, respectivamente), mientras que otras disminuyen (-4%, -2% y -1% para apta, buena y deficiente, respectivamente). Si bien estos valores por sí solos no dicen mucho, cuando se comparan en detalle los mapas, se observa que aguas que teniendo en cuenta sólo RST pertenecen a una categoría de mejor calidad pueden pasar a una de menor calidad cuando además se tienen en cuenta el tipo de sales presentes.

Los departamentos se diferencian en algunos aspectos: Chalileo presenta un 5% de su superficie con problemas de deficiencia de sales, mientras que Limay Mahuida presenta una seria problemática de exceso de las mismas (51% del departamento, categoría condicionada y mala). Esta diferencia podría estar relacionada a la diferente textura de sus suelos (Chalileo al tener una zona de médanos, posee agua más dulce). Las mejores calidades de agua (buenas a muy buenas) abarcan un 35% de la superficie de Chalileo, mientras que en Limay Mahuida

sólo el 13% del departamento.

En cuanto al Cloruro de Sodio, el 12% del área total presenta aguas deficientes, el 35% aguas buenas a muy buenas y, el 20% aguas condicionadas a malas, siendo el 33% restante aguas de categoría apta. La situación es algo distinta en cada departamento: el 15% de Chalileo presenta deficiencias de cloruros (Limay Mahuida 9%), mientras que el 29% de Limay Mahuida tiene exceso, categorías mala, condicionada y no apta (Chalileo 10%). Mientras que el 47% de Chalileo tiene aguas buenas a muy buenas, en Limay Mahuida esas categorías suman el 24%.

En la Figura 4 se observan los mapas obtenidos para sulfatos totales, sulfatos de sodio y sulfatos de magnesio. En líneas generales un 34% de la superficie total posee agua buena a muy buena, 31% apta, 18% condicionada a mala y un 16% deficiente en sulfatos. Chalileo presenta un 26% de su superficie con deficiencia de sulfatos en la parte central, mientras que en Limay Mahuída un 29% de la superficie del departamento tiene excesos (en Chalileo sólo 7%).

En cuanto a los sulfatos de sodio, ambos departamentos tienen problema de déficit (85% del área total de estudio), pero Limay Mahuída presenta un área mayor con exceso que Chalileo, en su parte occidental (1000-2000 mg/l). Mientras que, para el sulfato de magnesio, Chalileo no presenta problemas de exceso, pero sí el sector oriental de Limay Mahuída (> 1200 mg/l). El 67% de Limay Mahuída

tiene aguas con contenidos de $\text{SO}_4\text{Mg} < 600$ mg/l, mientras que en Chalileo ese porcentaje es del 83%.

La Figura 5 muestra los mapas resultantes para calcio y magnesio. Para el calcio, Chalileo tiene un 52% de su superficie con contenidos < 250 mg/l, mientras que Limay Mahuida presenta en general, buenos niveles (sólo 7% de su superficie con valores < 250 mg/l). En el caso del magnesio ambos departamentos presentan una gran superficie con contenidos inferiores a los 200 mg/l (50% Limay Mahuida y 68% Chalileo).

Se calcularon las relaciones Ca/Mg y Sulfatos/Cloruros. En general para Ca/Mg la mayor superficie corresponde a valores cercanos a 2, lo que estaría indicando más tolerancia a los sulfatos (60% del área total). En cuanto a la relación Sulfatos/Cloruros, un valor de 2 está indicando el doble de concentración de sulfatos por sobre los cloruros. En esta condición se encuentra aproximadamente el 65% del área de estudio (situación aún más problemática en Chalileo que en Limay Mahuida).

Por último, en la Figura 6, se presentan los mapas resultantes de flúor, arsénico y nitratos. En cuanto al flúor, del área total analizada, un 13% posee valores inferiores a 0.8 mg/l, 85% tiene valores entre 0.8-4.8 mg/l y, un 2% supera los 4.8 mg/l (casi ubicado por completo en el departamento Chalileo). No se evidencian problemas de arsénico, excepto en un sector bien localizado de Chalileo

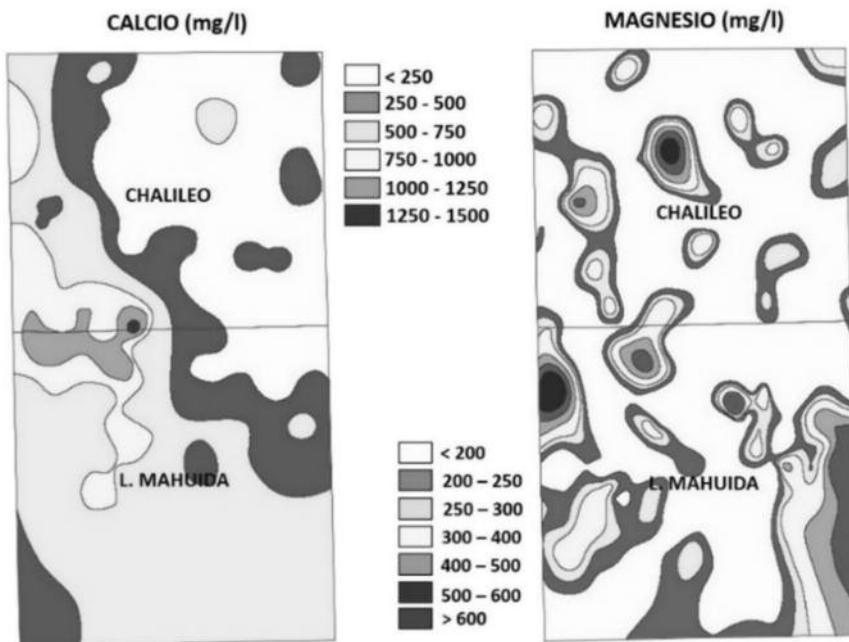


Figura 5. Mapas de Calcio y Magnesio en mg/l.

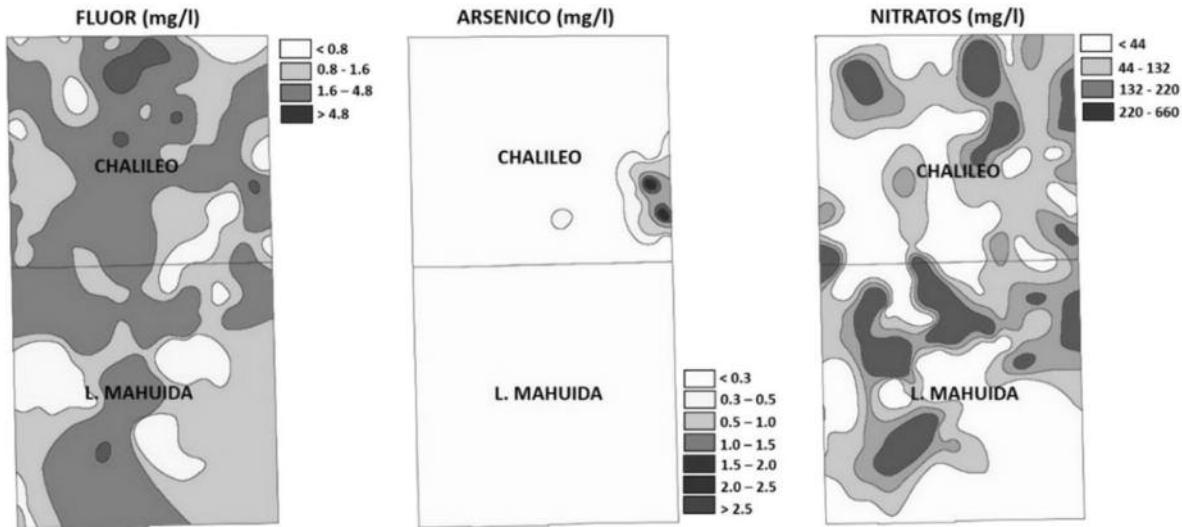


Figura 6. Mapas de Flúor, Arsénico y Nitratos en mg/l.

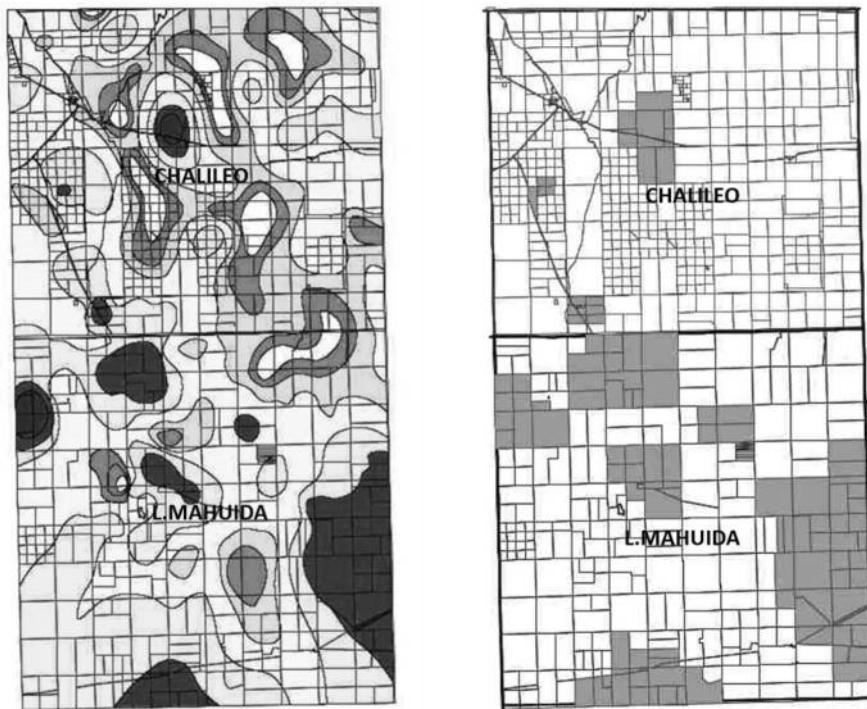


Figura 7. A la izquierda: mapa de Sales Totales (según Bavera, Tabla 1), y la respectiva división catastral de los departamentos Chalileo y Limay Mahuida. A la derecha: títulos catastrales con algún porcentaje de su superficie ocupada con agua de categoría condicionada.

(parte occidental), donde existen niveles que, en alguna situación puntual superan los 2.5 mg/l. Por último, en el caso de los nitratos un 43% del área total no supera los 44 mg/l, un 45% presenta valores entre 44-220 mg/l y, un 12% entre 220-660 mg/l. En Limay Mahuida esta última categoría llega al 14% de la superficie del departamento, siendo menor en Chalileo (10%). Un 40% de Chalileo tiene niveles de nitratos inferiores a 44 mg/l, mientras que en Limay Mahuida esta categoría representa el 45%.

Resumiendo los resultados de los mapas, se puede decir que en cuanto a sales, Limay Mahuida presenta mayor superficie con aguas de categoría mala a condicionada (> 8000 mg/l), correspondiendo una parte a SO_4Mg con contenidos superiores a 600 mg/l. Chalileo por su parte tiene un buen porcentaje de su superficie con aguas con contenido de sulfatos totales entre 500-1500 mg/l. En cuanto al calcio, Chalileo presenta una gran superficie con aguas deficientes (< 500 mg/l), mientras que en

Limay Mahuida en general, existen buenos niveles (500-750 mg/l). Los mapas revelan deficiencia de magnesio en ambos departamentos (< 200 mg/l), salvo en algunos casos muy puntuales de exceso. Los valores de flúor son en general medios a altos para ambos departamentos (0.8-4.8 mg/l). No se evidenciaron problemas de arsénico, excepto en la zona centro-oriental de Chalileo que en algunos casos supera los 2.5 mg/l (situación que puede estar asociada al material geológico que dio origen a los suelos actuales). Por último, en el caso de los nitratos existen algunas zonas problemáticas en ambos departamentos con valores entre 220-660 mg/l, pudiendo indicar una potencial contaminación bacteriológica o el uso de fertilizantes nitrogenados.

Por último, al mapa de Sales Totales según Tabla 1 se le superpuso la capa de lotes catastrales (Figura 7, izquierda). Mediante la herramienta intersección fue posible determinar la cantidad de títulos que poseen determinada calidad de agua. Hay que aclarar que cada título puede tener agua de una o varias categorías de calidad, y que a su vez, se puede ser propietario de uno o más títulos simultáneamente. Del total de títulos para toda el área de estudio (1033 títulos), aproximadamente el 60% posee en alguna proporción de su superficie agua apta. Un 38% posee agua buena, un 37% agua mala, un 22% agua muy buena, un 13% agua condicionada, un 9% agua deficiente y, un 1% agua no apta. Si bien en ambos departamentos el porcentaje de títulos que tienen en alguna proporción de su superficie agua de categoría no apta es bajo (< 2.5%), en el caso de Limay Mahuida el porcentaje de títulos con agua condicionada (34%) es bastante más elevado que el de Chalileo (5%) (Figura 7, derecha).

CONCLUSIONES

Disponer de información referente a la calidad y accesibilidad del recurso agua para el abastecimiento de la demanda de los sistemas productivos, constituye una herramienta estratégica de gran relevancia para la región. La escasez de agua, así como su mala calidad, constituyen elementos que limitan seriamente el nivel productivo pudiendo afectar el estado sanitario de los animales. Por lo tanto, la ubicación y mapeo de la calidad de agua para uso ganadero posibilita un mayor asesoramiento a productores a los efectos de mejorar el aprovechamiento de este recurso limitado.

La disponibilidad de esta información en formato digital mediante un SIG constituye una poderosa herramienta para la planificación, la toma de decisiones y el ordenamiento territorial a nivel público y privado. La identificación y localización de las áreas departamentales con índices de calidad problemáticos, sumada a otras capas de información como textura de los suelos, altimetría, precipitaciones, etc., permite ofrecer soluciones alternativas tendientes a moderar el déficit de calidad a través de la construcción de tajamares y tendido de acueductos. Si bien los RST constituyen un indicador inicial que orienta sobre la calidad del agua para consumo ganadero es muy importante conocer la concentración de los distintos elementos que participan en la composición de dichos residuos. La comparación y análisis de los mapas aquí presentados permiten un mayor ajuste al momento de la toma de decisiones, siendo conscientes que además deben considerarse otros factores que afectan al consumo, la tolerancia a diferentes contenidos salinos y el tipo de sistema de producción de la zona en estudio.

BIBLIOGRAFIA

- Bavera, G.A. (2011). Aguas y aguadas para el ganado. 4º Edición. Río Cuarto: Imberti-Bavera. 498 pp. ISBN 978-987-27332-0-9.
- Caviglia, J.A.; Lorda, H.O.; Lemes, J.D. (2010). Caracterización de las unidades de producción agropecuarias en la provincia de La Pampa. Boletín de Divulgación Técnica Nº 99. Ediciones INTA. 43 pp.
- INDEC (2012). Resultados del Censo Nacional de Población y Viviendas 2010. <http://www.indec.gov.ar/>
- INTA, Provincia de La Pampa, UNLPam. (2004). Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (re-edición de la versión del año 1980, complementada con vertebrados). En: <https://recursosnaturales.lapampa.edu.ar/>
- Roberto, Z.; Tulio, J.; Malán, J. (2008). Cartografía de agua subterránea para uso ganadero en La Pampa. Publicación Técnica Nº 73. Ediciones INTA. 27 pp.
- Sager, R.L. (2000). Agua para bebida de bovinos. INTA E.E.A San Luis. Reedición de la Serie Técnica Nº 126. www.produccion-animal.com.ar
- Secretaría de Recursos Hídricos, Gobierno de La Pampa (2012). Caracterización de la producción ganadera en el área de influencia del sistema Desaguadero Salado-Chadileuvú-Curacó y su afluente Atuel, en el territorio provincial. <http://www.lapam>

**Nivel
Local:
Caso**

2

Sistema de Información Geográfica como base para la gestión y planificación del área bajo riego “El Sauzal”, La Pampa

RESUMEN

El sistema de aprovechamiento agrícola El Sauzal cuenta con 4000 hectáreas de extensión y un 98% de su superficie sistematizada. Fue creado en la segunda mitad de los años 60 con un fin exclusivamente agrícola. Sus pobladores, principalmente españoles e italianos, fueron atraídos por la disponibilidad de tierras aptas para el cultivo de frutas y alfalfares. La suma de diversos factores hizo que esta zona productiva no lograra prosperar con el proyecto fruti-hortícola original.

Actualmente, si bien existe mucha información sobre la zona, la misma se encuentra desactualizada, en formato papel o con acceso difícil a su consulta, lo cual dificulta enormemente la posibilidad de realizar un diagnóstico integral del escenario actual del área de interés. Es por ello que el objetivo de este trabajo es generar información actualizada, completa, digital y calificada de la situación socio-productiva de la región, para tener un escenario concreto del cual partir a la hora de planificar alternativas productivas viables. La información generada de dicho trabajo fue cargada en un sistema de información geográfica (SIG). Este sistema ayuda a organizar los datos respecto del objetivo planteado y entender su distribución espacial, creando una base de datos para hacer más sensible e inteligente la toma de decisiones.

Palabras clave: 25 de Mayo, área bajo riego, El Sauzal, río Colorado

INTRODUCCIÓN

El sistema de aprovechamiento agrícola El Sauzal constituye la primer área de regadío puesta en marcha del Sistema de Aprovechamiento Múltiple 25 de Mayo (SAM). Cuenta con 4000 hectáreas de extensión y un 98% de su superficie sistematizada. Fue creado en la segunda mitad de los años 60, y una década más tarde se crea la Ampliación de El sauzal cuya función en su comienzo fue exclusivamente agrícola. Estas dos áreas rodean totalmente al casco urbano de 25 de Mayo y reciben el agua mediante un canal principal que proviene del río Colorado. Esta derivación se realiza a partir de una boca-toma de la cual se desprenden dos canales principales de abastecimiento y un canal de descarga. Desde allí, se genera una red de canales secundarios y terciarios que son los que terminan llevando el agua a cada una de las chacras (Michelini, 2010). En sus comienzos (1960) El Sauzal intentó imitar los sistemas de producción frutícolas del Alto Valle de Río Negro y Neuquén que hasta ese momento ya llevaban 80 años de actividad (Michelini, 2010). En dicha región sus pobladores, principalmente españoles e italianos, fueron atraídos por la disponibilidad de tierras aptas para el cultivo de frutas y alfalfares (Castello *et al.*, 1989). En El sauzal este tipo de producción no logró prosperar; la suma de diversos factores provocaron esta declive productiva, entre los que se destaca la imposibilidad de competir con las producciones de Río Negro y Neuquén, sumado a la ausencia de un sistema ferroviario que es fundamental para el funcionamiento de la cadena comercial.

Posteriormente a la crisis y al endeudamiento, muchos productores abandonaron la actividad en sus chacras; otros intentaron diferentes alternativas que le permitieran subsistir, en algunos casos este objetivo no logró cumplirse y después de varios fracasos terminaron abandonado la actividad. Esta situación llevo a que muchos propietarios decidan subdividir y vender sus lotes, en muchos casos sin la documentación legal necesaria, por lo que el catastro se encuentra actualmente desactualizado.

Los cambios en el uso de la tierra que ha sufrido la región son claros. Dichos cambios fueron producto de la combinación de factores políticos, económicos y sociales, que empujaron a la producción agrícola hacia diferentes escenarios para lograr subsistir. La historia política, social y económica de 25 de Mayo es compleja. Diversas políticas intentaron poner en marcha la región, entendiendo el potencial que le otorga su ubicación en la margen del río Colorado. Así, la explotación de tierras incluidas en el SAM fue el objetivo de los diferentes gobiernos de turno, con el fin de desarrollar la economía provincial. Las obras de infraestructura hidráulica que se llevaron a cabo lograron generar 46.000 hectáreas bajo riego, de las cuales hoy sólo 4.600 hectáreas son explotadas (EPRC, 1999 revisado en Michelini, 2010).

En la actualidad se perciben establecimientos abandonados y otros con algún tipo de producción, aunque esta información proviene de una mera percepción. Si bien existe mucha información sobre la zona, la misma se encuentra desactualizada, en formato papel o con acceso difícil a su consulta, lo cual dificulta enormemente la posibilidad de realizar un diagnóstico integral del escenario actual del área de interés. Es por la falta de información disponible y por la demanda de los productores de reactivar sus establecimientos, que se propuso realizar un relevamiento de El Sauzal en una primera etapa y de Ampliación de El sauzal en una etapa posterior. Este relevamiento tiene como objetivo generar información actualizada, completa y confiable (con rigor científico) de la situación socio-productiva de la región, para contar con un escenario concreto del cual partir a la hora de planificar alternativas productivas viables. La información generada de dicho trabajo será cargada en un sistema de información geográfica (SIG). Según Buzai (1992), un SIG ayuda a organizar los datos respecto del objetivo planteado y entender su distribución espacial, creando una

base de datos para hacer más sensible e inteligente la toma de decisiones; además, su capacidad para obtener y presentar los datos de los análisis en mapas temáticos, resulta fundamental en cualquier estudio geográfico. El funcionamiento se basa en la capacidad para enlazar los datos alfanuméricos a las entidades geográficas a través de un identificador común y permite construir mapas para representar las diferentes situaciones (Durand Zurdo, 2009).

MATERIALES Y MÉTODOS

Al día de la fecha se encuentra realizado el relevamiento de El Sauzal, el cual se llevó a cabo por medio de una encuesta extensa y completa destinada a los productores y/o propietarios de las chacras. En dicha tarea participaron diferentes instituciones: Ministerio de la Producción de La Pampa, la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam), el Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Agricultura Familiar Región Patagonia (IPAF Patagonia) y la Agencia de Extensión Rural INTA 25 de Mayo. Estas instituciones participaron de la confección del modelo de encuesta aportando diferentes enfoques para enriquecer el estudio a realizar. La confección del modelo final de la encuesta se realizó durante cuatro encuentros donde se analizaron todos los puntos incluidos. Una vez finalizada se procedió a probarla con un grupo de productores para evaluar su funcionamiento y ajustar los puntos que fueran necesarios.

La encuesta realizada a los productores se dividió en varias partes:

1. Identificación del establecimiento, del productor y del dueño de la propiedad.
2. Datos de la explotación (catastro, tamaño total, superficie en producción, tenencia de la tierra).
3. Usos de la tierra con fines productivos (agrícola, actividad pecuaria, caprinos, ovinos, porcinos, equinos, otras producciones).
4. Asesoramiento técnico y financiero.
5. Infraestructura (fuente de agua, electricidad, infraestructura ganadera).
6. Maquinarias en uso (cuál, propia, alquilada, etc.).
7. Riego (tipo y superficie regada).
8. Características del suelo (nutrientes, erosión de suelo, yeso, salinidad, profundidad de suelo).



Figura 1. Mapa Catastral de El Sauzal y Ampliación de El Sauzal.

9. Composición del hogar (nombre, edad, ocupación, nivel de instrucción, asignaciones estatales, etc.).

10. Contratación de mano de obra (tipo de contrato, tarea, género, procedencia).

Cada apartado constó de diversas preguntas para obtener una información completa. Se pretendió desarrollar un cuestionario de preguntas cerradas para que luego sea más sencillo el procesamiento de los datos.

El relevamiento se realizó durante cuatro jornadas consecutivas en octubre de 2014. El área de interés (Figura 1) se dividió en cuatro zonas y cada una de ellas fue encuestada por un grupo de profesionales de las diferentes instituciones participantes. Una vez culminado el relevamiento propiamente dicho, los cuatro grupos procedieron a repasar la información obtenida para clarificar cualquier dato que pudiera generar confusión. Posteriormente se procedió a la carga de la información en el SIG.

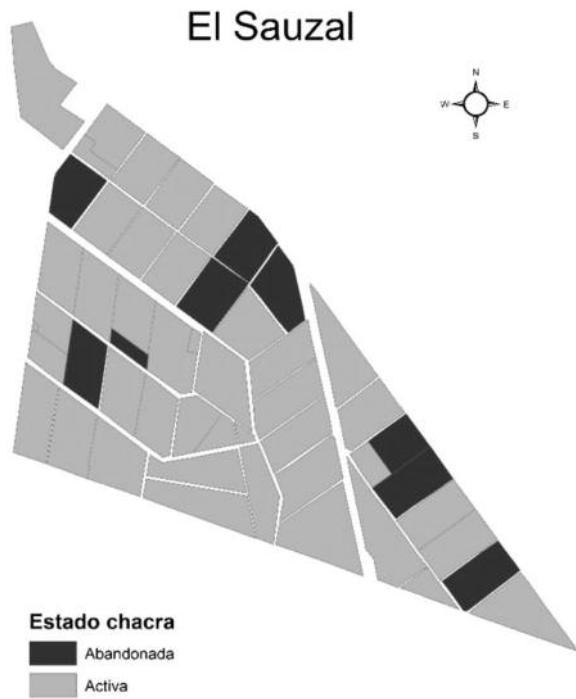


Figura 2. Clasificación de las chacras de El Sauzal según se encuentren con algún tipo de actividad (productiva o no) o abandonadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se detallan a continuación son una parte de todos los resultados que se obtuvieron al procesar la información.

El Sauzal tiene una superficie de 920 ha que se dividen en 52 chacras. De ese total, el 51% se encuentran en producción y el 49% restante tiene otros usos tales como recreativo, residencial, comercial y en situación de abandono. Por lo tanto, si se consideran establecimientos con algún tipo de uso, productivo u otro, el 83% se encuentran activas y el 17% de los establecimientos de se encontraron abandonados (Figura 2).

En cuanto a la tenencia de la tierra (Figura 3), podemos observar el 15.4% de las chacras son propias y sus dueños residen en ellas. El 61.6% son propias aunque sus dueños no residen en ellas. Los mismos residen mayoritariamente en la localidad de 25 de Mayo y el resto en el Valle de Río Negro y Neuquén. El 6% corresponden a tierras alquiladas, cedidas o prestadas que no tienen habitantes permanentes, y el 17% restante corresponde a las tierras abandonadas.

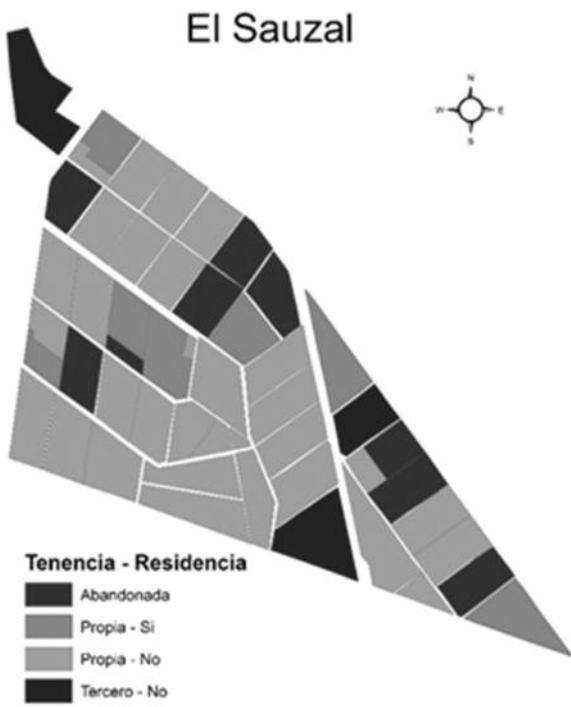


Figura 3. Clasificación cromática de acuerdo a la situación de cada encuestado con respecto a la tenencia de la tierra.

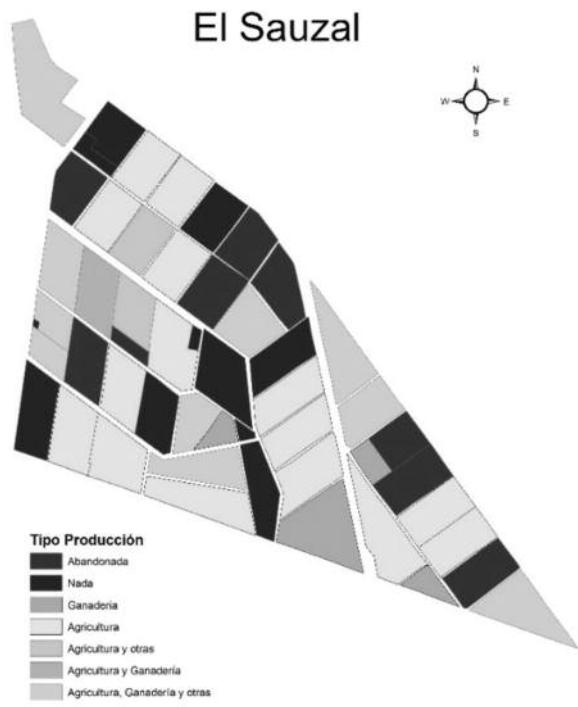


Figura 4. Clasificación del tipo de producción de las chacras de El Sauzal. Otras: hace referencia a la tenencia de aves de corral.

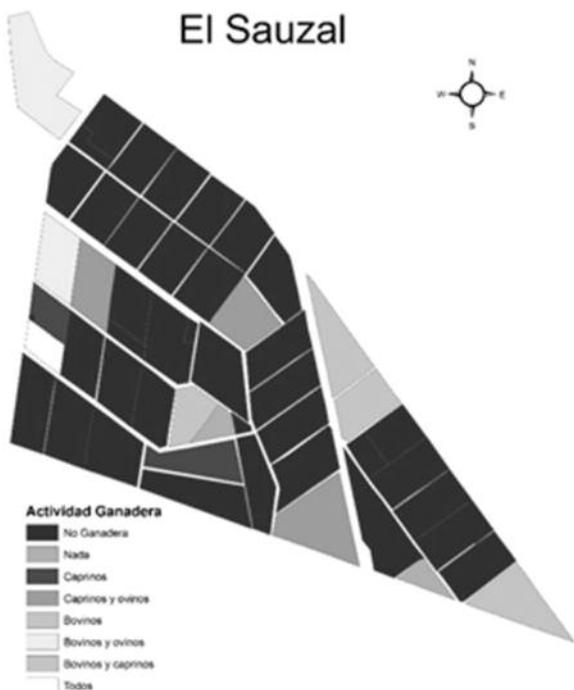


Figura 5. Clasificación de los establecimientos de El Sauzal que realizan actividad ganadera de acuerdo a la especie.



Figura 6. Utilización de mano de obra en cada establecimiento de El Sauzal.

Con respecto a los tipos de producción (Figura 4), se realizaron categorías arbitrarias para la clasificación. Estableciendo producción agrícola (29%), producción ganadera (7,8%), agrícola + otra (3,8%), sin producción (20%), agricultura+ganadería (1,9%) y la categoría agricultura+ganadería+ otra (19%).

Del 7,8 % de las tierras con dedicación exclusiva a la ganadería que corresponden a 12 establecimientos, se realizó un mapa en el que se identificó el tipo de producción al momento de la encuesta (Figura 5). Se puede observar que predomina la producción caprina seguida por la ovina y la bovina en último lugar.

Entre los aspectos sociales relevados, se registró la utilización de mano de obra temporal y/o permanente que tiene cada chacra (Figura 6). Los resultados indican que el 48% de los encuestados no posee mano de obra en sus establecimientos, el 21% posee mano de obra permanente y el 13,5% contrata mano de obra de forma temporaria para labores específicas (limpieza de canales, poda, emparejamiento de lotes, etc.) o en temporada de primavera-verano.

CONCLUSIONES

La crisis de las economías regionales ocurrida en los años 80, generó una situación económica insostenible para los colonos de El Sauzal, lo que causó el abandono de varios establecimientos. En la actualidad, el recambio generacional ve en la zona la posibilidad de poner en valor sus tierras, aunque alguno de ellos no tienen definido el tipo de producción que resulte económicamente sustentable.

El presente trabajo constituye un diagnóstico socio-productivo de El Sauzal, siendo este el primer relevamiento actualizado en formato digital de la zona. La información obtenida permite conocer la situación productiva y social de cada chacra, siendo el punto de partida para generar alternativas productivas viables para la zona. Como dato relevante podemos mencionar que casi la totalidad de la superficie de El Sauzal se encuentra activa, aunque con actividad netamente productiva se encuentra el 50% de las chacras.

En el transcurso de este año, se relevó con la misma metodología, Ampliación de El Sauzal y todas las áreas bajo riego de la provincia de La Pampa. Los resultados están siendo tabulados para su posterior análisis mediante el SIG.

BIBLIOGRAFIA

- Buzai, G.D. (1992) Geoinformática: teoría y aplicación. Anales de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos, 19: 11-17
- Castello, H., Izurieta, C., Pacenza, I. (1989) La actividad frutícola en el Alto valle de Río Negro. CEPAL. Chile, 7: 216-219.
- Durand Zurdo, J. (2009) Uso de Sistemas de Información Geográfica para el análisis de la vulnerabilidad y selección de los barangays beneficiarios en la región de Bicol, Filipinas. Cuadernos internacionales de tecnología para el desarrollo humano.
- Michelini, J. J. (2010) Instituciones, capital social y territorio: La Pampa y el dilema del desarrollo de la cuenca del Colorado. Editorial Biblos, Buenos Aires.

**Nivel
Local:
Caso**

3

Monitoreo de campos inundados al noreste de la provincia de La Pampa

RESUMEN

En el mundo, los cambios en el uso de la tierra generan grandes problemas naturales que ocasionan, en muchos casos, serios daños económicos, sociales y ambientales. En los últimos años, en Argentina, se han producido inundaciones de tipo catastrófico que han afectado gran parte de la población, los recursos y el sector agrícola-ganadero del país.

A lo largo de la historia, una gran parte de la superficie del noreste de la provincia de La Pampa sufrió en reiteradas oportunidades, anegamientos, debido a la ocurrencia de precipitaciones extraordinarias que superaron la media zonal. En el presente trabajo: “Monitoreo de campos inundados al noreste de la provincia de La Pampa”, se evaluó, con la ayuda de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, la variación espacial y temporal de las zonas anegadas durante el período 1993-2017, en parte de los departamentos de Maracó, Trenel y Conhelo, resultando sobre un total de 160000 ha, un área máxima anegada de 57000 ha, donde el 1.5 % de títulos catastrales rurales se hallaban en desastre agropecuario, un 9.0 % en emergencia y el resto de los mismos presentaban menos del 50 % de su superficie anegada (sobre un total de 919 títulos catastrales).

Palabras clave: área anegada, precipitaciones, Teledetección, Sistemas de Información Geográfica.

INTRODUCCION

Los desastres naturales son fenómenos ambientales extremos, de características excepcionales, como las inundaciones o los terremotos que, a partir de diversos grados de magnitud, ocasionan efectos en general catastróficos (Durán et. al., 1998) para el ambiente. La ocurrencia de eventos hidrológicos extremos (inundaciones y sequías) produce grandes problemas naturales que afectan, en la mayoría de los casos, el desarrollo socioeconómico del país y genera una situación que compromete la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, la productividad de las tierras y los asentamientos urbano-rurales.

Los ciclos de sequía-inundación provocan cambios en la profundidad del nivel freático que ejercen una importante influencia sobre los ecosistemas (Aragón et al., 2010, Nosetto et al. 2009). Por otro lado, los cambios en el uso de la tierra, involucran modificaciones en la cobertura vegetal capaces de afectar el balance hídrico (Paruelo et al., 2006, Jobbágy et al., 2008 y Nosetto et al. 2009), favoreciendo o contrarrestando el desarrollo de inundaciones y los procesos de salinización y/o sodificación de los suelos (Viglizzo et al., 2011), condición que puede agravarse ante un manejo inadecuado, siendo la resultante final la pérdida de la capacidad productiva de la región con grandes consecuencias socioeconómicas.

Desde el comienzo de la década del 70 se advierte, en todo el país, el ingreso a un ciclo climático húmedo que se caracterizó por el aumento de las

precipitaciones que superaron los registros históricos y la concentración, en pocos días, de grandes volúmenes de lluvia (Domínguez *et al.*, 1987). Durante los años 1985 y 1986, la situación se agravó considerablemente en el noroeste (NO) de Buenos Aires, suroeste (SO) de Santa Fe, sudeste (SE) de Córdoba y noreste (NE) de La Pampa, incrementándose la superficie anegada, no solo por las abundantes precipitaciones registradas sino también por el grado de saturación que presentaba regionalmente la freática.

En los años 1999 y 2001, se registraron precipitaciones extraordinarias que comenzaron a elevar los niveles freáticos en el noreste de la provincia de La Pampa, dando lugar a la inundación de una importante superficie productiva. La topografía de la región, las modificaciones antrópicas sobre el ecosistema y el marcado incremento del régimen de precipitación produjeron nuevas y extensas áreas inundadas generando significativas alteraciones físicas, económicas, sociales, culturales y ambientales.

La provincia de La Pampa, ante esta situación de condiciones climáticas adversas, crea en el año 1998 un Régimen de Emergencia y Asistencia Agropecuaria Provincial para el sector agropecuario, donde los productores y las empresas agropecuarias ubicadas en las áreas afectadas, pueden acceder a diferentes beneficios tanto financieros como impositivos de origen provincial como nacional por aplicación de la Ley Provincial N° 1785 y Nacional N° 26509.

La Ley Provincial N° 1785, declara en el artículo 2º que: “El Poder Ejecutivo Provincial podrá declarar por un tiempo determinado en estado de Emergencia Agropecuaria a una región delimitada catastralmente, cuando por factores de origen climático, meteorológico, telúrico, físico o biológico no previsibles o inevitables e inimputables al productor, resulte afectada la producción o la capacidad productiva de las parcelas agropecuarias de dicha región, en por lo menos un 50% (cincuenta por ciento)”, mientras que el artículo 3º dice que: “cuando la producción o la capacidad productiva afectada por las causales mencionadas en el artículo anterior superara el 80% (ochenta por ciento), la autoridad de aplicación declarará a la región en Estado de Desastre Agropecuario por tiempo determinado”.

La Teledetección Espacial, en los últimos tiempos, ha constituido una herramienta fundamental para el estudio del medio ambiente por su capaci-

dad para seguir procesos dinámicos. Dentro de estos procesos se encuentran las inundaciones que afectan tanto a la población como a los sistemas naturales, por lo que es importante poder elaborar un diagnóstico actualizado, a través del uso adecuado de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). De esta manera es posible identificar con precisión, las áreas afectadas y determinar las zonas de emergencia, generar una cartografía de riesgo, planificar el uso del territorio y poder llevar a cabo un plan de recuperación de los sectores involucrados.

El presente trabajo, con el uso de estas técnicas, tiene por finalidad evaluar y cuantificar como variaron las zonas anegadas de los campos estudiados durante el período 1993-2017 y determinar que campos se encuentran en emergencia agropecuaria para el año 2017 según la Ley Provincial N° 1785.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El área de estudio, que se encuentra inserta en la Región Fisiográfica Oriental, con un clima subhúmedo seco, cubre parte de los departamentos de Maracó, Trenel y Conhelo de la provincia de La Pampa, abarcando una superficie aproximada de 160000 ha (Figura 1). El paisaje se caracteriza por mesetas, valles, colinas y planicies y los suelos tienen una mayor evolución, sus horizontes están claramente diferenciados y se aprecia una ganancia en el contenido de materia orgánica (predominan Molisoles). La vegetación está compuesta de cultivos, pastizales bajos, bosque abierto caducifolio y pastizales sammófilos (INTA *et. al.*, 1980).

La Región, donde se lleva a cabo el presente estudio, se subdivide en dos subregiones:

a) “Planicies con Tosca”, situada en la parte NE de la provincia, entre los meridianos 63º 45' y 64º 30' O y los paralelos 35º y 36º 30' S, con una superficie aproximada de 8500 km². Se caracteriza por la presencia de una costra calcárea difundida y originada en épocas pasadas, donde posteriormente se depositó, por acción eólica, un delgado manto arenoso. Se observa una planicie uniforme muy suavemente ondulada con una pendiente regional SO-NE, donde no se visualizan vías de drenaje de importancia. El microrelieve está compuesto por pequeñas lomas y depresiones (INTA *et. al.*, 1980). En esta subregión, los cultivos cubren casi un 90% de la

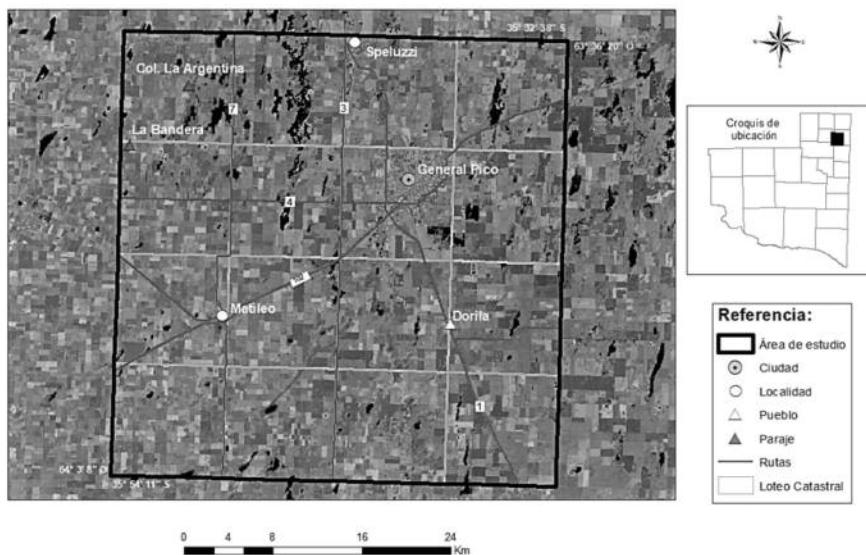


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

superficie, pudiendo encontrar cultivos estivales (sorgos graníferos y forrajeros, maíz y mijo) y cultivos invernales (centeno, avena, cebada, trigo), mientras que el 10% restante está representado por pastizales naturales, bosques de *Prosopis caldenia*, matorrales y arbustales halófilos.

b) “Planicies Medanosas”, ubicada en el extremo NE de la provincia de La Pampa, entre los meridianos 63° y $64^{\circ} 15'$ O y los paralelos 35° y $37^{\circ} 15'$ S, tiene una superficie de aproximadamente 9200 km². Los procesos morfogenéticos que actuaron en esta subregión fueron fundamentalmente hídricos y eólicos. Los primeros elaboraron una superficie calcárea con pendiente regional al E y sobre ella, el viento acumuló un manto arenoso de espesor variable. En el O este espesor alcanza el metro, mientras en el límite E de la unidad supera los 6 m. Dentro de este sedimento se encuentran acumulaciones de ceniza volcánica, suelos enterrados y paleohorizontes (INTA et. al., 1980). En esta subregión se pueden diferenciar distintos tipos fisonómicos: cultivos, pastizal sammófilo y halófito. Esta zona presenta un sistema productivo ganadero-agrícola incrementándose en los últimos años la superficie agrícola en desmedro de la ganadera.

Metodología

En el trabajo, se analizaron imágenes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS, una en otoño y otra en primavera, comprendiendo dos imágenes por año. El mismo involucró diferentes etapas, que se llevaron a cabo utilizando el software libre y gratuito gvSIG, las cuales se detallan a continuación:

- *Selección de imágenes satelitales y descarga de las mismas*: luego de analizar las imágenes satelitales disponibles en el período de estudio, se seleccionaron aquellas que presentaban menor cantidad de nubes, mayor nitidez y que fueran aproximadamente de las mismas fechas para todos los años. Luego se procedió a la descarga de las imágenes a través del servidor gratuito de la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Las imágenes satelitales fueron reproyectadas al sistema de referencia de coordenadas planas Gauss Krüger, faja 3 y se alinearon con una imagen satelital ortorectificada (path/row 228-85) obtenida previamente del servidor de la NASA. Seguidamente se procedió a digitalizar el área de estudio para ser utilizada como área de recorte.

- *Cálculo del área anegada*: se realizó el procesamiento digital de las imágenes satelitales para la identificación de las áreas anegadas visibles en ellas. Este proceso requirió llevar a cabo la clasificación no supervisada de las imágenes satelitales. Se trabajó con la composición multi-banda en falso color compuesto de los canales RGB 564 del Landsat 8 OLI/TIRS. Esta combinación de bandas permite una visualización de los sectores ocupados por agua (zonas anegadas), en distintas tonalidades que van del azul al negro, lo que facilita distinguir claramente el agua del resto de las cubiertas naturales.

En todas las clasificaciones generadas, la categoría 1 representa el área anegada del área de estudio. Los raster obtenidos en cada clasificación fueron convertidos al sistema vectorial. En cada capa,

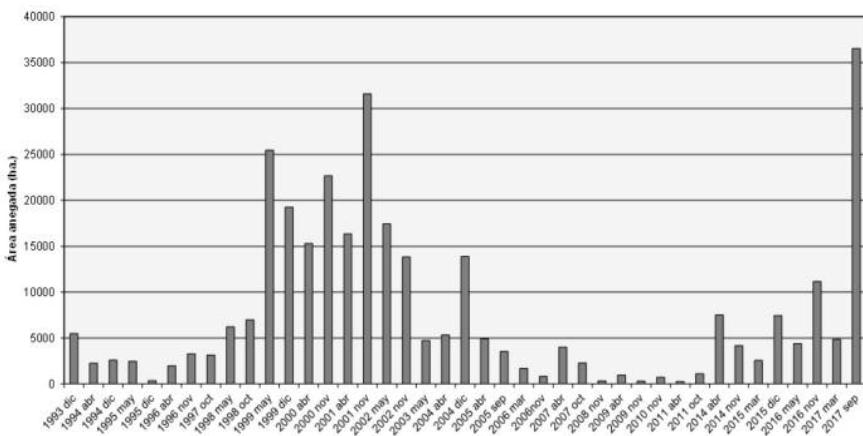


Figura 2: Superficie anegada, en hectáreas.

resultado del proceso de clasificación, se seleccionó la clase 1, correspondiente a la clase agua y se procedió a ser guardada como “capa agua”, para luego calcular la superficie de cada una. De esta forma quedaron constituidos los shapefile del área anegada, los que fueron utilizados posteriormente para calcular el área máxima anegada, a través del comando unión.

- *Cambios evolutivos en el área anegada:* para calcular los cambios en el área anegada, se procedió a calcular la diferencia entre las coberturas de agua (shapefile), entre el período 1993-2011 y el período actual. El shapefile resultante se lo reclasificó en tres categorías: a) 1-1 sin cambios (mantuvo); b) 1-0 decrecimiento del área; c) 0-1 incremento del área. A continuación se procedió a determinar las superficies de dichas categorías, en términos de porcentaje, sobre la superficie total.

Finalmente se determinó el porcentaje de campos afectados a través de la superposición de los títulos rurales catastrales con el área anegada obtenida en el último año (2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el período de estudio, los años se clasificaron en años secos, normales y húmedos a través con su comparación con la media anual histórica. El valor promedio histórico, del período enero-septiembre (se toman estos 9 meses para poder comparar los datos del año 2017), fue de 486 mm, mientras que las precipitaciones promedio, alcanzadas para el año 2017 fue de 705 mm.

Si se compara las precipitaciones caídas durante el corriente año con los años en el que se alcanzó la

máxima superficie anegada (año 1999: 866 mm y año 2001: 712 mm), se puede concluir que los milímetros caídos son similares al año 2001 alcanzando un valor de 705 mm.

Gracias al análisis multitemporal que se realizó durante el período comprendido entre el año 1993 a la actualidad, se pudo conocer la dinámica del fenómeno de las inundaciones así como también cuantificar la superficie anegada de las áreas afectadas. Si se observa la Figura 2, se visualiza como a lo largo de 24 años fueron variando notablemente las tierras anegadas en el área de estudio.

En el área de estudio, entre diciembre de 1993 hasta octubre de 1998, el área anegada no superó las 7000 ha y a partir de mayo de 1999 se incrementan notablemente las precipitaciones dando comienzo a los problemas en las zonas afectadas, sobre todo en el lado O de la región de interés. Para mayo de 1999, el área anegada fue de 25466 ha (360 % más que en los años precedentes), disminuyendo para diciembre de ese año en un 25 % y para abril del año siguiente en un 40 %. A mediados de noviembre del 2000, el área anegada se incrementó hasta alcanzar un máximo de 31596 ha (fines del 2001), disminuyendo casi a la mitad para mayo de 2002 (17436 ha). A partir de ese año, el área anegada comenzó a reducirse gradualmente, estabilizándose hacia el año 2011 en valores próximos a las 300 ha, a pesar del incremento que se presentó sobre el mes de diciembre de 2004.

Para principio del otoño 2014 y los años siguientes, comenzaron aumentar nuevamente las áreas anegadas, preocupando a los productores de la zona. El área anegada actual (año 2017) superó a la del año 2001 que fue la máxima área anegada para el período 1993-2011, pasando de 31596 ha a 36545

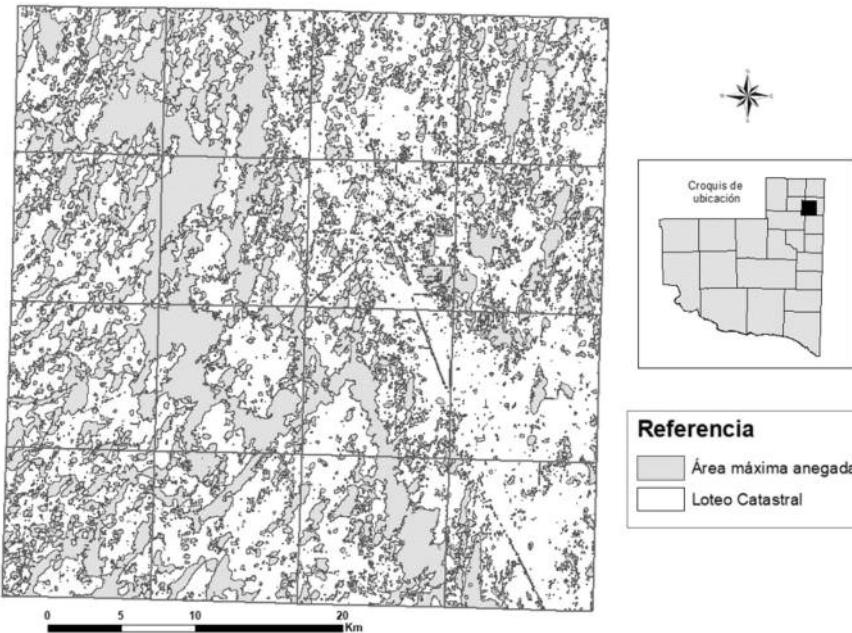


Figura 3: Área máxima anegada (período 1993-2017).

ha con un aumento del 15.7 %.

A lo largo de todo el período estudiado, es decir, desde el año 1993 a la actualidad, se observaron estaciones normales, húmedas y secas, donde las precipitaciones y las zonas anegadas variaron considerablemente afectando en mayor o menor medida a los campos, sus producciones, las infraestructuras y por ende su economía.

La máxima área anegada del área de estudio en todo el período analizado, alcanzó una superficie de 57010 ha, afectando prácticamente la totalidad de la región (Figura 3).

Si se compara el área anegada actual con respecto a la calculada en el período 1993-2011 (Martínez Uncal et. al., 2015), a pesar que se mantuvo gran parte del agua en la superficie del suelo del lado oeste de la zona de estudio (Planicie con Tosca), el área afectada por anegamiento se desplazó hacia la cara este, es decir hacia la Planicie Medanosa Ondulada. Tal situación puede deberse probablemente a que los niveles freáticos se encuentran más cerca de la superficie y a que en los últimos años hubo una tendencia a reemplazar las pasturas perennes por diferentes cultivos anuales, provocando un menor consumo de agua por año. Los dos factores planteados anteriormente junto con precipitaciones que superaron la media anual histórica generan, en la actualidad, zonas anegadas que tardarán años en recuperarse (Figura 4).

Si se observa la Figura 4, se puede concluir que:

el 44 % del área de estudio no presenta cambios con respecto al período 1993-2011; un 30 % disminuye y un 26 % se ve incrementada su área hacia el este del régión de analizada.

En la provincia de La Pampa, el fraccionamiento de los predios catastrales rurales se rige por la Ley 468 “Fijando Normas para el Fraccionamiento de Predios Rurales”, que deberá responder a las normas de la Unidad Económica Agraria, entendiéndose por tal: El predio que por su superficie, calidad de la tierra, ubicación, mejoras y demás condiciones de producción, racionalmente trabajado por una familia agraria tipo, que aporte la mayor parte del trabajo y desarrolle las actividades corrientes de la zona, le permita alcanzar un nivel de vida digno y evolucionar favorablemente. El área de estudio incluye 919 títulos catastrales rurales (TCR) que cubren aproximadamente el 93 % (149.000 ha) de la superficie considerada, mientras que el 7 % restante representa el área urbana y periurbana.

En el trabajo, se consideró importante superponer los títulos catastrales rurales al área anegada para conocer la situación actual de los campos. El 90 % de los títulos se encuentran por debajo de la unidad económica agraria, si a ello se le suma una reducción del área productiva por anegamiento, la situación económica del grupo familiar sería severamente afectada.

Aplicando la Ley Provincial N° 1785, que crea para todo el territorio provincial un Régimen de

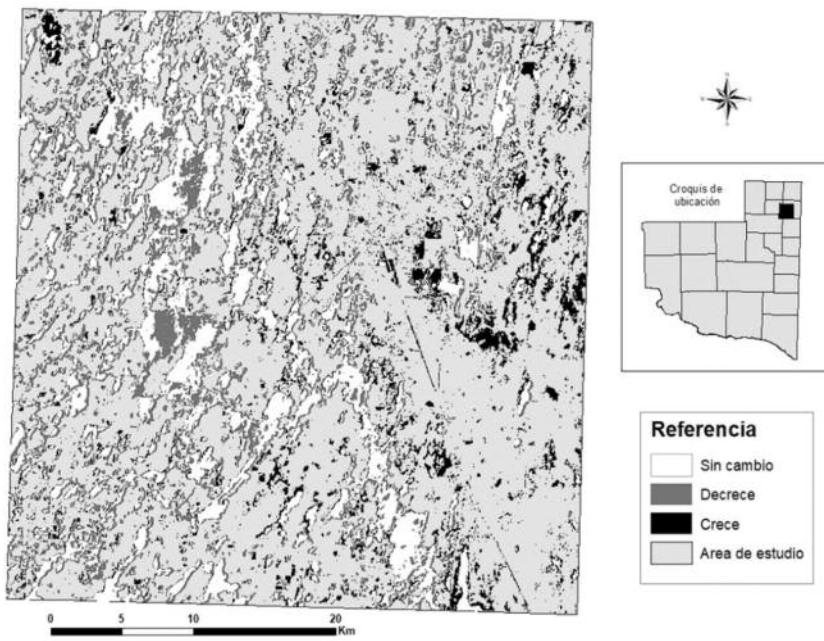


Figura 4: Cambios en la evolución del área anegada entre el período 1993-2011 y el período actual.

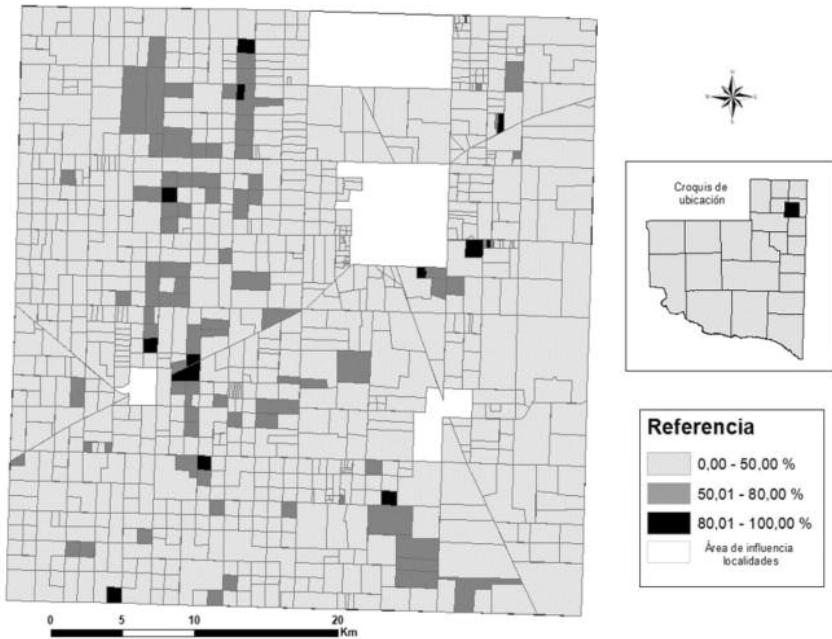


Figura 5: % de área anegada por título catastral rural según Ley de Emergencia Agropecuaria.

Emergencia y Asistencia Agropecuaria y de acuerdo a lo establecido en los artículos 2º y 3º, los campos que se están en el área de estudio presentan las siguientes características: el 1.5 % de las parcelas agropecuarias se encuentran en “Desastre”, el 9.0 % en estado de “Emergencia” y el 89.5 % restante de las parcelas afectadas no superan el 50 % del área anegada (Figura 5).

CONCLUSIONES

A lo largo de la historia, en el ambiente se producen diferentes cambios en el uso de la tierra que lo van modificando, estableciendo nuevas y diferentes condiciones para la sociedad. En los últimos años, gran parte de la superficie del noreste de la provincia de La Pampa sufrió en reiteradas oportunidades, anegamientos, debido a la ocurrencia de precipita-

ciones extraordinarias que superaron la media zonal provocando grandes problemas físicos, económicos, sociales, culturales y ambientales.

En el presente trabajo se vuelve a ratificar que gracias a la capacidad que presenta la Teledetección junto con los Sistemas de Información Geográfica se pudo evaluar con precisión y bajo costo, la variación espacial y temporal de las zonas anegadas durante el período que va del año 1993 a la actualidad, siendo los años de 1999, 2001 y 2017 los más afectados por anegamiento.

En la actualidad la zona anegada se desplazó hacia el oriente debido probablemente al aumento de las precipitaciones, al grado de saturación que presenta la freática y a que en los últimos años se vienen reemplazando las pasturas perennes por diferentes cultivos anuales consumiendo menor cantidad de agua por año.

Por último se puede concluir que haciendo uso de la Teledetección y de los SIG, se pudo medir y calcular el área anegada y los títulos catastrales que se encuentran en “Desastre” y “Emergencia” agropecuaria según el Régimen de Emergencia y Asistencia Agropecuaria de la provincia.

BIBLIOGRAFIA

- Aragón, R.; Jobbágy, E. y Viglizzo, E. 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, DOI: 10.1002/eco.149.
- Domínguez, O. y Carballo, S. 1987. El agua y el suelo en el noroeste bonaerense (Aneamiento). Ministerio de Asuntos Agrarios de la provincia de Buenos Aires. Boletín Técnico Nº 1; año 1. Pp. 20-27.
- Durán, D. y Buzai, G. 1998. El medio construido y las inundaciones en la aglomeración de Buenos Aires. En: “La Argentina Ambiental. Naturaleza y Sociedad”. 1998. Editorial: Lugar. Buenos Aires. Pp. 248.
- INTA, Provincia de La Pampa y UNLPam. 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. Buenos Aires.
- Jobbágy, E.; Nosetto, M.; Santoni, C. y Baldi G. 2008. “El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana”. *Ecología Austral – Sección Especial “Problemas Ambientales”*, 18:305-322.
- Martínez Uncal, M. y Roberto Z. 2015. Monitoreo de Tierras anegadas al noreste de la provincia de La Pampa. Facultad de Matemática, Física y Astronomía. Universidad Nacional

- de Córdoba. En: <http://famaf.biblio.unc.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-imageviewer.pl?biblionumber=17445>
- Nosetto, M.; Jobbágy, E.; Jackson, R. y Sznajder, G. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crop Research* 113: 138–148. DOI: 10.1016/j.fcr.2009.04.016.
 - Paruelo, J.; Guerschman, J.; Piñeiro G.; Jobbágy, E.; Verón, S.; Baldi, G. y Baeza S. 2006. “Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis”. *Agrociencia*, Vol. X Nº2: 47-61.
 - Tchilinguirian, P.; Azcurra, D.; Kaku, M. y Candaosa, G. 2003. Aplicaciones de imágenes satelitales Aster en zonas inundadas, Laguna Picasa, provincia de Santa Fe. Servicio Geológico Minero Argentino – SEGEMAR. Argentina.
 - Viglizzo, E.; Frank, F.; Carreño, L.; Jobbágy, E.; Pereyra, H.; Clatt, J.; Pincén, D. y Ricard, M. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17:959-973.
-

Nivel
Local:
Caso

4

Cuenca del Río Colorado en La Pampa: mapas de aptitud de suelos para diferentes cultivos agrícolas

RESUMEN

La cuenca del río Colorado argentino posee condiciones climáticas semidesérticas, pero cuenta con toda la potencialidad de utilización del agua para la generación del desarrollo productivo. En la provincia de La Pampa se evidencia falta de información y experimentación para las actividades productivas intensivas existentes y potenciales. Si se considera que menos del 10 % de la superficie susceptible de regar está ocupada, se puede observar el fuerte potencial aprovechable de desarrollo de toda la ribera pampeana del río Colorado. El objetivo es determinar desde variables edáficas, la factibilidad de diferentes cultivos en las áreas aprovechables de la cuenca del río Colorado de La Pampa. Se procedió a la digitalización de las variables edáficas de suelo (profundidad, salinidad, textura y drenaje) en tres áreas regables provinciales (SAM 25 de Mayo, Casa de Piedra y Bajo de los Baguales - La Adela), considerándose diecisiete cultivos que se dividieron en once grupos diferentes. Las áreas regables son 143.355 hectáreas de las cuales el 47,6 % resultaron aptas para los grupos analizados y el 52,4 % resultaron no aptas. Los cultivos con mayor proporción de superficie apta son cebolla, papa y zanahoria. Es necesario profundizar en estudios locales orientados a generar información sobre las producciones bajo riego de La Pampa. Dicha información sería de utilidad para gestionar planificaciones territoriales de corto, mediano y largo plazo en vistas de un ordenamiento territorial provincial orientado al desarrollo económico, social y ambiental equitativo y equilibrado.

Palabras clave: desarrollo productivo, producciones bajo riego, ordenamiento territorial.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Colorado tiene una extensión aproximada de 48000 kilómetros cuadrados. El río Colorado nace en las Cordillera de los Andes de la confluencia de los ríos Grande y Barrancas, y atraviesa valles de las provincias de Mendoza, Neuquén, La Pampa, Río Negro y Buenos Aires, hasta desembocar en el Océano Atlántico.

La cuenca del Colorado posee condiciones climáticas semidesérticas, pero cuenta con toda la potencialidad de utilización del agua para la generación del desarrollo productivo. Más allá de la actividad petrolera y minera hacia el oeste, la agricultura ha cumplido un rol clave al motorizar procesos de conquista y organización territorial, especialmente mediante la producción intensiva bajo riego (MPFIPS, 2014). Si bien el agua posee variada cantidad de usos a lo largo de toda la cuenca, es utilizada principalmente para riego de producciones agropecuarias.

En el año 1976 la VI Conferencia de Gobernadores de las provincias que componen la jurisdicción de la cuenca del río Colorado aprueba el Programa Único de Distribución de Caudales y Habilitación de Áreas de Riego en el Río Colorado (PURC). Por ésta razón se adjudica un volumen anual de agua a La Pampa de aproximadamente 615 Hm³ (Díaz, 2013) o de 633 Hm³ (MPFIPS, 2014) de acuerdo con las diferentes interpretaciones de los autores. El PURC explica que La Pampa se encuentra

Tabla 1: Reclasificación de las variables edáficas.

| Variable/Clasificación | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| Profundidad (cm) | < 25 | Entre 25 y 50 | Entre 50 y 100 | > 100 |
| Textura | Franco Arcilloso | Franco | Franco Arenoso | Arenoso Franco |
| Drenaje | Pobremente Drenado | Imperfectamente Drenado | Bien Drenado | Excesivamente Drenado |
| Salinidad (mmhos/cm) | > 12 | Entre 4 y 12 | Entre 2 y 4 | < 2 |

en condiciones de regar hasta 85.100 hectáreas (has) con una dotación de 7.478 m³/ha/año (Díaz, 2013).

Actualmente, en la ribera de La Pampa se encuentran bajo riego un total de no más de 5.721 hectáreas (DGEC, 2016). La mayor cantidad de producción agrícola se corresponde a forrajes, ya sea con riego de tipo gravitacional o presurizado, donde el presurizado ha sido el sistema más desarrollado en los últimos años (Fontanella y Aumassanne, 2015). El 98 % de la producción bajo riego se registra en el departamento Puelén y se cuentan con estudios integrales de aprovechamiento productivo en las zonas del Sistema de Aprovechamiento Múltiple (SAM) 25 de Mayo (CFI, 1982), Casa de Piedra (CFI, 2007a) y Bajo Los Baguales - La Adela (CFI, 2007b). Además, en La Pampa se encuentra a la vera de la ribera del río Colorado el área Gobernador Duval que constituye un modelo reciente de desarrollo local en base a la producción intensiva bajo riego, con fuerte presencia del Gobierno municipal.

En La Pampa, se evidencia falta de información y experimentación para las actividades productivas intensivas existentes y potenciales (INTA, 2013). Si se considera que menos del 10 % de la superficie susceptible de regar está ocupada, se puede observar el fuerte potencial aprovechable de desarrollo de toda la ribera pampeana del río Colorado.

Es por eso que el objetivo de éste trabajo es determinar desde variables edáficas, la factibilidad de diferentes cultivos en las áreas aprovechables de la cuenca del río Colorado en la provincia de La Pampa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se procedió a la digitalización de las variables edáficas de suelo (profundidad, salinidad, textura y drenaje) en tres de las áreas regables de La Pampa: a) SAM 25 de Mayo (CFI, 1982); b) Casa de Piedra (CFI, 2007a) y; c) Bajo de los Baguales - La Adela

(CFI, 2007b). Los mapas desarrollados en los trabajo aportaron las diferentes mediciones de las variables edáficas que proporciona el suelo para establecer su uso. Las variables edáficas fueron reclasificadas en las siguientes categorías que se expresan en la Tabla 1.

Por otra parte se consideraron diecisiete cultivos recabados de las producciones actuales realizados en la ribera del Colorado en La Pampa (DGEC, 2016). La Tabla 2 detalla los cultivos analizados con los requerimientos edáficos demandados por cada cultivo particular adaptados a la reclasificación de la Tabla 1. La información de los requerimientos edáficos de los cultivos fue obtenida de información secundaria (Sánchez, 1999; Amico, 2002; Basigalup, 2007; Ruiz *et al.*, 2013).

De esta forma quedaron constituidos diecisiete mapas, uno por cada cultivo. Seguidamente se procedió a la superposición de los mismos de donde surgieron los grupos expresados en la siguiente tabla (Tabla 3) con la finalidad de determinar los diferentes usos para una misma área.

RESULTADOS

La sumatoria de las tres áreas regables analizadas fue de 143.355 hectáreas de las cuales el 47,6 % (68.244) resultaron aptas para los cultivos analizados. Por lo tanto, el 52,4 % (75.111) resultaron no aptas. En la Tabla 4 se expresan los datos de acuerdo a las tres áreas analizadas.

Se realizaron los diecisiete mapas correspondientes a cada cultivo y para todas las áreas regables analizadas. Como ejemplo la Figura 1 presenta la digitalización del total de las áreas aptas y no aptas para el cultivo de papa.

Posteriormente se obtuvo el detalle de la aptitud edáfica para los respectivos cultivos analizados los cuáles se expresan en la Tabla 5 con la importancia en términos relativos de aptitud edáfica para la superficie apta (expresada en la Tabla 4) de las

| Cultivo/Variable | Profundidad | Textura | Drenaje | Salinidad |
|--------------------|-------------|----------|----------|-----------|
| Ajo | 3 y 4 | 1, 2 y 3 | 3 y 4 | 3 y 4 |
| Álamo | 4 | — | 3 y 4 | 2, 3 y 4 |
| Alfalfa | 4 | 1, 2 y 3 | 3 y 4 | 2, 3 y 4 |
| Almendro | 3 y 4 | — | 3 y 4 | 3 y 4 |
| Cebolla | 2, 3 y 4 | — | 3 y 4 | 3 y 4 |
| Ciruelo | 3 y 4 | — | 2, 3 y 4 | 3 y 4 |
| Frambuesa | 3 y 4 | 1, 2 y 3 | 3 y 4 | 4 |
| Frutilla | 2, 3 y 4 | 2, 3 y 4 | 3 y 4 | 4 |
| Maíz | 4 | — | 2, 3 y 4 | 3 y 4 |
| Manzano | 4 | — | 2, 3 y 4 | 3 y 4 |
| Nogal | 4 | — | 3 y 4 | 3 y 4 |
| Olivo | 3 y 4 | 1, 2 y 3 | 3 y 4 | 3 y 4 |
| Papa | 2, 3 y 4 | — | 3 y 4 | 3 y 4 |
| Peral | 4 | 1, 2 y 3 | 2, 3 y 4 | 4 |
| Vid | 4 | — | 3 y 4 | 3 y 4 |
| Zanahoria | 2, 3 y 4 | — | 3 y 4 | 3 y 4 |
| Zapallo (Calabaza) | 2, 3 y 4 | — | 3 y 4 | 3 y 4 |

Tabla 2: Requerimientos demandados por los cultivos y adaptados a la reclasificación de las variables edáficas.

Tabla 3: Agrupamiento de los diferentes cultivos.

| Grupos | Cultivos |
|--------|---|
| 1 | Cebolla - Zanahoria - Papa - Zapallo - Ajo - Maíz - Alfalfa - Frambuesa - Vid - Frutilla - Almendro - Nogal - Ciruelo - Manzano - Olivo - Peral |
| 2 | Cebolla - Zanahoria - Papa - Zapallo - Ajo - Frambuesa - Frutilla - Almendro - Ciruelo - Olivo |
| 3 | Cebolla - Zanahoria - Papa - Zapallo - Ajo - Maíz - Alfalfa - Vid - Almendro - Nogal - Ciruelo - Manzano - Olivo |
| 4 | Cebolla - Zanahoria - Papa - Zapallo - Ajo - Almendro - Ciruelo - Olivo |
| 5 | Cebolla - Zanahoria - Papa - Zapallo - Frutilla - Almendro - Ciruelo |
| 6 | Cebolla - Zanahoria - Papa - Zapallo - Ciruelo - Vid - Frutilla - Almendro - Nogal - Ciruelo - Manzano |
| 7 | Cebolla - Zanahoria - Papa - Zapallo - Maíz - Vid - Almendro - Nogal - Ciruelo - Manzano |
| 8 | Cebolla - Zanahoria - Papa - Frutilla |
| 9 | Cebolla - Zanahoria - Papa |
| 10 | Alfalfa |
| 11 | Alfalfa - Ciruelo - Manzano |

Tabla 4: Aptitud edáfica por área analizada.

| Superficie | SAM 25 de Mayo | | Casa de Piedra | | Bajo los Baguales | | Total | |
|------------|----------------|-----|----------------|------|-------------------|------|--------|------|
| | has | % | has | % | has | % | has | % |
| Apta | 51981 | 58 | 5417 | 47,9 | 10846 | 25,7 | 68244 | 47,6 |
| No apta | 37701 | 42 | 5911 | 52,1 | 31499 | 74,3 | 75111 | 52,4 |
| Total | 89682 | 100 | 11328 | 100 | 42345 | 100 | 143355 | 100 |

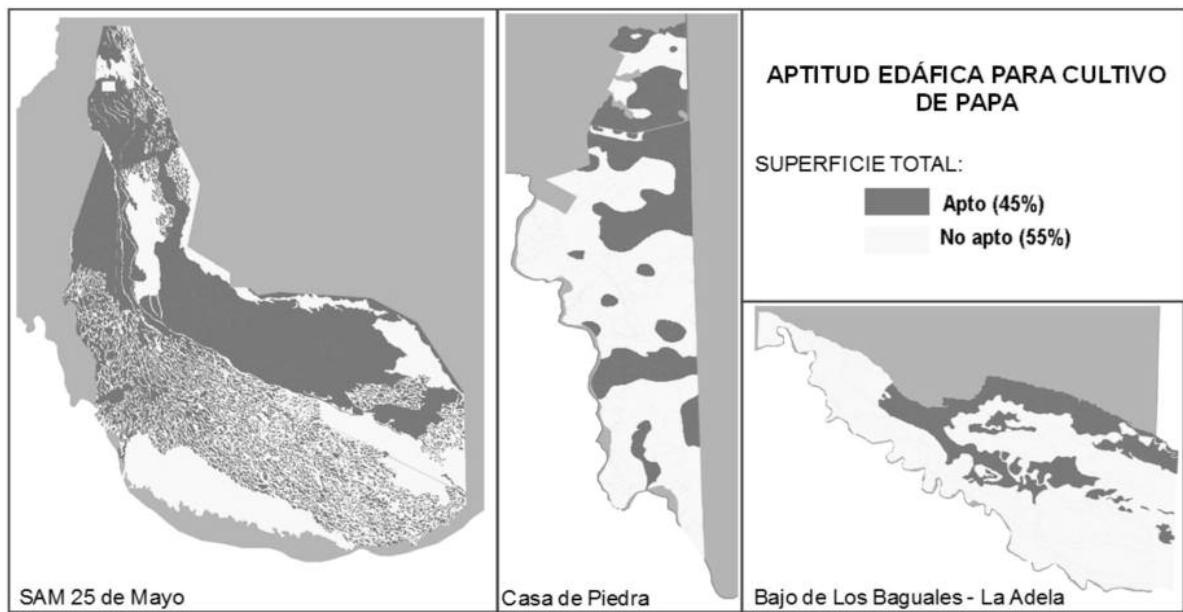


Figura 1: Aptitud edáfica para el cultivo de Papa.

Tabla 5: Aptitud edáfica por cultivo de la superficie apta en las áreas analizadas.

| Cultivos | SAM 25 de Mayo | | Casa de Piedra | | Bajo los Baguales | | Total | |
|-----------|----------------|------|----------------|-----|-------------------|------|-------|------|
| | has | % | has | % | has | % | has | % |
| Ajo | 15792 | 23,1 | 2711 | 3,9 | 10845 | 15,8 | 29348 | 43 |
| Álamo | 8511 | 12,4 | 2259 | 3,3 | 2147 | 3,1 | 12917 | 18,9 |
| Alfalfa | 6157 | 9 | 1953 | 2,8 | 2147 | 3,1 | 10257 | 15 |
| Almendro | 19569 | 28,6 | 2913 | 4 | 10845 | 15,8 | 33327 | 48,8 |
| Cebolla | 49748 | 72,9 | 3919 | 5,7 | 10845 | 15,8 | 64512 | 94,5 |
| Ciruelo | 19569 | 28,8 | 2925 | 4,2 | 10845 | 15,8 | 33339 | 48,8 |
| Frambuesa | 10648 | 15,6 | 1515 | 2 | 2147 | 3,1 | 14310 | 20,9 |
| Frutilla | 27998 | 41 | 1989 | 2,9 | 2147 | 3,1 | 32134 | 47 |
| Maíz | 5661 | 8,3 | 522 | 0,7 | 2147 | 3,1 | 8330 | 12,2 |
| Manzano | 5662 | 8,3 | 524 | 0,7 | 2147 | 3,1 | 8333 | 12,2 |
| Nogal | 5661 | 8,3 | 510 | 0,7 | 2147 | 3,1 | 8318 | 12,1 |
| Olivo | 15792 | 23,1 | 2711 | 4 | 10845 | 15,8 | 29348 | 43 |
| Papa | 49749 | 72,9 | 3919 | 5,7 | 10845 | 15,8 | 64513 | 94,5 |
| Peral | 2501 | 3,7 | 224 | 0,3 | 2147 | 3,15 | 4872 | 7,1 |
| Vid | 5662 | 8,3 | 510 | 0,7 | 2147 | 3,1 | 8319 | 12,1 |
| Zanahoria | 49748 | 72,9 | 3919 | 5,7 | 10845 | 15,8 | 64512 | 94,5 |
| Zapallo | 19569 | 28,7 | 2913 | 4,3 | 10845 | 15,8 | 33327 | 48,8 |

áreas estudiadas.

De acuerdo con la Tabla 5, los cultivos con mayor proporción de superficie edáfica apta son la Cebolla, la Papa y la Zanahoria (94,5 % de las tierras aptas para cultivos); en segundo orden de importancia en términos relativos se encuentran Almendro, Frambuesa y Zapallo (con el 48,8 %) seguidos por la

Frutilla con un 47 % de la superficie apta.

Por último, en la Tabla 6 se exponen los resultados obtenidos para los diferentes grupos de cultivos. En Casa de Piedra la aptitud edáfica se presentó para todos los grupos de cultivos, los grupos 10 y 2 tuvieron la mayor importancia en términos relativos de superficie con 11,4 % y 13,1 % respectiva-

Tabla 6: Aptitud edáfica por grupos en superficies aptas de las áreas analizadas.

| Grupos | SAM 25 de Mayo | | Casa de Piedra | | Bajo los Baguales | | Total | |
|--------|----------------|-------|----------------|-------|-------------------|------|-------|------|
| | has | % | has | % | has | % | has | % |
| 1 | 2502 | 4,81 | 223 | 4,12 | 2148 | 19,8 | 4873 | 3,4 |
| 2 | 7299 | 14,04 | 1291 | 23,83 | — | — | 8590 | 5,9 |
| 3 | 1420 | 2,73 | 237 | 4,38 | — | — | 1657 | 1,1 |
| 4 | 4570 | 8,79 | 957 | 17,67 | 8698 | 80,2 | 14225 | 9,9 |
| 5 | 2036 | 3,92 | 152 | 2,81 | — | — | 2188 | 1,5 |
| 6 | 1089 | 2,09 | 32 | 0,59 | — | — | 1121 | 0,7 |
| 7 | 650 | 1,25 | 16 | 0,30 | — | — | 666 | 0,4 |
| 8 | 17572 | 33,80 | 379 | 7,00 | — | — | 17951 | 12,5 |

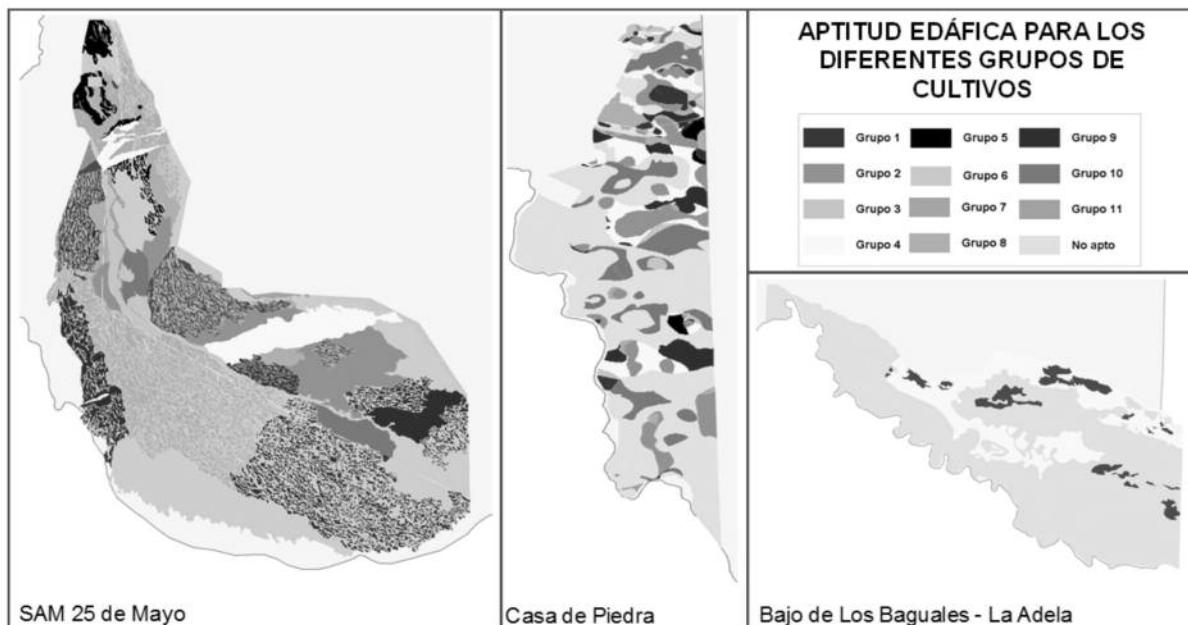


Figura 2: Mapa de aptitud edáfica para el agrupamiento de los diferentes cultivos.

mente. El SAM 25 de Mayo se encontró apto para todos los grupos de cultivos salvo el grupo 11, por el contrario, los grupos con mayor proporción de superficie edáfica apta son el grupo 8 y 9 con el 19,5 y 14 % respectivamente. Por último, en Bajo los Baguales, los únicos grupos que se encuentran aptos para el área son los grupos 4 y 1, con un 20,5 % y 5 % respectivamente.

Con los datos expuestos en la Tabla 6 se procedió a la digitalización de los diferentes cultivos en las áreas regables (Figura 2).

REFLEXIONES FINALES

De acuerdo al trabajo realizado se determinó la factibilidad de diecisiete cultivos en las áreas aprovechables de la cuenca del río Colorado (SAM 25 de

Mayo, Casa de Piedra y Bajo los Baguales) en la provincia de La Pampa. Se expresa que dicha factibilidad se calculó en términos de variables edáficas, sin tener en cuenta variables climáticas y de pendiente que podrían ser un interrogante para investigaciones futuras, así como también las incorporaciones de otras variedades o especies de cultivos (membrillo, berenjena, cerezo, entre otros).

Resulta necesario seguir profundizando en estudios locales y validaciones empíricas orientados a la ribera del río Colorado en pos de generar información sobre las producciones bajo riego de La Pampa. Dicha información sería de utilidad para gestionar planificaciones territoriales de corto, mediano y largo plazo en vistas de un ordenamiento territorial provincial orientado al desarrollo económico, social y ambiental equitativo y equilibrado.

BIBLIOGRAFÍA

- Amico, I. 2002. Viverización y cultivo de álamos y sauces en el NO del Chubut. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Esquel. Esquel, Chubut.
- Basigalup, D.H (ed.). 2007. El cultivo de alfalfa en la Argentina. Ediciones del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. ISBN: 978-987-521-242-8.
- Consejo Federal de Inversiones (CFI). 1982. Estudio de Revisión y Actualización del Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado en Colonia 25 de Mayo - La Pampa. Buenos Aires, Argentina.
- Consejo Federal de Inversiones (CFI). 2007a. Proyecto Productivo Integral Casa de Piedra.
- Consejo Federal de Inversiones (CFI). 2007b. Aprovechamiento Integral Multipropósito Salto Andersen - Bajo de los Baguales Río Colorado. Universidad Nacional de La Pampa. Santa Rosa, La Pampa.
- Díaz. 2013. Cuenca del Río Colorado. Uso de las Aguas del Río Colorado. Documento inédito.
- Dirección General de Estadísticas y Censos (DGEC). 2016. Anuario Estadístico 2016. Recuperado de: http://www.estadistica.lapampa.gov.ar/images/Archivos/Anuario2016/Anuario_Estadistico_2016.pdf
- Fontanella, D. y C. Aumassane. 2015. “Evapotranspiración de maíz, alfalfa y vid bajo riego, en la cuenca media del río Colorado”. Agencia de Extensión Rural Colonia 25 de Mayo, Estación Experimental Agropecuaria Anguil. Recuperado de: <http://inta.gob.ar/documentos/evapotranspiracion-de-maiz-alfalfa-y-vid-bajo-riege-en-la-cuenca-media-del-rio-colorado>.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) .2013. "Gestión de innovaciones para el desarrollo sustentable de la Cuenca del Río Colorado". Estación Experimental "Guillermo Covas" INTA. Proyectos Regionales de Enfoque Territorial (PAMSL-1282103). Centro Regional La Pampa - San Luis. Argentina.
- Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios (MPFIPS). 2014. Plan Estratégico Territorial de la Región del Río Colorado. Informe Final.
- Ruiz C., G. Medina G., I. J. González A., H.E. Flores L., G. Ramírez O., C. Ortiz T., K.F. Byerly M. y R.A. Martínez P. 2013. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Segunda Edición. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.
- Sánchez, E. 1999. Nutrición mineral de frutales de pepita y carozo. Publicación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Alto Valle de Río Negro, Macrorregión Patagonia Norte. ISSN 987-521-010-2.

*Nivel
Local:
Caso*

5

Vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación por plaguicidas en la zona agrícola de la provincia de La Pampa

RESUMEN

El concepto de vulnerabilidad de acuíferos reconoce que ante diferentes tipos de condiciones edafoclimáticas e hidrogeológicas, los acuíferos freáticos presentan variados niveles de sensibilidad a la contaminación. Los objetivos fueron: (a) calcular la recarga del acuífero en base mensual de la zona agrícola de la provincia de La Pampa y, (b) estimar la vulnerabilidad de los acuíferos a través del cálculo del Índice DRASTIC (ID) para los meses de recarga previamente identificados. La mayor frecuencia de ocurrencia de excesos de agua se obtuvo para marzo>abril>noviembre, y por lo tanto el ID se estimó para dichos meses. Bajo una combinación de condiciones naturales, en los meses de marzo, abril y noviembre, el sector este de la zona de estudio, es altamente vulnerable a la contaminación por plaguicidas comparado con el sector oeste cuya vulnerabilidad es moderada. El sector Este se caracteriza por una elevada recarga, suelos permeables y niveles freáticos someros. La moderada vulnerabilidad del sector centro Oeste se explica por una conjunción de factores hidrogeológicos tales como niveles freáticos más profundos (< 10m), una menor frecuencia de excesos de agua, y un perfil litológico menos permeable con un manto de tosca de espesor y profundidad variable.

Palabras clave: contaminación, agua subterránea, plaguicidas

INTRODUCCIÓN

El agua dulce es un recurso finito, vital para el ser humano. Del 100 % del agua mundial, solo 2.5 % es dulce, y sobre este total, solo el 0.5 % es agua subterránea. En general, en las regiones semiáridas del mundo, el desarrollo social y económico está ligado a la presencia y utilización del agua subterránea, la que a menudo es el único recurso hídrico disponible. A pesar de ello, recién en las últimas décadas se empezó a tomar conciencia pública del riesgo potencial que presenta el agua subterránea a ser adversamente afectada por diferentes actividades antrópicas. El riesgo de alterar la calidad natural del agua subterránea está relacionada con las actividades que se desarrollan en la superficie del terreno, especialmente en aquellas áreas con intensa actividad agrícola con elevados ingresos de plaguicidas (Shakerkhatibiwt *et al.*, 2014; Vonberg *et al.*, 2014; Székács *et al.*, 2015).

La importancia del recurso hídrico subterráneo en la región semiárida pampeana central de Argentina no es una excepción al panorama mundial. En las tierras semiáridas del centro del país el desarrollo socioeconómico de las poblaciones, depende en gran medida del aprovechamiento del agua subterránea. Durante los últimos 25 años, la región semiárida pampeana, ha experimentado cambios en cuanto a los sistemas productivos, destacándose una vertiginosa adopción de la siembra directa, cultivos genéticamente modificados (Díaz-Zorita *et al.*, 2002; Alvarez y Steinbach, 2009), y especialmente un uso intensivo de plaguicidas (Viglizzo *et al.*, 2011).

En este contexto, la calidad del recurso hídrico subterráneo se encuentra bajo riesgo debido a la lixiviación de los plaguicidas desde zonas agrícolas (Melloul y Collin, 1994). Los principales rasgos distintivos de la contaminación de origen agrícola son su carácter difuso, es decir aportes de plaguicidas de forma intermitente relacionados con actividades estacionales propias de la agricultura (Carpenter *et al.*, 1998). La contaminación difusa resulta entonces de un efecto acumulativo que es producto de pequeños aportes individuales realizados desde sitios diversos en grandes extensiones de terreno, pudiendo afectar la calidad del agua subterránea. Para comprender la naturaleza de la contaminación difusa del agua subterránea por los plaguicidas, es necesario considerar todos los factores involucrados en dicho proceso: uso de la tierra, zona no saturada, clima y características hidrogeológicas del sistema acuífero.

La vulnerabilidad a la contaminación es una propiedad intrínseca que establece la susceptibilidad de un acuífero a ser afectado adversamente por una carga contaminante (Foster *et al.*, 1987). Es decir que el término vulnerabilidad es utilizado para representar las características geológicas e hidroge-

ológicas intrínsecas que determinan la facilidad con la que el agua subterránea puede contaminarse por la actividad humana. Las evaluaciones de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas tienen como objetivo determinar la tendencia o probabilidad de que los contaminantes alcancen el acuífero luego de ser depositados en la superficie del terreno (Liggett y Sonia Talwar, 2009).

La región semiárida pampeana, es una gran planicie cubierta por sedimentos eólicos loésicos del cuaternario (Zárate, 2003). El entorno hidrogeológico de la región se caracteriza por una litología arenosa permeable y un nivel freático somero, lo cual favorecería a un breve tiempo en tránsito de los plaguicidas en la zona vadosa, y por lo tanto un transporte relativamente rápido del compuesto desde la superficie hasta la capa freática.

Una de las metodologías más empleadas para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos es el índice DRASTIC (ID), basado en la valoración de siete parámetros hidrogeológicos (Aller *et al.*, 1987). El ID estima la recarga de los acuíferos en base anual. Sin embargo, en las zonas semiáridas, la precipitación media anual es menor que la evapotranspiración potencial media anual (Simmers *et al.*, 1997), y por lo tanto el balance hídrico anual es negativo. Es por ello que en el presente estudio, la recarga se estimó mensualmente con el fin de identificar los meses con excedentes puntuales de agua, y por lo tanto de recarga de acuíferos. El objetivo del presente estudio fue evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación por plaguicidas en la zona agrícola de la provincia de La Pampa.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la zona agrícola de la provincia de la Pampa emplazada en la región semiárida pampeana central Argentina (Figura 1). La región es una gran planicie cubierta por sedimentos eólicos loésicos del cuaternario. El clima es templado semiárido con una temperatura media anual de 16,2°C. Las precipitaciones presentan una marcada irregularidad, con un balance hídrico anual negativo pero con importantes excedentes puntuales (Simmers, 1997).

Desde el punto de vista geomorfológico, el área se divide en dos unidades (Cano *et al.*, 1980): subregión de la planicie medanosa (PM) y subregión de la

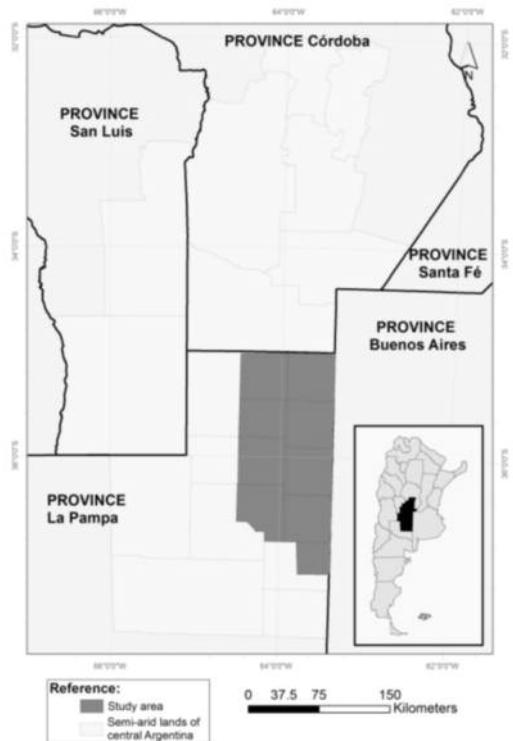


Figura 1. Localización del área de estudio.

| PARAMETROS | Peso | Rango Modificado | Puntaje | Fuente |
|----------------------------|------|---|---------|----------------------------------|
| D Prof. Nivel Freático | 5 | < 10 | 9 | |
| | | 10-20 | 7 | |
| | | 20-50 | 5 | Roberto et al. (2008) |
| | | 50-100 | 2 | |
| | | >100 | 1 | |
| R Recarga (mm/mes) | 4 | 0-12 | 1 | Área de Climatología. |
| | | 13-24 | 3 | EEA Anguil, INTA. |
| | | 25-36 | 5 | |
| A Tipo de acuífero | 3 | Depósitos Arenosos | 6 | SEGEMAR (1997) |
| | | Limos arenosos | 5 | |
| S Suelo | 5 | Arenosa | 9 | |
| | | Franco arenosa-arenosa | 8 | |
| | | Franca arenosa | 7 | SAGPyA-INTA (1990) |
| | | Franco arenosa y Franca | 6 | |
| | | Arenosa Franca, franca y Franca arenosa | 5 | |
| T Topografía (%) | 3 | 0-2 | 10 | Área de SIG EEA Anguil, INTA. |
| I Impacto zona no saturada | 4 | Arena | 8 | |
| | | Arena y tosca | 7 | CANO et al. (1980) |
| | | Duricostra | 6 | |
| C Conductividad hidráulica | 2 | Depósitos arenosos | 10-20 | Castro y Schulz. (2009) |
| | | Depósitos Limos arenosos | < 20 | Auge (2005). |

Tabla 1. Parámetros del ID con su peso relativo y rangos con sus correspondientes puntajes encontrados para el área de estudio.

planicie con tosca (PT), localizada en el sector Este y Oeste, respectivamente. Los suelos se clasifican como Molisoles, Haplustoles Enticos y Ustipsamentes Típicos, distribuidos en la PM y PT. La PM posee suelos arenoso-francos con presencia de niveles freáticos someros oscilando según las precipitaciones registradas. La planicie con tosca posee mayor contenido de limo, texturas franco-arenosas a francas y capas de tosca a profundidades variables de 30 a 150cm.

En cuanto a la hidrogeología, en la parte inferior de la secuencia se encuentran arcillas verdes y castañas, arenas gruesas y medianas intercaladas con arcillas grises asignables al Mioceno, con un carácter hidrológico acuitardo o acuicludo. Por encima, y hasta cerca de la superficie, se halla la Formación Cerro Azul de naturaleza arenosa fina a limosas, variablemente consolidada por presencia de material calcáreo cementante. Sobre esta Formación se encuentra una capa arenosa con espesores que van desde los 15m (en áreas medanosas) hasta unos

pocos decímetros (en depresiones), conformada por arenas gruesas a medianas que pasan en superficie a una arena más fina con abundante vidrio volcánico. Las dos formaciones superiores son de gran importancia ya que albergan al acuífero libre (Malán, 1983), cuyo nivel freático se localiza en las arenas eólicas superiores.

Descripción índice DRASTIC para plaguicidas (ID)

La metodología de construcción del ID se basa en la determinación de siete parámetros hidrogeológicos que pueden ser mapeados cada uno por separado, la superposición de estos siete mapas resultará en un ID, que permite establecer las zonas de distinto grado de vulnerabilidad (Aller et al., 1987). Los parámetros son: Profundidad del agua Subterránea (D), Recarga (R), Material del acuífero (A), Suelo (S), Topografía (T), Impacto de la zona no saturada (I), Conductividad Hidráulica (C).

A cada parámetro se le da dos valoraciones, una por su peso relativo (p) que va de 1 a 5, según sea

más o menos importante para la potencia a la contaminación, y otra valoración en escala del 1 al 10, según el menor o mayor impacto (i) sobre la vulnerabilidad de cada uno de los parámetros. El ID de Vulnerabilidad es igual a la sumatoria de los productos del peso por la escala de cada parámetro.

$$\text{ID} = \text{DpDi} + \text{RpRi} + \text{ApAi} + \text{SpSi} + \text{TpTi} + \text{Ipli} + \text{CpCi}$$

Una vez calculado el ID, se obtiene un mapa de la vulnerabilidad intrínseca de la zona de estudio en el cual es posible identificar áreas de mayor o menor susceptibilidad a la contaminación. A valores mayores del índice, mayor el potencial de contaminación. Este índice provee sólo una evaluación relativa y no está diseñado para proveer valores absolutos (Tabla 1). Mediante el uso del software Arc Gis 9.2, se elaboraron mapas correspondientes a cada uno de los 7 parámetros hidrogeológicos por separados. La superposición de estos, resultó en un ID, que permitió establecer las zonas de distinto grado de vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987). El ID se dividió en rangos de vulnerabilidad: baja, moderada y alta correspondiente a los intervalos: 23-99, 100-159, 160-226, respectivamente (Ferreira y Olivera, 1997)

Recarga

Para el cálculo de la recarga se utilizó el balance hidrológico diario (Thorntwaite, 1948) mediante el uso del Software Agroagua Versión 5 (Forte Lay *et al.*, 1996). Los datos fueron provistos por el área de Climatología de la EEA Anguil de INTA.

Dependiendo de las precipitaciones y la ETP pueden identificarse meses con mayores excesos. Sin embargo, no todos los años se dan estas condiciones. Por lo tanto, se calculó un promedio mensual sin considerar el dato nulo. Además, se calculó una frecuencia de ocurrencia de excesos referido a la serie de datos de cada sitio (Ecuación 1). A partir de allí, se obtuvo un valor generado según el producto de promedio de exceso y la frecuencia de ocurrencia de excesos. Con estos valores se elaboró el mapa de “recarga”. Dado que la probabilidad de excesos no es la misma para todos los sitios y años este artillugio permite uniformar la información y ser utilizada como una probabilidad de recarga. De ese modo se seleccionaron los meses con mayor frecuencia de ocurrencia de excesos de agua.

Ecuación 1

$$P(M_i^T) = \frac{\text{Número de meses } i \text{ con excesos en el registro}}{\text{Número total de meses } i \text{ en el registro}}$$

RESULTADOS

De acuerdo a la estimación de los excesos de agua, la recarga de los acuíferos por las lluvias ocurre durante mediados de la primavera (noviembre) y verano (marzo), y durante el inicio del otoño (abril). La frecuencia de ocurrencia de excesos de agua decreció en el siguiente orden: marzo > abril > noviembre (Figura 2 a, b, c). Teniendo en cuenta que la distribución anual de las lluvias presenta una importante concentración primaveral (60-75%) y otoño-invernal (25-40 %), la recarga sigue el patrón cíclico natural de las lluvias para la región.

La mayor recarga en el sector nororiental del área de estudio responde a las mayores precipitaciones que se registran en este sector. El agua es el principal vehículo de transporte másico de plaguicidas al agua subterránea. Es por ello que el estudio de la vulnerabilidad de los acuíferos debe incluir la estimación de la recarga y su estacionalidad. En el noreste del área, durante marzo, abril y noviembre la potencialidad de que los plaguicidas se desplacen a través de la zona no saturada, y alcancen el agua subterránea es mayor en contraste con el sudoeste para el mismo período.

El ID se estimó para marzo, abril y noviembre obteniéndose tres mapas de la vulnerabilidad de los acuíferos de la zona agrícola de la provincia de La Pampa (Figura 3 a, b, c). En general, los mapas muestran que el sector Este y el área centro Oeste presentan una alta y moderada vulnerabilidad a la contaminación por plaguicidas, respectivamente.

El sector Este es una planicie medanosa cuya litología arenosa no presenta mayor resistencia a la infiltración de agua, y por lo tanto al transporte de solutos. Así mismo, el nivel freático se halla cercano a la superficie, lo cual implica un perfil litológico de poco espesor, un menor tiempo en tránsito del plaguicida en la zona no saturada y una menor eficiencia del perfil como filtro natural de contaminantes. La presencia de acumulaciones arenosas de mediaña a alta permeabilidad favorece la recarga de ori-



Figura 2 a, b, c. Meses con mayor frecuencia de ocurrencia de eventos de excesos de agua en el perfil del suelo.

gen meteórico, y por lo tanto la movilidad de los plaguicidas a través de la zona no saturada. Similares características hidrogeológicas determinaron una alta vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la zona Dire Dawa en la región semiárida de Etiopía (Tilahun y Merkel, 2010).

La moderada vulnerabilidad del sector centro Oeste se explica por una conjunción de factores hidrogeológicos tales como niveles freáticos más profundos (< 10m), una menor frecuencia de excesos de agua, y un perfil litológico menos permeable con un manto de tosca de espesor y profundidad variable. Tanto el nivel freático, la litología y la recarga son los parámetros con mayor peso en el polinomio del DRASTIC y en el sector NE de la zona de estudio, toman relevancia dados los elevados puntajes definidos de acuerdo a la presencia de niveles freáticos poco profundos, litología arenosa, y mayor recarga comparado con el sector Oeste.

CONCLUSIONES

El índice DRASTIC conjuntamente con la aplicación de un sistema de información geográfica permitió obtener mapas de diferentes grados de vulnerabilidad para la zona de estudio. Bajo condiciones naturales, en los meses de marzo, abril y noviembre, el sector Este de la zona de estudio, es altamente vulnerable a la contaminación por plaguicidas y otros agentes contaminantes comparado con el sec-

tor Oeste cuya vulnerabilidad es moderada. Los mapas obtenidos del índice DRASTIC proveen una primera aproximación respecto a las áreas que debería priorizarse en términos de intervención mediante manejos alternativos de protección de acuíferos.

BIBLIOGRAFÍA

- ALVAREZ, R.; STEINBACH, H.S. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil & Tillage Research* 104, 1–15.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHER, J.H.; PETTY, R.J.; HACKETT, G. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency Report (EPA/600/2-87/035) pp 622.
- AUGE, M.P. 2005. Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata. ISBN: 987-22403-0-2, pp 293-311.
- CANO, E.; CASAGRANDE, G.; CONTI, H.; SALAZAR LEA PLAZA, J.; PEÑA ZUBIARTE, C.; MALDONADO PINEDO, D.; MARTÍNEZ, H.; HEVIA, R.; SCOPPA, C.; FERNÁNDEZ, B.; MONTES, M.; MUSTO, J.; PITTLUGA, A. 1980. *Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y Universidad Nacional de La Pampa, Buenos Aires.
- CARPENTER, S.R.; CARACO, N.F.; CORRELL, D.L.; HOWARTH, R.W.; SHAPLEY, A.N.; SMITH, V.H.; 1998.

- Nonpoints pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8, 559–568.
- CASTRO, E.; SCHULZ, C. 2009. Aportes de la Hidrogeología al conocimiento de los Recursos Hídricos. En: Mariño E, Schulz C (Eds). *Hidrogeología y Modelo conceptual del acuífero detrítico de Intendente Alvear y Ceballos, La Pampa*. Argentina. Tomo 1. ISBN978-987-1082-36 Buenos Aires-Santa Rosa: AIH Grupo Argentino-Amerindia, pp 25-34.
 - DÍAZ-ZORITA, M.; DUARTE, G.A.; GROVE, J.H. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research* 65, 1–18.
 - FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. 1987. Contaminación de las Aguas subterráneas, un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable. Terceras Jornadas de Actualización en Hidrología Subterránea. Huerta Grande, Córdoba. 1994. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.
 - FORTE LAY, J.A.; AIELLO, J.L.; KUBA, J. 1996. Software AGROAGUA versión 4.0.
 - LIGGET, J.E.; TALWAR, S. (2009) Assessments and Integrated Water Resource Management. *Watershed Management Bulletin* 13: 18-29.
 - LOBO-FERREIRA, J.P.; OLIVEIRA, M.M. 1997. DRASTIC Groundwater vulnerability mapping of Portugal. Proceeding of Theme C of the 27th Congress of the International Association for Hydraulic Research, San Francisco, USA. pp. 132-137.
 - MALÁN, J.M. 1983. Estudio hidrogeológico para el abastecimiento de agua potable a la localidad de General Pico, departamento Maracó, provincia de La Pampa. Informe Preliminar. Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras, Actas III: 1449-1457, Olavarría.
 - MELLOUL, A.; COLLIN, M. 1994. Water quality factor identification by the Principal Components T statistical method. *Water Science and Technology*. 34:41 –50.
 - ROBERTO, Z.; TULIO, J., MALAN, J. 2008. Cartografía de agua subterránea para uso ganadero de La Pampa. Publicación Técnica. Nº 73. ISSN 0325-2132.
 - SAGyP-INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. UNPD project. Arg-85/019, Buenos Aires. 1600 pp.
 - SCHULZ, C. 1996. Curso sobre la problemática del agua. Municipalidad de General Pico –CORPICO, 161 p, General Pico.
 - SEGEMAR. 1997. Servicio Geológico Minero Argentino. Mapa Geológico de la República Argentina.
 - SIMMERS, I. 1997. Groundwater recharge principles, problems and developments. In: SIMMERS, I. (Ed). *Recharge of phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas*. International Association of Hydrogeologists. AA. Balkema/Rotterdam/Brookfield, pp 1-18.
 - SZÉKÁCS, A.; MÖRTL, M.; DARVAS, B. 2015. Monitoring Pesticide Residues in Surface and Ground Water in Hungary: Surveys in 1990–2015. *Journal of Chemistry*. Article ID 717948, 15 pages
 - SHAKERKHATIBI, M.; MOSAFERI, M.; ASGHARI JAFARABADI, M.; LOTFI, E.; BELVASI, M. 2014. Pesticides residue in drinking groundwater resources of rural areas in the northwest of Iran. *Health Promotion Perspectives* 4 (2), 195-205.
 - THORNTHWAITE, C.W. 1948. An approach Howard a rational classification of climate. *Geographical Review*, New York 38, 55-94.
 - TILAHUN, K.; MERKEL, B.J. 2010. Assessment of groundwater vulnerability to pollution in Dire Dawa, Ethiopia using DRASTIC. 5. *Environmental Earth Sciences* 9, 1485-1496.
 - VIGLIZZO, E.F.; FRANK, F.C.; CARRENO, L.V.; JOBBÁGY, E.G.; PEREYRA, H.; CLATT, J.; PINCEN, D.; RICARD, M.F. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology* 17, 959-973.
 - VONBERG, D.; VANDERBORGH, J.; CREMER, N.; PÜTZ, T.; HERBST, M.; VEREECKEN, H. 2014. 20 years of long-term atrazine monitoring in a shallow aquifer in western Germany. *Water research* 50, 294-30.
 - ZÁRATE, M.A. 2003. Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews* 22, 1987–2006.

Estudio de la cobertura de nieve en la Cuenca del Río Colorado mediante información satelital

RESUMEN

En cuencas de régimen nival, como la del río Colorado (Argentina), las variaciones espaciales y temporales de la cobertura de nieve afectan a la disponibilidad de los recursos hídricos. Su estudio permite comprender el funcionamiento del sistema hidrológico, realizar una planificación y un manejo integral del agua a nivel de la cuenca, entre otros. La información derivada de sensores remotos complementa aquella provista por estaciones meteorológicas, y a su vez permite el seguimiento de grandes extensiones de territorio de forma permanente, objetiva y económica. En este trabajo se utilizó un producto derivado de imágenes satelitales provistas por el sensor MODIS (MOD10A2), con el objetivo de evaluar el área cubierta por nieve y su variación espacio-temporal en la cuenca alta del río Colorado. El área de estudio correspondió a las subcuenca de los ríos Grande y Barrancas, donde se encuentran los principales afluentes en zonas de alta cordillera. Se analizó la serie años 2003 a 2013, en el período comprendido entre el 23 de abril y el 17 de noviembre de cada año (27 fechas). Los resultados muestran una tendencia de disminución de la extensión de la cubierta de nieve a partir del año 2005, lo cual se ve reflejado en la disminución del derrame anual de los ciclos hidrológicos posteriores ($R^2=0,82$). Asimismo, el año 2005 presenta la mayor cobertura (2914,56 km²) en la serie de años analizada, la mayor parte del año (de 25 a 27 fechas), que pertenece principalmente a la cuenca del río Grande. La metodología utilizada permitió identificar zonas que en la mayor parte del tiempo analizado se encontraban

ban cubiertas por nieve y zonas con mayores variaciones temporales (interanual e intranual).

Palabras clave: manejo de cuenca, MODIS, MOD10A2, teledetección

INTRODUCCIÓN

En cuencas de régimen nival, las variaciones espaciales y temporales de la cubierta de nieve afectan a la disponibilidad de agua para toda la cuenca, dado que el tamaño del área cubierta de nieve es un claro indicador de la magnitud de la cantidad de recursos hídricos almacenados (Martinec *et al.*, 1991; Baumgartner *et al.*, 1987). Parte de la precipitación de invierno se acumula como nieve en la cuenca alta, formando reservorios que durante los meses de primavera y verano conforman una porción importante en el escurrimiento del río. El área cubierta de nieve depende de una serie de factores que afectan la temperatura del manto y la radiación solar incidente, los que a su vez están condicionados por la pendiente, orientación y elevación de cada punto. El seguimiento de la extensión de la cubierta nival permite estimar con algunos meses de anticipación, el volumen de agua disponible para los diversos usos (urbano, agrícola, minero, entre otros) y así poder planificar y gestionar de manera integral los recursos hídricos a escalas regionales (Herms y Jorge, 2012).

Existen diversos métodos para cuantificar tanto la acumulación como la fusión de nieve pero en todos los casos se obtiene un dato puntual en el tiempo y el espacio (Lascano y Velasco, 2007). Por lo

tanto, el uso de datos provistos por redes meteorológicas no es suficiente en cuencas de grandes extensiones, dado que el número de puntos de medición en el territorio es bajo. La información derivada de la teledetección se presenta aquí como una interesante fuente complementaria de información para el seguimiento y estudio de grandes extensiones.

La cobertura de nieve se puede determinar a partir de las bandas del visible y del infrarrojo cercano, para lo cual existen varios sensores aplicados al estudio y monitoreo de los recursos naturales que operan en diferentes resoluciones espaciales y temporales (e.g. MODIS, Landsat TM, NOAA). Diversos autores han utilizado los productos de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) en el seguimiento espacial y temporal de la cubierta de nieve en diferentes áreas de estudio (Ault *et al.*, 2006; Cea *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008; Cartes, 2009; Dahri *et al.*, 2011; Herms y Jorge, 2012).

Dada la importancia de conocer la distribución del manto nival y su evolución temporal, en este trabajo se utilizó un producto derivado de imágenes satelitales provistas por el sensor MODIS (MOD10A2), con el objetivo de evaluar el área cubierta por nieve y su variación espacio-temporal en la cuenca alta del río Colorado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio comprende la cuenca alta del río Colorado. Éste nace por la confluencia de los ríos Grande y Barrancas, aproximadamente a los $36^{\circ}52'19''S$ y $69^{\circ}45'34''O$ y recorre alrededor de 1.200 km atravesando parte de las provincias de Mendoza, Neuquén, Río Negro, La Pampa y Buenos Aires (Figura 1). El río Colorado tiene un derrame anual de 4.600 Hm³ y un caudal medio anual es de 138,8 m³/seg, presentando una marcada estacionalidad primavero-estival. Es un río de régimen nival, alimentado por la fusión de la nieve acumulada en la Cordillera Principal, en el área alta de las subcuenca de los dos principales afluentes (COIRCO, 2013). La superficie total bajo estudio es de 13.900 km² que corresponde a la cuenca hidrológica activa y representa el 29 % de la superficie de toda la cuenca.

Hidrología de la cuenca

Se analizaron los valores de derrame anual del río Colorado para el período 2003-2013 de la Estación Buta Ranquil, que pertenece al Comité Interjurisdiccional del Río Colorado (COIRCO) por ser la primera estación de aforo luego de la confluencia de los río Grande y Barrancas (Figura 1). De www.coirco.gov.ar se obtuvieron los registros de

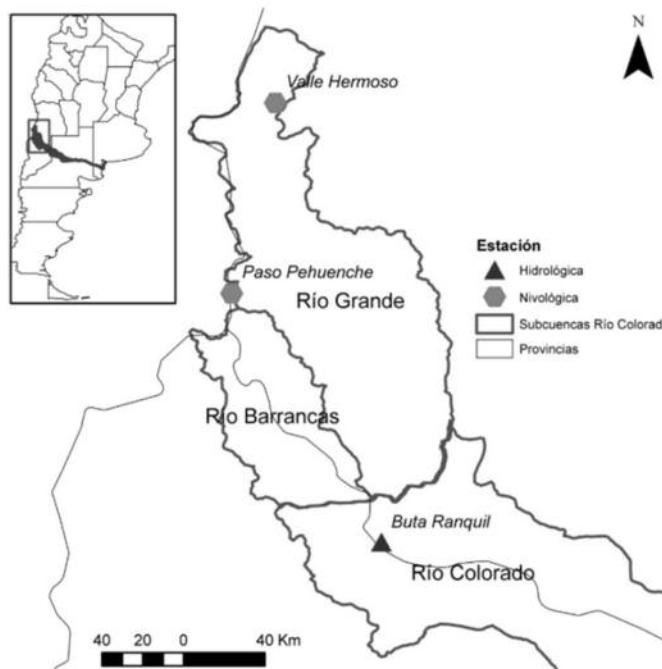


Figura 1. Ubicación del área de estudio, en la cuenca alta del río Colorado.

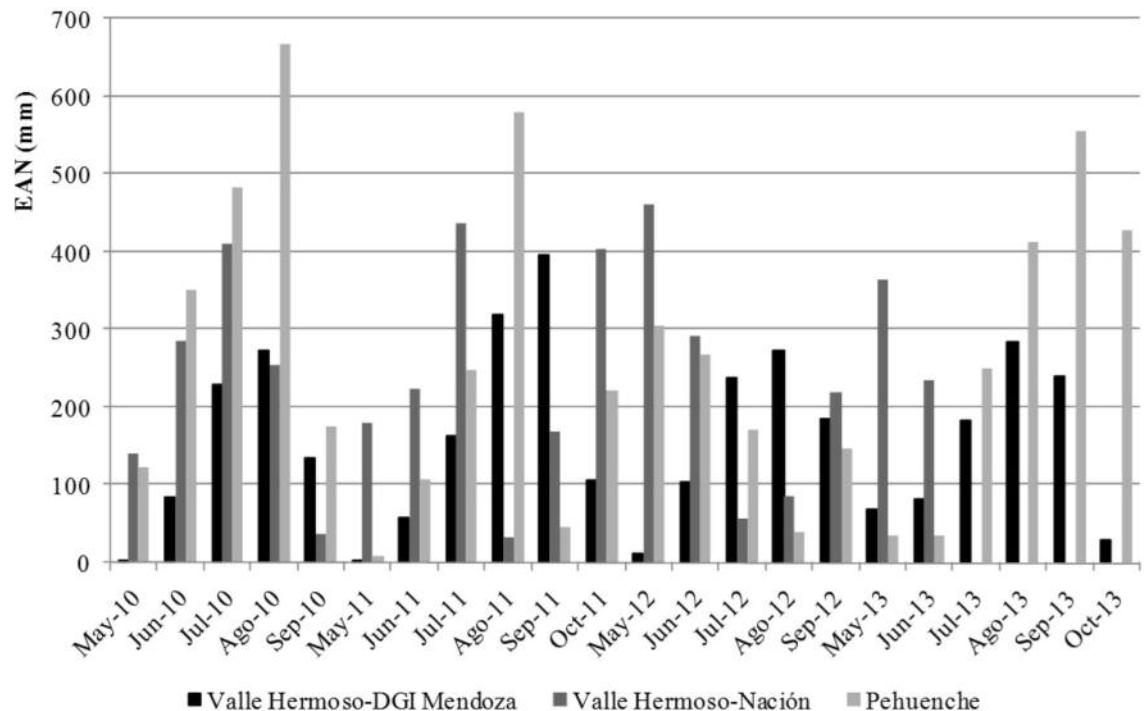


Figura 2. Equivalentes de agua en nieve (mm) de las estaciones nivológicas de la cuenca alta del río Colorado, desde mayo de 2010 a octubre de 2013.

equivalentes de agua en nieve (EAN) desde mayo el año 2010 a octubre de 2013, de las tres estaciones nivológicas ubicadas en la cuenca alta del río Colorado (Figura 1): Paso Pehuenche ($35^{\circ}58'47,40''S$ y $70^{\circ}23'38,50''O$), Valle Hermoso-Departamento General de Irrigación de Mendoza, Valle Hermoso-Subsecretaría de Recursos Hídricos de Nación ($35^{\circ}08'32,10''S$ y $70^{\circ}12'05,60''O$). Los períodos de acumulación de nieve corresponden a los meses de mayo a octubre dependiendo del año, Figura 2. A partir de esta información se seleccionó el período de estudio y seguimiento de la cobertura de nieve mediante el producto de MODIS.

Determinación de la cubierta de nieve

Se utilizó el producto MOD10A2 (<http://reverb.echo.nasa.gov>), el cual muestra la extensión máxima de la cubierta de nieve en un compuesto de 8 días (Hall *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 2006), con una resolución espacial de 500 metros. El valor de píxel indica de manera cualitativa la presencia o ausencia de nieve (o nada, 25 dudoso, 50 nube y 200 nieve). La presencia de nieve en un píxel es registrada cuando para al menos uno de los 8 días se detecta. Se trata, por lo tanto, de una aproximación que maximiza la presencia de nieve. Se utiliza-

ron las escenas h12v12 y h13v12, y se analizó la serie años 2003 a 2013, en el período comprendido entre el 23 de abril y el 17 de noviembre de cada año (27 fechas). La selección de dichas fechas se basa en el comportamiento observado de la cobertura de nieve en las tres estaciones nivológicas que se localizan en la cuenca alta (Figura 1; Figura 2).

Se agruparon las imágenes por fechas y por años, mediante el uso del software ERDAS 9.1; así se obtuvo un archivo por año de las diferentes fechas (en total 11 archivos que representan los 11 años - 2003a2013- de 46 bandas cada uno que son las fechas julianas cada 8 días del producto MOD10A2) para poder identificar la marcha anual de la cobertura de nieve, y 46 archivos de las mismas fechas pero con los diferentes años para poder detectar si la fecha en cuestión siempre presentó nieve. Luego fue necesario conocer siempre la fecha de ocurrencia de nieve, para la cual se diseñó un algoritmo que indicara si había nieve y a qué fecha correspondía, asignándole el valor de esa fecha. Por último para cada año se agruparon las fechas o compuestos por clases, donde cada una de las clases contienen: al menos 3 fechas, de 4 a 6, de 7 a 9, de 10 a 12, 13 a 15, 16 a 18, 19 a 21, 22 a 24 y de 25 a 27 fechas. Posteriormente, se calculó el área de cada clase a

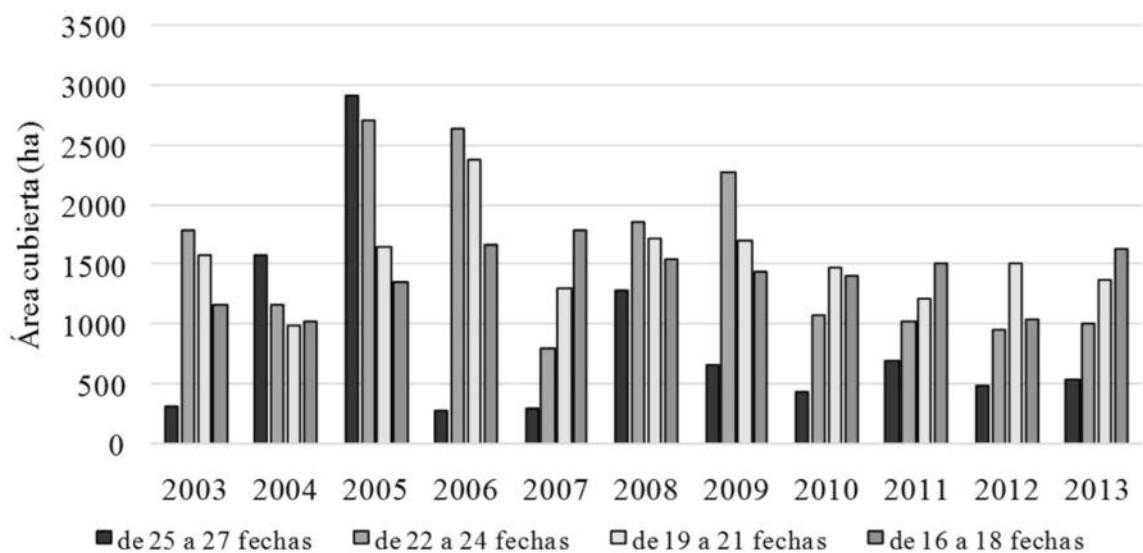


Figura 4. Área cubierta por nieve (has) para las mayores frecuencias de fechas analizadas, período 2003-2013.

partir de la cantidad de píxeles y se correlacionó con el derrame anual del río Colorado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cobertura de nieve en la cuenca del río Colorado es altamente variable en el espacio y el tiempo, Figura 3. Se pueden observar zonas de la cuenca en que la mayor parte del tiempo (25 a 27 fechas) están cubiertas por nieve (región oeste y norte) y otras donde la duración de la cobertura es más variable (centro y sur del área de estudio). Las áreas con mayor duración de cobertura corresponden a zonas de mayor altimetría y en su mayoría están situadas en la subcuenca del río Grande.

Para la serie de años analizada, el año 2005 fue el que presentó mayor cobertura de nieve, lo cual coincide con los mayores valores de derrames registrados por COIRCO durante el ciclo hidrológico 2005-2006 (7897 Hm³), ver Tabla 1. El año con menos cobertura fue el 2013, asociado a un derrame anual de 2500 Hm³. Se observa además una disminución de la cobertura desde el año 2009 hasta el último año bajo análisis. De todas las clases analizadas se encontró mayor variación en el área cubierta por nieve en la clase que comprende de 25 a 27 fechas acumuladas (Figura 4), con un coeficiente de variación de 92.68. Esta clase es de especial interés en este estudio, ya que son las zonas de mayor reservorio de agua, por presentar cobertura la mayor parte del tiempo, por lo que se trataría de una

cobertura más permanente. El área cubierta con una frecuencia de 16 a 18 y 19 a 21 fechas por año, presentan menor variabilidad entre años, con un coeficiente de variación de 23.3 y 17.7 respectivamente, por lo que sería nieve más estable entre años.

Existe una relación directamente proporcional ($R^2 = 0.82$) entre el derrame anual y el área cubierta por nieve (Figura 5) con la clase que contiene entre 22 a 24 fechas con cobertura. Por tanto, la reducción del área cubierta por nieve tiene efecto directo sobre el caudal del río, salvo en el caso del ciclo hidrológico 2006-2007, donde la cobertura de nieve (clase de 25 a 27 fechas) se ve reducida y su derrame tuvo valores altos (6851 Hm³, Tabla 1), lo que podría deberse a un efecto de tipo retardado por la acumulación de nieve en el ciclo anterior.

CONCLUSIONES

En cuencas de grandes extensiones, como la cuenca del río Colorado, donde además se suma la inaccesibilidad para la toma de datos sobre todo a fines del invierno y en primavera, la información derivada de sensores remotos es la única herramienta disponible para el seguimiento de la cobertura de nieve.

Existe alta variabilidad interanual e intra-estacional de cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado. Con mayor cantidad de años analizados, complementados con información hidrológica y meteorológica se podrían generar pronósticos de

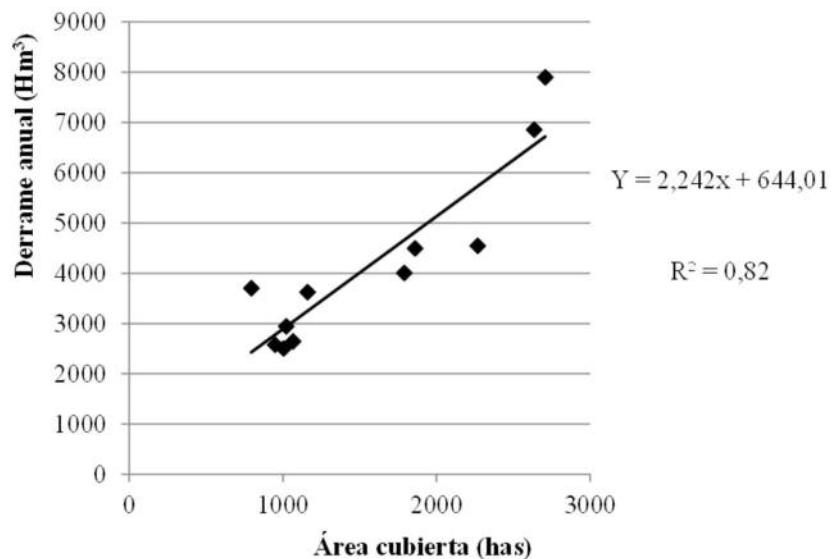


Figura 5. Relación del área cubierta por nieve (has) y el derrame anual (del río Colorado (Hm³), se considera el período julio de 2003-junio de 2014.

Tabla 1: Derrame anual (Hm³) y área cubierta por nieve (has) para los ciclos hidrológicos entre 20003 y 2014.

| Ciclo Hidrológico | Derrame anual (Hm ³) | Área cubierta (has) |
|-------------------|----------------------------------|---------------------|
| 2003-2004 | 4006 | 1789 |
| 2004-2005 | 3623 | 1161 |
| 2005-2006 | 7897 | 2708 |
| 2006-2007 | 6851 | 2635 |
| 2007-2008 | 3702 | 795 |
| 2008-2009 | 4490 | 1860 |
| 2009-2010 | 4544 | 2267 |
| 2010-2011 | 2644 | 1066 |
| 2011-2012 | 2940 | 1022 |
| 2012-2013 | 2575 | 949 |
| 2013-2014 | 2500 | 1004 |

derrame y tendencias sobre cobertura de nieve en la cuenca activa del río Colorado. Se plantea la necesidad de ampliar y mejorar esta investigación, incluyendo datos sobre equivalentes de agua nieve y espesor de nieve, que puedan transformarse en volumen de agua, y otros datos como temperatura, radiación solar, precipitación.

Este modelo constituye una herramienta sencilla y práctica para el seguimiento espacial y temporal de la cobertura de nieve en tiempo real, que si bien no tiene en cuenta el espesor de nieve y densidad, la cobertura cuantificada por el modelo está asociada al derrame anual del río, sirviendo de base para la planificación y manejo integral del recurso hídrico

BIBLIOGRAFIA

- Ault, T. W, K.P. Czajkowski, T. Benko, J. Coss, J. Struble, A. Spongberg, M. Templin y C. Gross, (2006). Validation of the MODIS Snow Product and Cloud Mask Using Student and NWS Cooperative Station Observations in the Lower Great Lakes Region, *Remote Sensing of Environment*, 105(4):341-353.
- Baumgartner, M. F., Seidel, K., Martinec, J. (1987). Towards snowmelt runoff forecast based on multisensor remote sensing information. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing GE-2S*, 746-75.
- Cartes, M.A. (2009). Pronóstico de volúmenes de deshielos mediante redes neuronales recurrentes e imágenes satelitales MODIS. Tesis Ms. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento De Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Cea, C., Cristóbal, J., Pons, X. (2007). Determinación de la superficie nival del Pirineo Catalán mediante imágenes Landsat y MODIS. En *7^a Semana de Geomática*. Barcelona.
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). (2013). Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado – Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. Disponible en: www.coirco.com.ar
- Dahri, Z. H., Ahmad, B., Leach, J. H., Ahmad, S. (2011). Satellite-Based Snowcover Distribution and Associated Snowmelt Runoff Modeling in Swat River Basin of Pakistan. En *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences*, 48 (1): 19–32.
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V. (2001). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and

Sea Ice-Mapping Algorithms. Disponible en:
http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod10.pdf

- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V.V. (2006). MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500 m Grid V005, Updated Daily. National Snow and Ice Data Center.
 - Herms, I., Jorge, J. (2012). “Variación anual e interanual del manto nivoso en el Port del Compte-Serra del Cadí a partir de imágenes MODIS”. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Madrid.
 - Lascano, M. E., Velasco, I. (2007). Estimación de cobertura de nieve en los Andes Centrales con datos NOAA-AVHRR. Cuencas de los ríos Colorado y Neuquén. www.infraestrura.com.ar
 - Martinec, J., Seidel, K., Burkart, U., Baumann, R. (1991). Areal modelling of snow water equivalent based on remote sensing techniques. In XX General Assembly IUGG in Vienna 1991, IAHS-IUFRO Symposium Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas, pages 121–129. IAHS Publication No. 205.
 - Wang, X., H. Xie, and T. Liang. (2008). Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its applications in northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1497-1513.
-

Actualización del mapa digital de fisonomía vegetal de la provincia de La Pampa

RESUMEN

Una característica del paisaje pampeano es la coexistencia de distintos estados de sucesión vegetal, provocados por múltiples combinaciones de factores ambientales y antrópicos. Dichos factores pueden ser por ejemplo, los incendios naturales o las quemas prescriptas, las sequías o inundaciones y, distintas situaciones de manejo. En este contexto, las imágenes satelitales acopladas a un entorno SIG, proporcionan un insumo básico que permite clasificar ambientes según los distintos tipos fisonómicos de vegetación y evaluar posteriormente los cambios ocurridos. En este trabajo se presenta un mapa de fisonomía vegetal generado a partir de la clasificación no supervisada de imágenes satelitales del año 2017 (gvSIG 1.12), a fin de actualizar el mapa de vegetación de la provincia. En esta situación de dinamismo constante de la vegetación, los mapas de fisonomía vegetal cobran importancia como herramienta para realizar primero un diagnóstico de la situación y luego, proponer pautas de manejo tendientes a revertir la misma en aquellos casos donde resulte factible.

Palabras clave: vegetación, cartografía, SIG, clasificación

INTRODUCCION

Los cambios en la vegetación de la provincia responden mayormente a los pulsos de las precipitaciones, a la ocurrencia de fuegos naturales y a distintas situaciones de manejo. En este contexto

donde el cambio constante es la regla y no la excepción, es necesaria la continua actualización de la información disponible. En lo que respecta al mapeo fisonómico de la provincia de La Pampa, además del *Inventario Integrado de Recursos Naturales* de la provincia de La Pampa del año 1980 (y su actualización del año 2004), se destacan tres antecedentes más recientes. El primero de ellos corresponde a una publicación técnica del INTA Anguil del año 2005, en donde se realizó un relevamiento fisonómico de la vegetación en el área del caldenal (Roberto *et al.* 2005). El segundo, consiste en un mapa de Fisonomías de Vegetación de la Provincia de La Pampa elaborado en conjunto por INTA Anguil y el Gobierno de La Pampa (Roberto *et al.* 2008). Transcurrida ya una década desde la última publicación, se hace necesaria una actualización de la información. Hay que aclarar que si bien existen trabajos de otros autores que han tratado temas referidos a la fisonomía vegetal, los objetivos planteados fueron diferentes y la mayoría de ellos no abordó la totalidad de la provincia, sino que fueron estudios mucho más específicos, correspondientes a áreas más reducidas.

La caracterización fitogeográfica de la provincia de La Pampa, generalmente ha sido motivo de discrepancia entre los botánicos. A pesar de ello, existe un consenso general acerca de la presencia de una región central caracterizada por vegetación xerófila arbórea, y una región occidental en donde la vegetación también es xerófila pero de tipo arbustiva. La zona central posee distintos nombres según los autores: «Monte alto» (Helmberg 1898), «Bosque pampeano» (Parodi 1945), «Provincia del

Espinal» (Cabrera 1953), «Monte argentino» (Kulm 1930) o «Región del Valle Pampeano» (Monticelli 1938); mientras que la zona occidental constituye el «Monte» (Rovereto 1914), «Monte Occidental» (Helberg 1898) o «Región del Fachinal» (Monticelli 1938).

Una particularidad del bosque pampeano es su discontinuidad, ya que se encuentra interrumpido por franjas o lenguas que corresponden a los valles transversales con vegetación de tipo estepario herbáceo o arbustivo (INTA *et al.* 1980). En líneas generales, el caldenal se extiende desde el S de la provincia de San Luis hasta el S de La Pampa, resultando los sitios ideales para el asentamiento de caldén (*Propolis caldenia*) aquellos con terreno bajo o depresiones, con suelos franco arenoso fino, profundos (sin tosca en perfil) con concreciones calcáreas aisladas o formando una delgada capa. Sin embargo, se presentan variantes a lo largo de toda la región. Desde el sector NO del departamento Loventué hasta más al S del Bajo de los Algarrobos, el caldén domina en las depresiones, mientras que en las pendientes lo hace el algarrobo (*Prosopis flexuosa*), acompañado de una gran cantidad de arbustos. Por su parte, en la zona de planicies y valles transversales el caldenal se encuentra relegado a las suaves pendientes y a los bajos, formando bosques abiertos con un estrato denso de gramíneas (Roberto *et al.* 2005).

Al SO y O de Chacharramendi existen algunas áreas con bosque caducifolio mixto donde coexisten algarrobo y caldén; en otras codomina el algarrobo con arbustos y gramíneas intermedias. Al S y SE de Cuchillo-Có solo aparecen rodales de bosque de caldén en depresiones, mientras que en las pendientes domina el jarillal o arbustos mixtos. En cercanías a La Adela, el caldén se presenta como individuo aislado en las pendientes y formando bosques en depresiones. El marcado gradiente de precipitaciones de E a O existente en la provincia determina que los ejemplares de caldén del sector oriental tengan menor cantidad de arbustos que los del sector occidental y que el pastizal del área oriental este integrado por mayor número de herbáceas y gramíneas palatables (INTA *et al.* 1980).

En la actualidad en el paisaje pampeano hay una co-existencia de distintos estados de sucesión, provocados por múltiples combinaciones de factores ambientales y antrópicos. Si bien en las primeras décadas del siglo XX la cría de ovejas y la extracción

de madera fueron las causas principales de los cambios en la composición florística y de la estructura del Caldenal, en los últimos años el sobrepastoreo de vacunos, las quemas e incendios y el desmonte para implantar cultivos representan los principales factores de disturbio (Roberto *et al.* 2005).

Teniendo en cuenta la dinámica constante de los recursos naturales, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) proporcionan una herramienta adecuada para su estudio (Bosque Sendra 1997), ya que permiten manejar una amplia variedad de datos georeferenciados, provenientes de distintas fuentes (imágenes satelitales, censos y encuestas, datos de relevamientos y muestreo de campo, etc). Por su parte, las imágenes satelitales proporcionan información relacionada con el uso de la tierra y la distribución espacial de unidades homogéneas de suelo y vegetación (Chuvieco 1996). En tal sentido, permiten clasificar ambientes según los tipos fisonómicos de la vegetación. En el presente trabajo se entiende por «fisonomía» a la apariencia externa de la vegetación incluyendo términos como bosque, arbustal, pastizal, sabana o desierto (Ellenberg y Mueller-Dombois 1967).

Planteada la necesidad de elaborar un mapa actualizado, el objetivo del presente trabajo fue determinar mediante la utilización de un SIG, los diferentes tipos fisonómicos de vegetación y su distribución geográfica en La Pampa. Aprovechando la capa de información generada y la información previa existente, también se realizó de manera general, una evaluación comparativa de los principales tipos fisonómicos de la provincia a través del tiempo. Esto permitirá realizar un diagnóstico de la situación y proponer luego, pautas de manejo tendientes a revertir la misma en aquellos casos donde resulte posible.

MATERIALES Y METODOS

El área de estudio comprende una amplia superficie de la provincia de La Pampa, exceptuando aquellas zonas comprendidas dentro de las siguientes situaciones: zona de cultivos, cuerpos de agua y la zona urbana. En total abarca una superficie aproximada de 10.288.509 has.

En un primer paso, se construyó un mosaico satelital a partir de 12 imágenes procedentes del Landsat 8 OLI/TIRS, correspondientes a los siguientes path/row: 1) 227/87, 2) 228/85, 3) 228/86, 4)

228/87, 5) 229/84, 6) 229/85, 7) 229/86, 8) 229/87, 9) 230/85, 10) 230/86, 11) 230/87 y 12) 231/85. Todas las imágenes correspondieron al mismo mes (marzo de 2017) y fueron descargadas gratuitamente desde el sitio <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

El segundo paso fue la realización de una clasificación no supervisada de los tipos fisonómicos de vegetación utilizando el software gvSIG 1.12, donde cada tipo fisonómico quedó indicado con una tonalidad diferente.

Ante la imposibilidad metodológica de chequear a campo el área completa de estudio, en un tercer paso se procedió a verificar mediante las imágenes de alta resolución de SAS Planet. Este chequeo permitió agrupar o disolver clases y eliminar polígonos demasiado pequeños, y reclasificar de manera más ajustada. Se evaluó, siempre dentro de las posibilidades de la resolución de las imágenes de SAS Planet (aproximadamente 1:20.000), la cobertura vegetal de los estratos arbóreo, arbustivo y graminoso, siguiendo la metodología propuesta por el trabajo previo de Roberto *et al.* (2005), que se detalla a continuación:

Cerrado: cobertura de 75 a 100%

Denso: cobertura de 40 a 75%

Abierto: cobertura de 10 a 40%

Disperso: cobertura de 0 a 10%

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mapa actualizado de fisonomía vegetal

Siguiendo la metodología explicada en el punto anterior, quedaron constituidas 13 clases de fisonomía vegetal que se detallan más abajo. En la Tabla 1 se presentan las superficies de cada clase y el porcentaje que representa respecto al área total de estudio.

Clase 1: Bosque denso cerrado con arbustal denso cerrado

Tanto el estrato arbóreo como el arbustivo presentan una cobertura que varía entre el 75-100%, pero el primero de ellos es dominante, existiendo ejemplares de alto porte. El estrato graminoso es variado y no puede ser observado con claridad desde las imágenes satelitales por la densa cobertura que presentan los dos estratos anteriores.

Clase 2: Bosque denso abierto con arbustal denso

En este caso, tanto el estrato arbóreo como el arbustivo, presentan una cobertura que oscila entre el 40-75%, con una distribución aleatoria entre ambas coberturas, siendo sin embargo el arbóreo muchas veces dominante sobre el arbustivo, presentando ejemplares de buen porte. La cobertura del estrato graminoso es muy variado pasando de 10 al 100%.

Clase 3: Bosque abierto con arbustal denso a abierto

En este tipo fisonómico el estrato arbóreo presenta una cobertura que varía entre 10-40%. Por su parte el estrato arbustivo presenta una cobertura que puede ir según el caso, de 10-40% al 40-75%, donde la altura de los ejemplares es más baja que las clases precedentes. El estrato graminoso presenta una cobertura variable dependiendo de la condición del bosque.

Clase 4: Renoval

Hace referencia a un bosque joven (con una cobertura de 10 a 40%), normalmente de tipo secundario, cuyos ejemplares son relativamente coetáneos (de edad similar), como producto de diversas alteraciones. Estas pueden ser de origen natural (tormentas, incendios) o antrópico (quemas, desmonte). Las especies colonizadoras de árboles pueden dominar rápidamente el lugar y constituir estas formaciones boscosas en relativamente breves períodos, razón por la cual las edades de los árboles que conforman estos renovaless están dentro de un rango similar, en contraste con bosques originales, cuyos árboles que los conforman presentan diversos y amplios rangos de edades.

Clase 5: Arbustal-renoval denso a cerrado

Existe un estrato dominante de arbustos o renovaless con una cobertura que oscila entre 40-75% o 75-100%, de porte medio con ausencia de estrato arbóreo.

Clase 6: Arbustal abierto a denso

Existe un estrato dominante de arbustos con una cobertura que oscila entre 10-40% a 40-75%, con ejemplares de altura media a baja. Ausencia de estrato arbóreo.

Clase 7: Arbustal-renoval abierto a denso con árboles grandes

Existe un estrato dominante de arbustos o renovales con una cobertura que oscila entre 40-75% a 75-100%. A diferencia de las clases anteriores, aquí sí se presentan ejemplares de árboles de considerable altura.

Clase 8: Vegetación compleja halófila

Ocupa las áreas bajas del área de las coladas lávicas, alrededor de los grandes salitrales del SO de La Pampa y a ambos lados del plano aluvial del sistema Atuel-Salado.

Clase 9: Pastizal con árboles y arbustos

Si bien el estrato dominante es el graminoso, existe un estrato arbóreo y arbustivo de coberturas y alturas variables (no superando el 20%).

Clase 10: Pastizal sammófilo

Las coberturas del estrato arbóreo y arbustivo son muy bajas o ausentes (asemejándose a un calden parque), presentando en cambio el estrato graminoso una buena cobertura. Preferentemente sobre áreas medianas.

Clase 11: Quemado

La superficie que cubre este tipo fisonómico representa las áreas recientemente quemadas. La misma puede variar sensiblemente de un año a otro, dependiendo de las condiciones climáticas y de las prácticas de manejo.

Clase 12: Arbustal abierto

En este grupo el estrato arbustivo es dominante con una cobertura que oscila entre 10-40 %, con ejemplares de poco porte. Presenta sitios de suelo desnudo alternados con un estrato graminoso de cobertura variable. No existe estrato arbóreo.

Clase 13: Arbustal disperso a muy abierto

También el estrato arbustivo es dominante con una cobertura que oscila entre 0-15%. No existe estrato arbóreo y se observan áreas de suelo desnudo.

La clase más representada en la provincia es el arbustal: en conjunto sus 5 categorías abarcan alrededor del 64,34% (6.620.414 has) de la superficie total. Sin embargo, dentro de esta categoría la que mayor superficie de ocupación tiene es el arbustal-renoval denso a cerrado (fachinal). Le siguen con menor representación el arbustal abierto, el arbustal abierto a denso, el arbustal-renoval abierto a denso con árboles grandes y, el arbustal disperso a muy abierto.

Por su parte las categorías de bosque en su conjunto representan alrededor del 7,89% (811.068 has). La categoría más representada es el bosque abierto con arbustal denso a abierto, seguida por el bosque denso abierto con arbustal denso, y por último el bosque denso cerrado con arbustal denso cerrado. La categoría renoval representa el 10,11% del área total.

Las dos categorías de pastizal representan el 5,92% (608.447 has), mientras que la vegetación halófila el 3,01% y la superficie quemada alrededor

| CLASE | DESCRIPCION | SUPERFICIE | % |
|-------------------------|--|-------------------|---------------|
| 1 | Bosque denso cerrado con arbustal denso cerrado | 17.307 | 0,17 |
| 2 | Bosque denso abierto con arbustal denso | 227.308 | 2,21 |
| 3 | Bosque abierto con arbustal denso a abierto | 566.453 | 5,51 |
| 4 | Renoval | 1.040.298 | 10,11 |
| 5 | Arbustal-renoval denso a cerrado | 2.167.976 | 21,07 |
| 6 | Arbustal abierto a denso | 1.562.202 | 15,18 |
| 7 | Arbustal-renoval abierto a denso con árboles grandes | 514.880 | 5,00 |
| 8 | Vegetación compleja halófila | 309.477 | 3,01 |
| 9 | Pastizal con árboles y arbustos | 406.972 | 3,96 |
| 10 | Pastizal sammófilo | 201.475 | 1,96 |
| 11 | Quemado | 898.805 | 8,74 |
| 12 | Arbustal abierto | 2.026.514 | 19,70 |
| 13 | Arbustal disperso a muy abierto | 348.842 | 3,39 |
| SUPERFICIE TOTAL | | 10.288.509 | 100,00 |

Tabla 1. Clases de fisonomía vegetal utilizadas en el presente trabajo con su superficie (en hectáreas) y el porcentaje respecto al área total evaluada.

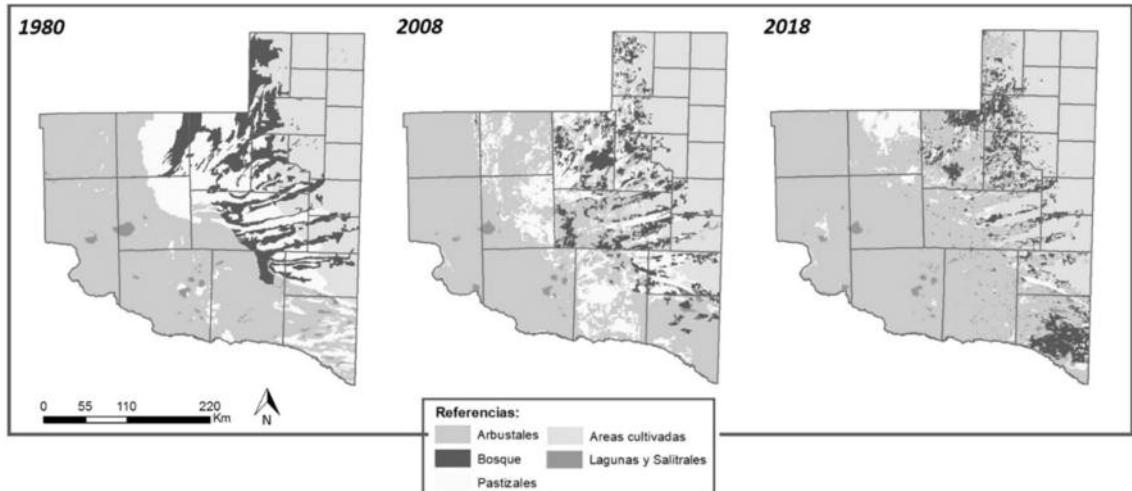


Figura 2. Mapa de fisonomía vegetal para la provincia de La Pampa de las siguientes publicaciones: INTA et al. (1980), Roberto et al. (2008) y la presente publicación. En los mismos se presentan las siguientes clases: arbustal (verde claro), bosque (verde oscuro), pastizal (amarillo), áreas cultivadas (celeste) y, lagunas y salitrales (rosa).

del 8,74%. Hay que tener en cuenta que ésta última varía todos los años, en función de las condiciones climáticas y de manejo imperantes. Particularmente durante los meses estivales de los períodos 2016-2017 y 2017-2018, se quemaron una gran cantidad de hectáreas en la provincia. En un contexto de baja carga animal (producto de la severa sequía ocurrida en el período 2008-2010) y una serie de años extraordinariamente húmedos, se dieron las condiciones ideales para la acumulación de grandes volúmenes de materia seca fina. Esto, sumado a temperaturas por encima de los 32°C con ausencia de lluvias, desencadenó la serie de incendios que afectaron la región. Si tenemos en cuenta que la superficie media histórica afectada por incendios en la provincia es de alrededor de 400.000 has. (Vázquez et al. 2018), los últimos años dicha superficie ha sido por lo menos duplicada.

La Figura 1 muestra el mapa de fisonomía vegetal resultante del presente estudio para la provincia de La Pampa (escala 1:100.000). En tonos de verde se presentan los bosques, los arbustales y renovales en tonalidades que van del verde seco al marrón, la vegetación halófila en tono rosa pálido, los pastizales en naranja-amarillo, el área quemada en negro, y los arbustales restantes en tonos grises. En azul se discriminan los cuerpos de agua más importantes y con tono celeste claro aquella zona que quedó fuera de la clasificación (área cultivada, zona urbana, etc.).

Evaluación de cambios de grandes grupos de vegetación

Como ya se planteó en la introducción, existen otros antecedentes de mapeo de la fisonomía vegetal de la provincia. El mapa del presente trabajo puede ser entonces contrastado con los de INTA et al. (1980) y b) Roberto et al. (2008), para realizar un estudio comparativo a través del tiempo. Sin embargo, hay que tener cierta precaución ya que el mapa del año 1980 es escala 1:500.000, mientras que el mapa del año 2008 y del presente estudio corresponden a escala 1:100.000. Además, debido a que la cantidad y nomenclatura de las clases es distinta según el mapa utilizado, para la comparación sólo se usaron 4 grandes grupos: arbustal, bosque, pastizal y cultivos. En todos los casos, se utilizó siempre el año de publicación del trabajo, más allá de que las fechas de las imágenes utilizadas en cada uno resultan ser en realidad algo anteriores.

En la Figura 2, se muestran los mapas de fisonomía vegetal de 1980, 2008 y 2018. De esta manera se puede visualizar a grandes rasgos, los cambios que han ocurrido en las siguientes clases: bosque, arbustal, pastizal y cultivos. En la Tabla 2 se detalla la superficie (hectáreas) ocupada por cada clase.

La Figura 2 muestra una clara tendencia de degradación de los ecosistemas naturales pampeanos en las casi 4 décadas que trascurrieron desde la realización del mapa del Inventario Integrado de los RRNN, hasta el aquí presentado. Si bien se necesita un estudio de más detalle, se visualiza una situación

| AÑO | ARBUSTAL | BOSQUE | PASTIZAL | CULTIVOS | TOTAL |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1980 | 6.459.253 | 1.792.740 | 2.631.173 | 3.318.007 | 14.201.173 |
| 2008 | 7.134.421 | 1.217.634 | 2.267.419 | 3.586.051 | 14.205.525 |
| 2018 | 8.783.940 | 896.589 | 608.454 | 3.916.542 | 14.205.525 |

Tabla 2. Superficie (en has) ocupada por cada clase según INTA et al. (1980), Roberto et al. (2008) y el presente trabajo (2018).

generalizada de arbustación y una acentuada disminución de los biomas pastizales y bosques. Este proceso de lignificación ya fue alertado por Vázquez *et al.* (2016), quienes identificaron una afectación de alrededor del 38% de la superficie provincial.

El área cultivada por su parte, se ha extendido hasta donde las limitantes edáficas y climáticas se lo permiten. Esto se visualiza sobre todo en el segundo mapa donde a partir de 1980 el régimen pluviométrico más húmedo, favoreció el corrimiento de la frontera agropecuaria hacia el oeste de la provincia (acompañando el corrimiento de las isohietas), empujando al sector ganadero a zonas occidentales más marginales (Viglizzo *et al.* 2010).

El renoval no fue incluido como categoría fisonómica en el inventario Integrado de RRNN del año 1980, pero muchas zonas de pastizales y arbustales hacia el E del río, presentaban ya una cobertura arbórea < 10% incluyendo ejemplares de caldén (*P. caldenia*), algarrobo (*P. flexuosa*) y chañar (*Geoffroea decorticans*). En la última fecha analizada, la superficie ocupada por la categoría renoval se incrementó debido al efecto conjunto de factores climáticos y de manejo.

Analizando los datos de la Tabla 2, existieron cambios en la vegetación en ambos períodos que deben ser profundizados. A pesar de que en ambas situaciones se dio la misma tendencia, es decir, la superficie ocupada por arbustales y por cultivos aumentó, mientras que la de bosques y pastizales disminuyó, la tasa no fue igual en ambos casos, siendo especialmente llamativo lo ocurrido con los arbustales y pastizales.

En el primer período (2008 comparado con 1980), los arbustales aumentaron 675.168 has, mientras que en el segundo (2018 comparado con 2008), el incremento fue de 1.649.519 has. Los pastizales por su parte disminuyeron en el primer período analizado alrededor de 363.754 has, mientras que en el segundo, ese valor fue superado en más de cuatro veces, con una disminución en 1.658.965 has. Aquí es necesario hacer una salvedad: el segundo período tiene una duración mucho más

corta (10 años contra 28 años del primer período), por lo que se puede asumir que la tasa de cambio de la vegetación se fue acelerando, es decir, ocurrieron cambios cada vez más importantes en cuanto a superficie y en una unidad de tiempo mucho menor. Esto se exemplifica cuando los datos expresados en superficie se transforman en tasas de cambio. La tasa de incremento de los arbustales fue de 24.113 has año⁻¹ para el lapso 1980-2008 y, 164.952 has año⁻¹ para el período 2008-2018. Por su parte, la tasa de disminución de los pastizales fue de 12.991 has año⁻¹ para 1980-2008 y 165.897 has año⁻¹ para 2008-2018.

En el caso de los bosques, aunque en hectáreas disminuyeron más en el primer período (575.106 has) que en el segundo (321.045 has), la tasa de disminución fue de 20.540 has año⁻¹ para el lapso 1980-2008 y, 32.105 has año⁻¹ para el período 2008-2018. Para el caso de los cultivos, en el primer período hubo un aumento de la superficie de 268.044 has, y en el segundo aumentaron 330.441 has. La tasa de cambio del primero fue de 9.573 has año⁻¹ mientras que la del segundo fue de 33.049 has año⁻¹.

CONCLUSIONES

En líneas generales se puede concluir que, sin importar cuál sea la clase de fisonomía vegetal analizada, se observa una tendencia de cambio acelerada en el segundo período con respecto al primero. Esto da una idea de un proceso de disminución no sólo en superficie sino también en calidad (degradación) de las áreas naturales de la provincia, que de no tomarse las medidas necesarias para controlar la situación, puede continuar acentuándose en los próximos años generando una serie de impactos ambientales negativos asociados.

Es en este contexto de dinamismo constante del paisaje pampeano, donde los mapas de fisonomía vegetal cobran importancia como herramienta para realizar un diagnóstico de la situación y proponer pautas de manejo tendientes a revertir la misma en aquellos casos donde resulte viable.

BIBLIOGRAFIA

- Bosque Sendra J. (1977). Sistemas de Información Geográfica. Ed. Rialp S.A. 451 pp. Madrid, España.
- Cabrera A.L. (1963). Esquema fitogeográfico de la República Argentina. Rev. Museo de la Plata (Nueva serie) VIII Botánica (3): 87-168.
- Chuvieco E. (1996). Fundamentos de la Teledetección Espacial. Ed. Rialp. S.A. 568 pp. Madrid, España.
- Elleemberg H., Mueller-Dombois D. (1967). Tentative physiognomic-ecological classification of plant formations of the earth. Ber. Geob. Inst. E. Tech. Hochshule S. Rübel. 37: 21-55. Zurich.
- Helmberg H.J. (1898). Segundo Censo de la República Argentina 1:385-474.
- INTA, Provincia de La Pampa, UNLPam (1980). Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Prov. de La Pampa. 1º edición. 493 p. Bs As.
- Kulm, F. (1930). Geografía de la Argentina. Barcelona. Buenos Aires.
- Monticelli J.V. (1938). Anotaciones fito-geográficas de la Pampa Central. Lilloa III: 251-382.
- Parodi L.R. (1945). Las regiones fitogeográficas argentinas y sus relaciones con la industria forestal. En F. Verdoorn, Plants and Plant Science in Latin America. Waltham, Mass. USA pp. 127-132.
- Roberto Z., Adema E. y Butti L. (2008). Fisonomías de vegetación de la provincia de La Pampa. Mapa color. INTA-Gobierno de la Pampa.
- Roberto Z., Adema E. y Rucci T. (2005). Relevamiento fisionómico de la vegetación en el área del cardenal. Publicación Técnica Nº 60. ISSN 0325-2132. Julio 2005. Ediciones INTA.
- Rovereto G. (1914). Studi di Geomorfologia Argentina IV. La Pampa. Roma: Boil. Soc. Geol. Ital. 33: 75-128.
- Vázquez P. (2018). Informe técnico: Incendios en la provincia de La Pampa. Estado de situación. Diciembre 2017-Marzo 2018. EEA INTA Anguil.
- Vázquez P., Adema E., Llorens E., Butti L., Poey S., Stefanazzi I., Babinec F. (2016). Modelado y predicción de la productividad neta de forraje en el árido-semiárido de la provincia de La Pampa. Publicación Técnica Nº 102. Septiembre de 2016. ISSN 0325-2132. Ediciones INTA.
- Viglizzo, E.F., Carreño, L.V., Pereyra, H., Ricard, M.F., Clatt, J., Pincén, D. (2010). “Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico”. En: Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental. Viglizzo, E.F y Jobbágy, E.G. (eds.). Ediciones INTA, 99 pp. ISBN: 978-987-1623-83-9.

**Nivel
Regional:
Caso**

3

Mapas digitales de precipitación para la provincia de La Pampa

RESUMEN

El régimen pluviométrico de una zona está definido por la variación geográfica, temporal y estacional de las precipitaciones pluviales. Su conocimiento es relevante en estudios hidrológicos, en determinación de potencialidades climáticas y productivas, entre otros. Una manera de conocer la distribución espacial de un elemento tan irregular como la lluvia en un área, es a partir de mapas de superficie continua generados con la información registrada por una red de pluviómetros localizados. De esta manera es posible construir cartografía utilizando herramientas tales como sistemas de información geográfica (SIG), métodos estadísticos y técnicas de interpolación espacial. No existen antecedentes para la provincia de información pluviométrica histórica en mapas de superficie continua, que permita aprovechar la importante red pluviométrica que opera actualmente. Este trabajo tuvo como objetivo generar y poner a disposición cartografía digital relacionada con el régimen de precipitaciones de la provincia de La Pampa. Se generaron una serie de 311 mapas digitales en resolución temporal mensual y anual, y resolución espacial de 400 ha, en formatos raster, vectorial y kml. Esto permite que en un entorno SIG libre y gratuito (gvSIG), se consulten promedios históricos, anuales y mensuales, valores máximos y mínimos y, anomalías anuales de precipitación para la provincia. Al ser mapas de superficie continua, también es posible mediante un entorno SIG, consultar los valores de la variable para cada pixel en particular.

Palabras clave: lluvias, cartografía, SIG, promedios históricos, anomalías

INTRODUCCION

Si bien hay numerosas variables climáticas que modulan la producción agropecuaria en los sistemas de clima semiárido, la precipitación es sin duda la más importante de todas (Bernardos *et al.*, 2001). En este contexto, conocer su tendencia y distribución espacio-temporal es de suma relevancia para poder adaptar los sistemas de producción a un futuro climático incierto, típico de regiones semiáridas (Viglizzo 2012), más aún si a este contexto le sumamos la noción de cambio climático, tan instalada en la actualidad.

El régimen pluviométrico de una zona está definido por la variación geográfica, temporal y estacional de las precipitaciones pluviales. Su conocimiento es relevante en estudios hidrológicos, en determinación de potencialidades climáticas y productivas, entre otros. Específicamente, la producción agropecuaria requiere del manejo de un conjunto de sistemas físicos, biológicos y económicos. En este contexto, el conocimiento del ambiente climático permite obtener aumentos progresivos de los niveles de producción agropecuaria y mayor eficiencia en el proceso productivo. La incertidumbre asociada a estos sistemas otorga al conocimiento de variables climáticas una importancia crítica en el proceso de la toma de decisiones (Casagrande *et al.* 2006; Bellini Saibene *et al.* 2011). Una manera de conocer la distribución espacial de un elemento tan irregular como la lluvia en un área, es a partir de mapas de

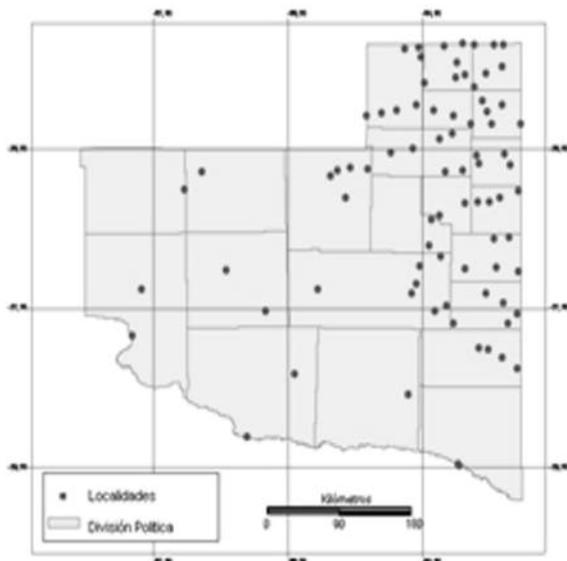


Figura 1. Mapa de localidades de la red pluviométrica de La Pampa.

superficie continua generados con la información registrada por una red de pluviómetros localizados. Es posible construir cartografía utilizando herramientas tales como sistemas de información geográfica (SIG), métodos estadísticos y técnicas de interpolación espacial.

El Atlas Climático de la República Argentina del Servicio Meteorológico Nacional (1960) fue una de las primeras cartografías relacionada con variables meteorológicas. Murphy (2008), presenta una interesante recopilación de información climática (período 1971-2000) y genera una serie de mapas de variables agroclimáticas para la Argentina (escala 1:20.000.000). Por su parte Bianchi (2010), publica un atlas climático digital de la República Argentina en formato raster. En lo que respecta específicamente a las precipitaciones, existen diversos mapas de isohietas de la región pampeana (Galmarini 1961, Hoffmann 1987, Roberto *et al.* 1994, Sierra *et al.* 1994, Minetti *et al.* 1995). A una escala de más detalle, las cartas agroclimáticas de la provincia de La Pampa también presentan mapas de isohietas de distintos períodos analizados (Casagrande *et al.* 2006; Bellini Saibene *et al.* 2011). Sin embargo, no existen antecedentes para la provincia de información pluviométrica histórica en mapas de superficie continua, que permita aprovechar la importante red pluviométrica que opera actualmente. Teniendo en cuenta esto, el presente trabajo tuvo como objetivo generar y poner a disposición cartografía digital

relacionada con el régimen de precipitaciones de la provincia de La Pampa.

MATERIALES Y METODOS

Bases de datos e información

Para la generación de los mapas se utilizaron datos pluviométricos en resolución temporal diaria, correspondientes a 87 localidades de la provincia de La Pampa. Esta información se obtuvo de la red pluviométrica provincial actualmente operada por la policía local y administrada por la Administración Provincial del Agua (APA).

Con esta información, se construyeron bases de datos en formato dBase de: precipitación mensual y anual (periodo 2000-2014); promedios mensuales y anuales históricos de 30 años (periodo 1984-2014), 10 años (periodo 2005-2014) y 5 años (periodo 2010-2014) y, de valores máximos y mínimos históricos de 30 años (periodo 1984-2014). Las bases de datos fueron linkeadas con un shapefile de las localidades (Figura 1). La distribución espacial de la red pluviométrica provincial permite observar la disparidad de registros en la parte centro y occidental con respecto al este del territorio.

Interpolación y cálculos

En un paso posterior, mediante interpolación se generaron mapas de precipitación, para lo cual se utilizó el algoritmo IDW (inverso a la distancia) realizado con módulo sextante-rasterización/interpolación. Este método se utiliza cuando la variable que se pondera depende de la ubicación, es decir, se presupone que la variable que se representa cartográficamente (precipitación) disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra (pluviómetro).

Una vez generadas las interpolaciones, sobre mapas de precipitación anual y de promedios históricos se construyeron isohietas a una equidistancia de 100 mm. Luego se calcularon anomalías interanuales mediante la siguiente fórmula:

$$Pi (\%) = \left[\frac{Pi - \bar{Pi}}{\bar{Pi}} \right] \cdot 100$$

En donde:

$APi (\%)$ = Anomalía pluviométrica del año i en porcentaje

Pi = Precipitación del año i

Pt = Precipitación media del periodo de 30 años (1984-2014)

Para todo el procesamiento se utilizó software libre y gratuito de sistema de información geográfica, gvSIG versión 2.1 (año 2015). Se construyeron vistas mensuales, anuales, promedios históricos y de anomalías de precipitación. Si bien lo novedoso del trabajo es la generación de mapas, también se realizaron algunos análisis básicos de estadística descriptiva de los datos (medidas de resumen y gráficos box-splot), para lo cual se utilizó el software libre y gratuito Infostat (di Rienzo *et al.* 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mapas

Quedaron constituidos un total de 311 mapas digitales en resolución temporal mensual y anual, y resolución espacial de 400 ha, en formatos raster, vectorial (Figura 2) y kml (Figura 3).

A modo de ejemplo, se presentan algunos de los mapas generados. En la Figura 4 se muestra el mapa de promedios históricos mensuales de precipitación (periodo 1984-2014), para los meses de verano (diciembre, enero y febrero) y otoño (marzo, abril y mayo) y su respectivo acumulado trimestral. Por su parte en la Figura 5 se muestra el mismo mapa para igual período, pero para los meses de invierno (junio, julio y agosto) y primavera (septiembre, octu-

bre y noviembre). Si observamos los valores acumulados en cada trimestre, se observa que para los meses invernales los valores son mucho menores que para los restantes trimestres. Sin embargo, además de las tonalidades del mapa hay que evaluar la distribución de las isohietas para diferenciar los distintos períodos y los mapas de los meses individuales. En el período estival, los 3 meses tienen mapas similares. Por su parte, para el período siguiente, el mes más lluvioso es hacia finales del verano y luego disminuyen los valores en el otoño. Los meses invernales tienen precipitaciones escasas y, por último hacia la primavera los registros pluviométricos se incrementan (especialmente en los meses de octubre y noviembre).

En la Figura 6 se muestran los mapas resultantes para los promedios históricos de precipitación para un período de 5 (2009-2014), 10 (2005-2014) y 30 años (1984-2014). Si analizamos la tonalidad de los mapas, vemos que el de los 30 años resulta el de mayores precipitaciones en la provincia, con isohietas que van desde los 900 mm en la parte oriental, a 300 mm hacia la parte occidental. Los otros dos mapas restantes son similares aunque el de menor escala representa en promedio, una situación un poco más árida, sobre todo en el oeste de la provincia (tonalidades más blancas).

Por su parte en la Figura 7 se presenta el mapa de precipitación promedio histórica (1984-2014), como ejemplo el mapa de precipitaciones del año

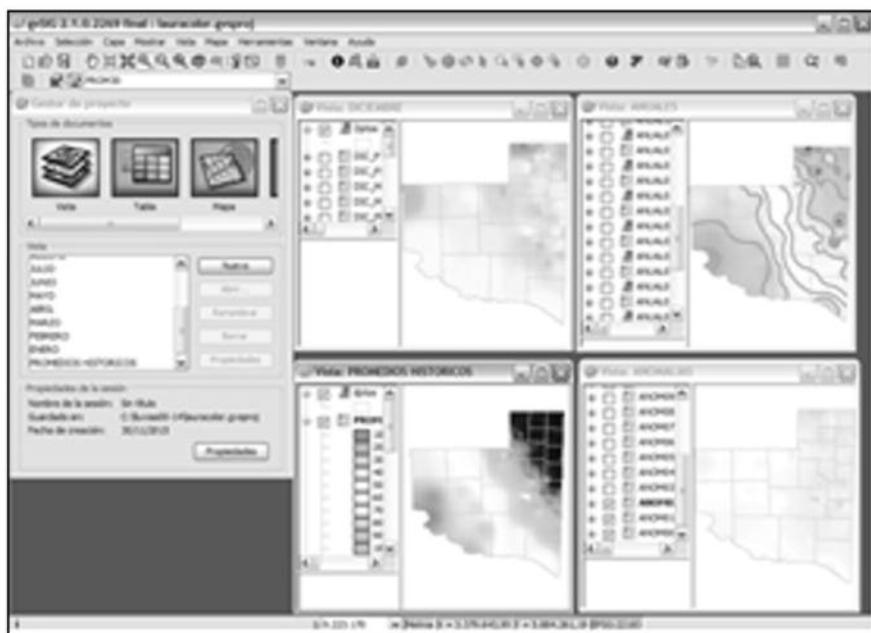


Figura 2. Vista del proyecto de gvSIG mostrando mapas de precipitación mensual (diciembre en este caso), anual (con sus respectivas isohietas), promedio histórico y anomalías de la provincia de La Pampa.

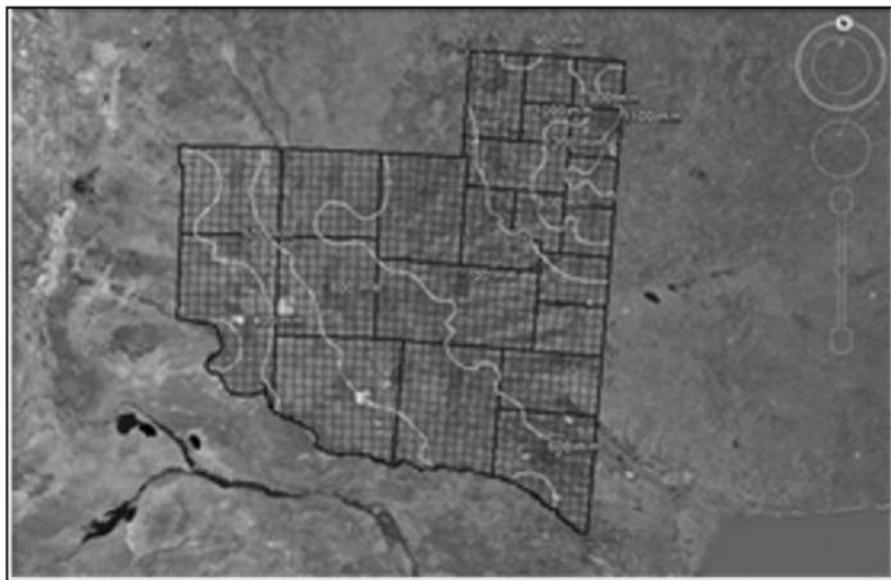


Figura 3. Un ejemplo de isohyetas para un año particular en formato Kml visualizado en Google Earth.

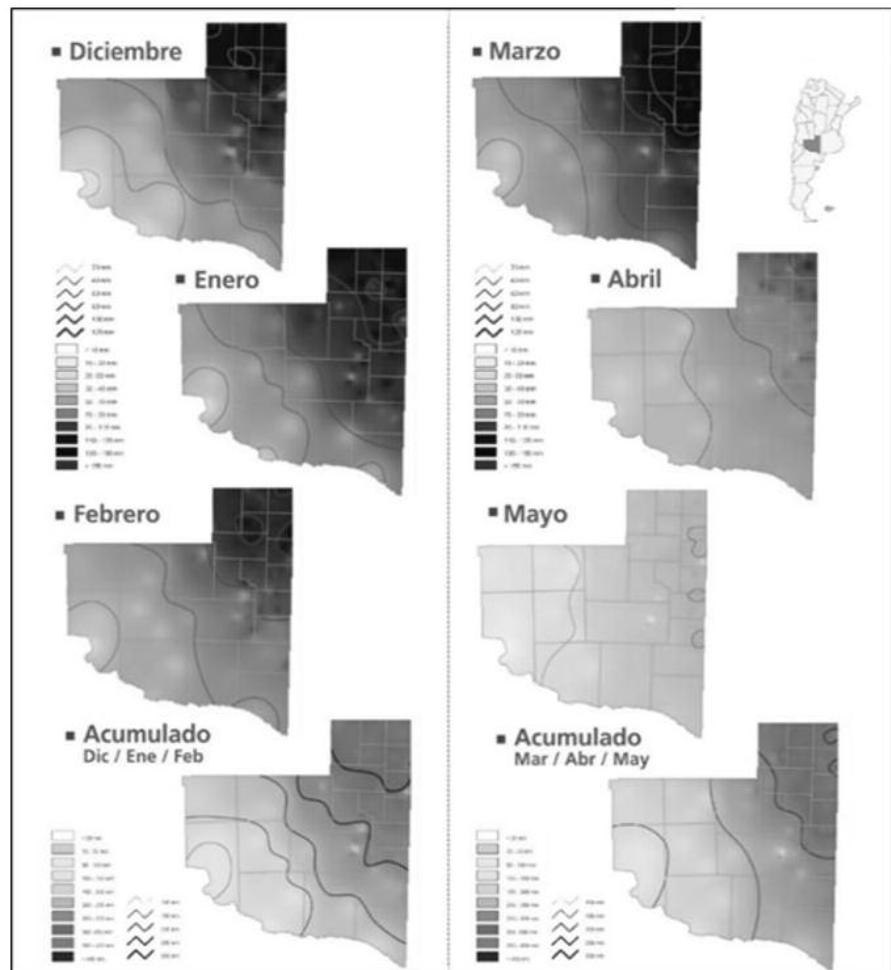


Figura 4. Promedios históricos mensuales de precipitación (período 1984-2014), con su respectivo acumulado para la temporada verano y otoño.

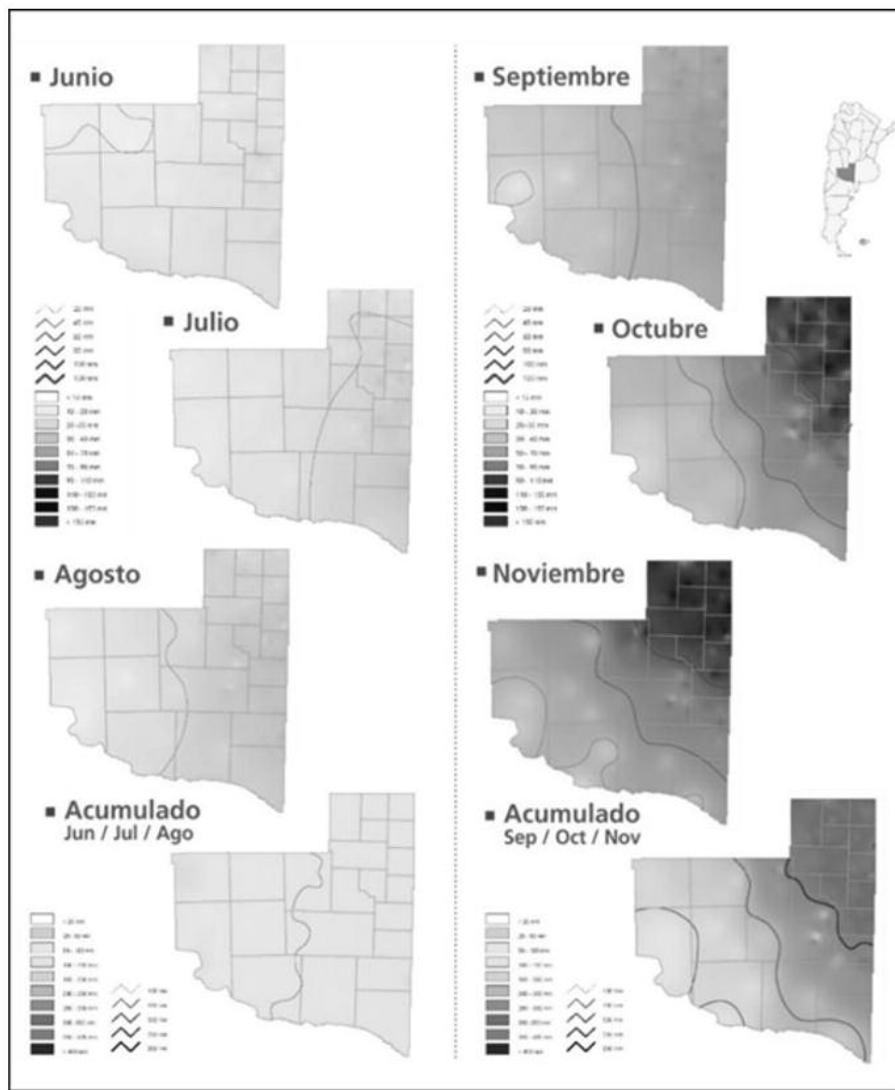


Figura 5. Promedios históricos mensuales de precipitación (periodo 1984-2014), con su respectivo acumulado para la temporada invierno y primavera.

2014 y su respectiva anomalía (en porcentaje) con respecto a la media del período estudiado, y también las mínimas y máximas de los 3 períodos (5, 10 y 30 años). En el mapa de anomalías, en tonalidades rojas, naranjas y amarillas se presentan las anomalías negativas, es decir, aquellas precipitaciones que están por debajo del promedio del período. En tonalidades blancas se presentan anomalías un poco más neutrales (-20% a +20%) y, por último, en tonalidades verdes se presentan aquellas anomalías que superan los valores de la precipitación promedio histórica del período de estudio. Es decir, para el año 2014 la parte central y occidental de la provincia tuvo valores entre un 20-100% por debajo de la media histórica, mientras que algunos sectores de la parte oriental (sobre todo la parte sudeste), presentó valores entre un 20-60% superiores. Con respec-

to a las mínimas y máximas, observamos una distribución que va desde los mayores valores en el este, a valores bastante menores hacia el oeste. Se observa nuevamente, que si se analizan los 30 años en conjunto, el mapa resultante es mucho más “húmedo” que los restantes períodos con menos años.

Análisis estadístico

Para acompañar los datos de los distintos mapas presentados, se realizó un análisis estadístico descriptivo de dos períodos: 30 años (1984-2014) y 15 años (2000-2014).

Período de 30 años

La Figura 8 muestra en detalle el mapa de precipitaciones medias para el período de 30 años (1984-2014) con sus respectivas isohetas. Vemos que las

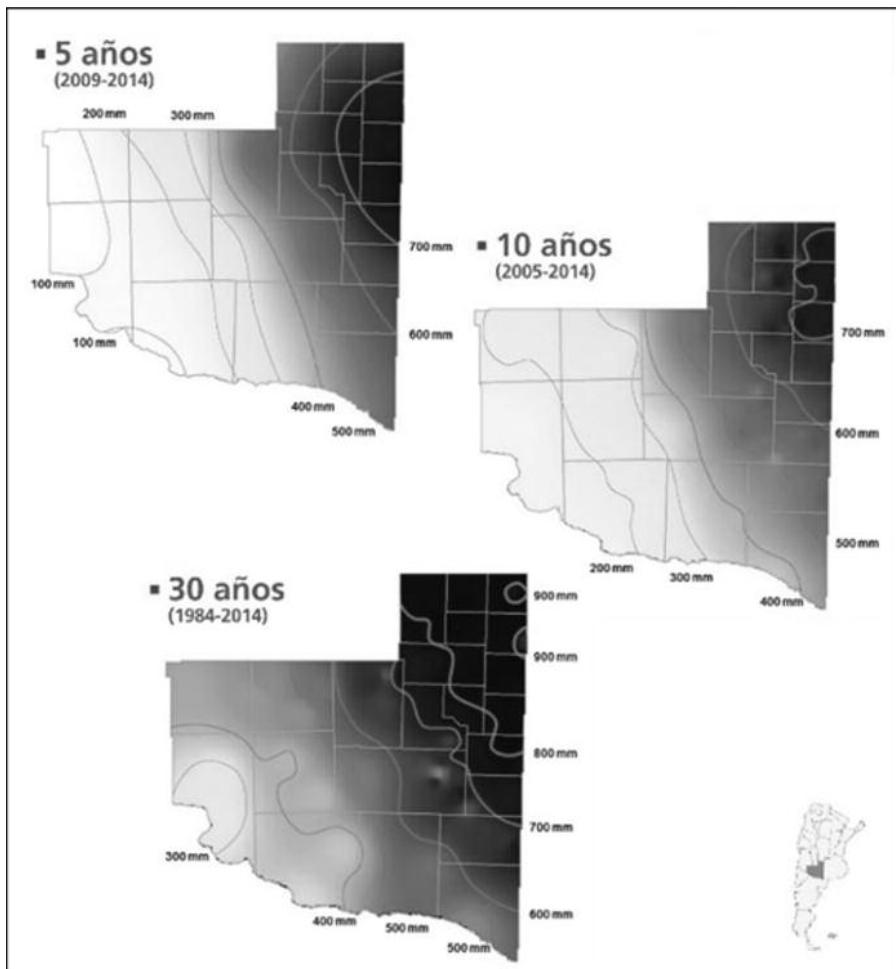


Figura 6. Promedios históricos de precipitación de los últimos 5 (2009-2014), 10 (2005-2014) y 30 (1984-2014) años con sus respectivas isohyetas.

mayores precipitaciones anuales promedio para el período analizado se concentran en la parte oriental de la provincia (700 a 900 mm), mientras que los valores van decreciendo hacia el centro (500 a 600 mm) y oeste (300 a 400 mm).

En la Figura 9 se presenta el diagrama de caja (box splot) generado con todas las localidades analizadas de la provincia para todo el período y, en la Tabla 1 se muestran los resultados del análisis estadístico descriptivo. La media aritmética para todo el período es de 725 mm (la mediana es algo superior), con una desviación estándar de 169 mm. El valor mínimo del período es de 259 mm y el máximo de 1014 mm. Si observamos cada mes en particular, vemos que en promedio, el más húmedo corresponde a marzo con casi 100 mm (y valor máximo de 146 mm), mientras que el mes más seco es junio con 15 mm. En el diagrama de cajas se representa de abajo hacia arriba: el cuantil 0.05 (extremo del bigote inferior), cuantil 0.25 (borde inferior de la caja), mediana (línea que divide la caja en dos), media (punto

dentro de la caja), cuantil 0.75 (extremo superior de la caja) y cuantil 0.95 (extremo del bigote superior). Es decir, en la caja queda contenido el 50% de los datos. Los puntos fuera de la caja indican valores extremos (± 1.5 DE, punto lleno) y muy extremos (± 3 DE, punto vacío). Además hay que observar la forma de la caja y bigotes: mientras más larga la caja y los bigotes, más dispersos son los datos. Si la mediana está en el centro de la caja los datos son simétricos.

Se observa que para el período existieron varios valores extremos con precipitaciones mínimas. Los datos son bastante dispersos y no simétricos. Por otro lado, la mediana no coincide con la media aritmética.

Período de 15 años

Si se analizan los datos pluviométricos del período 2000-2014 (15 años), se observa que la máxima precipitación anual corresponde al año 2001 con 2198 mm para la localidad de Miguel Riglos. Sin

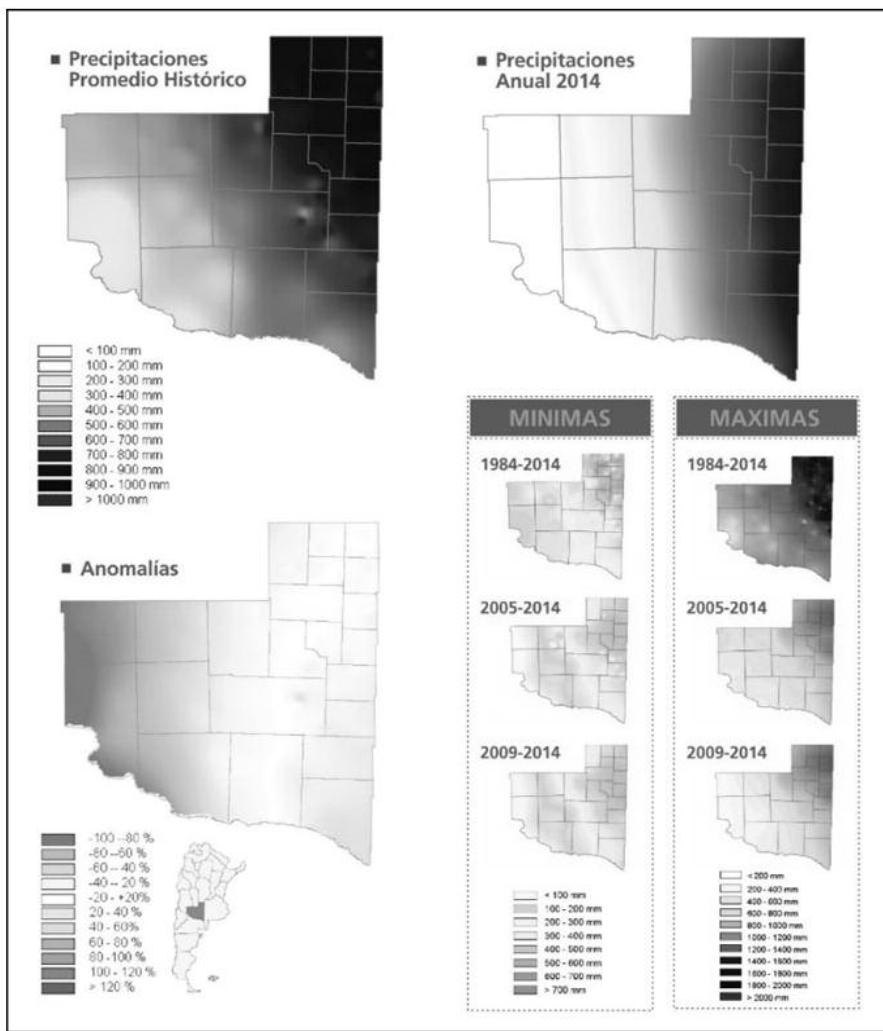


Figura 7. Precipitación promedio histórico (1984-2014), precipitaciones anuales (año 2014), anomalías del año 2014 y, mínimas y máximas de los últimos 5 (2009-2014), 10 (2005-2014) y 30 (1984-2014) años.

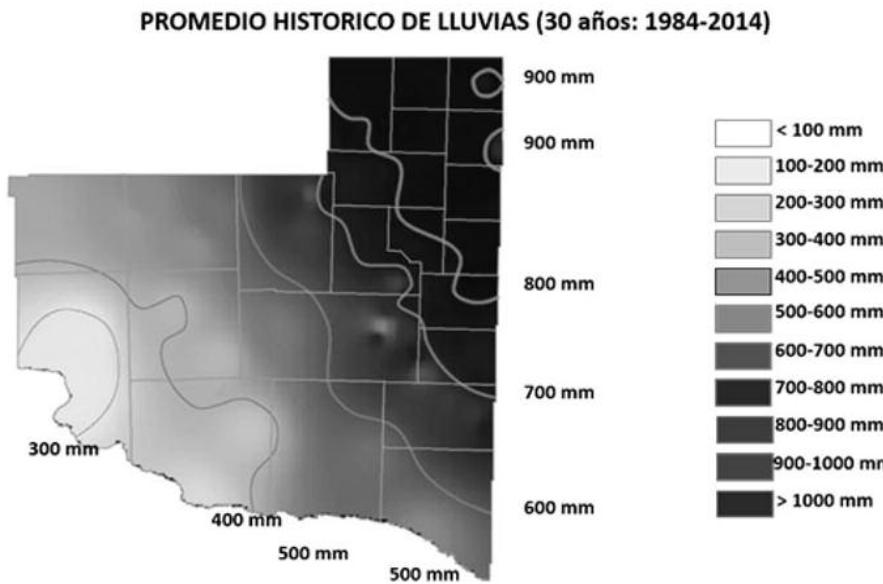


Figura 8. Precipitaciones medias históricas (1984-2014) con sus respectivas isohyetas.

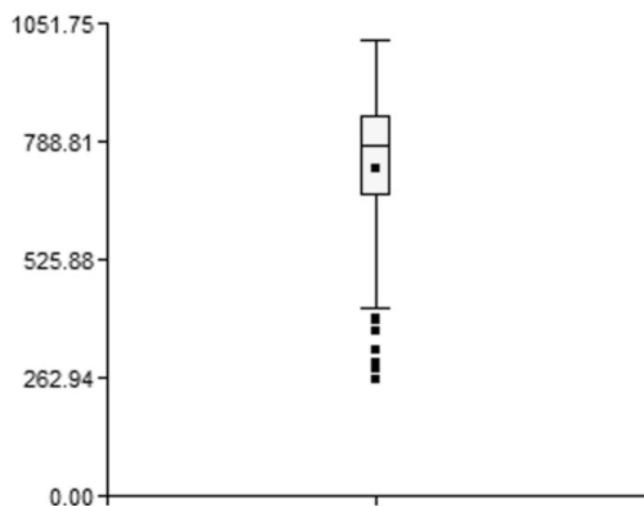


Figura 9. Box splot para el período de 30 años (1984-2014).

| MESES | MEDIA | DE | MIN | MAX | MEDIANA |
|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| ENE | 90,1 | 24,4 | 0,0 | 128,0 | 97,0 |
| FEB | 80,0 | 22,6 | 0,0 | 116,0 | 85,0 |
| MAR | 99,8 | 30,3 | 0,0 | 146,0 | 102,0 |
| ABR | 62,5 | 18,0 | 0,0 | 98,0 | 66,0 |
| MAY | 32,1 | 9,1 | 0,0 | 47,0 | 32,0 |
| JUN | 14,6 | 3,4 | 0,0 | 25,0 | 15,0 |
| JUL | 19,5 | 5,3 | 0,0 | 33,0 | 20,0 |
| AGO | 24,0 | 6,5 | 0,0 | 36,0 | 24,0 |
| SEP | 44,8 | 11,0 | 0,0 | 62,0 | 47,0 |
| OCT | 73,3 | 21,6 | 0,0 | 106,0 | 78,0 |
| NOV | 76,2 | 22,9 | 0,0 | 114,0 | 83,0 |
| DIC | 88,8 | 28,4 | 0,0 | 139,0 | 95,0 |
| ANUAL | 725,3 | 168,8 | 259,0 | 1.014,0 | 778,0 |

Tabla 1. Resultados del análisis estadístico descriptivo del período de 30 años (1984-2014): media aritmética, DE (desviación estándar), mínimos, máximos, mediana.

| AÑO | MEDIA | DE | MIN | MAX | MEDIANA |
|------|---------|--------|--------|---------|---------|
| 2000 | 804.62 | 186.49 | 328.00 | 1382.00 | 816.00 |
| 2001 | 1094.93 | 297.65 | 322.00 | 2198.00 | 1127.00 |
| 2002 | 767.73 | 246.22 | 170.00 | 1211.00 | 822.50 |
| 2003 | 451.72 | 168.47 | 21.00 | 965.00 | 468.00 |
| 2004 | 914.84 | 197.33 | 411.00 | 1334.00 | 918.00 |
| 2005 | 485.21 | 160.58 | 16.00 | 817.00 | 493.50 |
| 2006 | 583.36 | 209.77 | 94.00 | 1203.00 | 583.50 |
| 2007 | 684.64 | 214.68 | 151.00 | 1168.00 | 695.00 |
| 2008 | 543.81 | 167.92 | 143.00 | 919.00 | 597.00 |
| 2009 | 429.84 | 161.82 | 69.00 | 734.00 | 429.00 |
| 2010 | 660.15 | 324.31 | 45.00 | 1664.00 | 656.00 |
| 2011 | 530.79 | 220.50 | 10.00 | 983.00 | 573.00 |
| 2012 | 827.57 | 353.07 | 42.00 | 1512.00 | 879.00 |
| 2013 | 354.78 | 143.85 | 12.00 | 636.00 | 386.00 |
| 2014 | 584.93 | 268.00 | 22.00 | 1073.00 | 647.00 |

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico descriptivo del período de 15 años (2000-2014): media aritmética, DE (desviación estándar), mínimos, máximos, mediana.

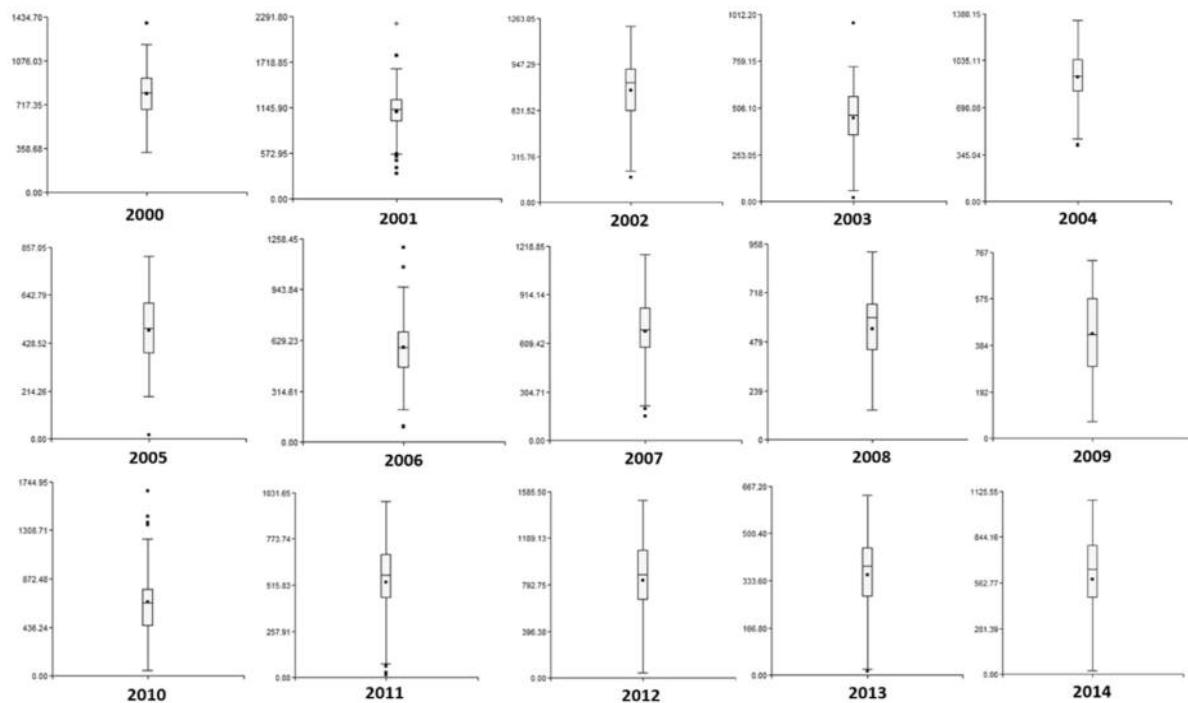


Figura 10. Box splot para cada año del período de 15 años (2000-2014).

embargo, hubo otros años donde la precipitación también superó los 1500 mm anuales: 1664 mm (año 2010, Anguil) y 1512 mm (año 2012, Agustoni). Por su parte la precipitación máxima mensual del período fue de 734 mm (marzo 2010, Anguil). Otras lluvias superiores a los 400 mm mensuales ocurrieron en: 591 mm (marzo 2001, Miguel Riglos), 491 mm (noviembre 2012, General Acha) y 408 mm (marzo 2007, Realicó). Por su parte, la precipitación mínima mensual del período fue de 10 mm (año 2011, La Humada). Otros valores mensuales menores a 50 mm fueron: 12 mm (año 2013, Puelén), 21 mm (año 2003, 25 de Mayo), 22 mm (año 2014, Algarrobo del Aguila y Gobernador Duval), 42 mm (año 2012, Puelén) y 45 mm (año 2010, Gobernador Duval). El máximo promedio anual de todo el período fue de 1094.93 mm (año 2001), mientras que el valor mínimo promedio fue de 354.78 mm para el año 2013.

En la Tabla 2 se presentan las medidas de resumen (media, DE, mín, máx y mediana) de cada uno de los años del período 2000-2014. Por su parte, la Figura 10 presenta un diagrama de cajas para cada año en particular. En muchos años existieron valores extremos (tanto mínimos como máximos), las excepciones fueron los años 2008, 2009, 2012 y 2014. Sólo el año 2001 presentó un valor superior muy extremo (2198 mm). Por otro lado, existieron años

con valores menos dispersos (por ejemplo, 2001, 2004, etc) y otros años cuyos valores presentan una gran dispersión (por ejemplo, 2011, 2012, 2013 y 2014). Hay años donde prácticamente coinciden media aritmética y mediana (2000, 2004, 2009, etc).

CONCLUSIONES

Se creó información climática en formato de mapas digitales a partir de la precipitación registrada en puntos localizados de una red pluviométrica terrestre de la provincia de La Pampa en una serie de 30 años. Una característica importante de los mapas de superficie continua, es que permiten en entorno SIG, el manejo digital de la información y también consultar los valores de la variable para cada pixel. La presentación de esta información en formatos y entornos de acceso público estará a disposición para ser utilizada y/o analizada mediante sistemas de información geográfica y otros servidores como, por ejemplo, Google Earth.

BIBLIOGRAFIA

- APA - Administración provincial del agua. Gobierno de La Pampa. <http://www.apa.lapampa.gov.ar/>
- Bianchi, A. (2010). Atlas Climático Digital de la República

Argentina – Base Cartográfica (Raster). Ediciones INTA. ISBN 978-987-679-014-7. Septiembre 2010. Formato DVD.

• Bellini Saibene, Y.; Ramos, L.; Casagrande, G.; Vergara, G. (2011). El uso de AgroTICs para generar las cartas agroclimáticas de la provincia de La Pampa. 3º Congreso Argentino de Agroinformática, CAI 2011.

• Bernardos, J. Viglizzo, E., Jouvet, V., Lértora, F., Pordomingo, A., Cid, F. (2001). The use of EPIC model to study the agroecological change during 93 years of farming transformation in the Argentine Pampas. Agricultural Systems 69, 215–234.

• Casagrande, G.A.; Vergara G.T.; Bellini Saibene, Y. (2006). Cartas agroclimáticas actuales de temperaturas, heladas y lluvia de la provincia de La Pampa (Argentina). Revista Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa. Vol 17 Nº 1/2. ISSN 0326-6184.

• Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. (2008). InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar/>

• Galmarini A.G. (1961). Caracterización climática de la provincia de La Pampa. Operación Carnes (CAFADÉ) Publicación técnica Nº13, 59pp.

• gvSIG - Software de Sistema de Información Geográfica, libre y gratuito. <http://www.gvsig.org/>

• Hoffmann J.A.J., Nuñez S. y Gómez A. (1987). Fluctuaciones de la precipitación en la Argentina, en lo que va del siglo. II Congreso Interamericano de Meteorología. V Congreso Argentino de Meteorología. Anales 12.1.1-12.1.5.

• Minetti J.L.; Vargas W.M. y Poblete A.G. (1995). Régimen de variabilidad de la precipitación anual en dos transectas de Argentina. Revista Geofísica 42: 103-117.

• Murphy, G.M. (2008). Atlas Agroclimático de la Argentina. 1 ed. Universidad de Buenos Aires. 160 pp. ISBN 978-950-29-1066-6.

• Roberto Z.E.; Casagrande G. y Viglizzo E.F. (1994). Lluvias en la Pampa Central. Tendencias y Variaciones del Siglo. Publicación Nº2. INTA, Centro Regional La Pampa-San Luis. 25 pp.

• Servicio Meteorológico Nacional (1960). Atlas climático de la República Argentina. SMN Buenos Aires.

• Sierra E.M., Hurtado R.H. y Spescha L. (1994). Corrimiento de las isoyetas anuales medias decenales en la Región Pampeana 1941-1990. Revista Facultad de Agronomía UBA 14(2):139-144.

• Viglizzo, E.F (2012). El agro, el clima y el agua en La Pampa Semiárida: Revisando paradigmas. En: Jornada "Condiciones para el Desarrollo de Producciones Agrícola-

Ganaderas en el S.O. Bonaerense", 12 de noviembre de 2012, Bahía Blanca, Argentina. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria, ISSN: 0327-8093, p. 251-267.

Modelado y predicción de la productividad neta de forraje en el árido-semiárido de la provincia de La Pampa

RESUMEN

Se desarrolló un modelo para estimar productividad primaria neta aérea de herbáceas forrajeras (PPNA) en el árido-semiárido de La Pampa, Argentina, considerando a la densidad de plantas y la precipitación antecedente como principales componentes de rendimiento. El modelo fue construido a partir de información proveniente de un ensayo llevado a cabo en la localidad de Chacharramendi entre los años 2001 y 2011. La densidad de herbáceas forrajeras al final de la estación de crecimiento fue modelada considerando el índice verde normalizado (IVN), la precipitación acumulada de una y dos estaciones de crecimiento antecedentes como predictores ($R^2=0.98$, RMSE=1.43). La PPNA fue modelada a partir de la precipitación acumulada durante las dos estaciones de crecimiento previas a la evaluada y la densidad de herbáceas modelada al final de ciclo ($R^2=0.84$, RMSE=1048).

Palabras clave: monte - arbustal, precipitación, fuego, carga animal, teledetección

INTRODUCCION

La producción ganadera bajo condiciones de secano requiere de una cuantificación estacional de la oferta forrajera para alcanzar las metas propuestas. La receptividad, derivada del modelo de crecimiento logístico (Begon *et al.* 2006) determina la cantidad máxima de individuos que pueden vivir en un hábitat bajo condiciones estables. Pero este concepto se enfrenta a una situación de disponibilidad

de alimento variable tanto en el espacio como en el tiempo bajo condiciones reales (Golluscio 2009). Se definió como receptividad a “*la densidad óptima de animales que pueden mantenerse en un área determinada para poder alcanzar objetivos de producción específicos, teniendo en cuenta las opciones de manejo disponibles*” (Scarnecchia 1990). Pese a su importancia, no existen aún metodologías universalmente aceptadas y confiables para la determinación de receptividad forrajera (Paruelo *et al.* 2004). Además, los métodos no siempre pueden adaptarse a comunidades distintas a las que fueron diseñados (Golluscio 2009). Aquellos basados en la teledetección son los que cuentan con la mayor capacidad para analizar la heterogeneidad espacial y temporal. Los más utilizados están basados en el modelo de Monteith (1972), donde:

$$\text{PPNA} = \text{RFA}_i * f\text{RFA} * \text{EUR}$$

PPNA: producción primaria neta aérea

EUR: eficiencia del uso de la radiación

RFA_i: radiación fotosintéticamente activa incidente

fRFA: fracción RFA_i absorbida por el canopeo.

La fRFA es derivada a partir del Índice Verde Normalizado (IVN), producto obtenible a partir de los sensores remotos, lo cual permite estimar PPNA a escala global (Gallo *et al.* 1985, Potter *et al.* 1993, Paruelo *et al.* 2000, Piñeiro *et al.* 2006, Grigera *et al.* 2011). Esto es posible ya que el IVN está estrechamente relacionado a los componentes verdes del canopeo (Sellers 1985, Huete *et al.* 2002).

Pickup (1995) modeló exitosamente la biomasa

aérea forrajera (PPNA) en función de la cobertura porcentual de herbáceas (H) a partir del modelo:

$$PPNA = 74 * e^{0.056 * H}$$

Esto destaca la importancia del índice de área foliar (IAF) y de la densidad de plantas para la estimación de PPNA. Si consideramos la ley de -3/2 (Yoda et al 1963, Hutchings 1983, Begon 2006), el peso medio de cada individuo (w) se ve afectado por la densidad (N) hasta un punto crítico según la función:

$$w = c N^{1/2}$$

donde c es una constante. Queda en evidencia que el factor peso individual nunca equipará el impacto alcanzable por un aumento en la densidad de plantas al momento de definir producción de biomasa. Tomando en consideración esta ley, el número de plantas por metro cuadrado sería el factor de primer orden al momento de definir PPNA.

En áreas extensas con escasa accesibilidad es difícil realizar estimaciones de densidad de herbáceas que representen adecuadamente la variabilidad del lugar. Esto conduce a buscar alternativas para modelar densidad en el espacio y en el tiempo.

Por lo tanto, los modelos que incluyan variables que expliquen cambios en la densidad de plantas deberían ser más estables para predecir disponibilidad forrajera.

La tasa de reclutamiento de nuevos individuos en ambientes semiáridos y áridos está fuertemente influenciada por la disponibilidad de agua y la presión de pastoreo (Kemp 1989, O'Connor 1996, Gutiérrez et al 2000, Marone et al. 2000). La sequía puede disminuir o inhibir la tasa de germinación según sea su severidad, eliminar las plántulas recientemente reclutadas, sobre todo si ocurre en primavera-verano y disminuir la producción de nueva simiente para el ciclo posterior. Existe una alta correlación entre los valores hallados de IVN y la precipitación previa en la Gran Llanura central de Estados Unidos (Wang et al. 2003). Los valores quincenales de IVN están asociados a precipitaciones ocurridas durante los dos meses previos. El valor medio de IVN de una estación de crecimiento se correlacionó positivamente con la lluvia acumulada durante la estación de crecimiento más la acumulada durante los 7 meses previos al inicio de la misma (15 meses). Cuando hay lluvias abundantes, una

fuerte presión de pastoreo evita que plántulas recientemente implantadas culminen su ciclo reproductivo, ya sea por herbivoría como por pisoteo (James et al. 2011).

Estos antecedentes permiten plantear como objetivo la elaboración de un modelo predictivo de PPNA de herbáceas en ambientes semiáridos con presencia de leñosas basándose en el modelado de su densidad, la precipitación antecedente y el IVN.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de dónde provino la información pertenece al ecotono entre el Espinal (dominado por la especie *Prosopis caldenia*) y el Monte Occidental (dominado por *Larrea spp.*). Esta región se caracteriza por presentar un régimen hídrico semiárido, con un índice hídrico entre 0.2 y 0.5 (UNEP 1997) y una precipitación media anual de 510 mm (350 – 670 mm), período 1901-2014, con una distribución estivo-otoñal. Ésta fue calculada a partir de datos seriados mensuales del Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) (Rudolf & Schneider 2005) validados para la región (Vázquez et al. 2013). Se utilizaron datos de las parcelas testigo (monte sin rolado) de un ensayo de control de leñosas implementado en la localidad de Chacharramendi (37°22' S, 65°46' W) entre los años 2001 y 2011.

La vegetación del tratamiento testigo representa el estado general de la región Central, caracterizado por un estrato arbustivo (50-60% cobertura) dominado por *Larrea divaricata*, acompañado por *Prosopis alpataco*, *Condalia microphylla* y *Lycium spp.* En el estrato graminoso aparecen *Stipa tenuis* y *Poa lanuginosa* entre las invernales (70-80% de la población de gramíneas), y *Aristida subulata*, *Aristida mendocina*, *Setaria leucopila* y *Sporobolus cryptandrus* entre las estivales (20-30% de la población de gramíneas).

Modelado de la densidad de herbáceas forrajeras y PPNA anual

Si bien el ensayo se desarrolló entre los años 2001-2011, la densidad de herbáceas forrajeras solo fue medida desde el año 2007 hasta el 2011 inclusive (Ádema 2006, Ádema et al. 2011).

Los datos corresponden a lecturas trimestrales en un diseño en bloques al azar (2 bloques) con 10 submuestras por bloque. Los modelos de evolución

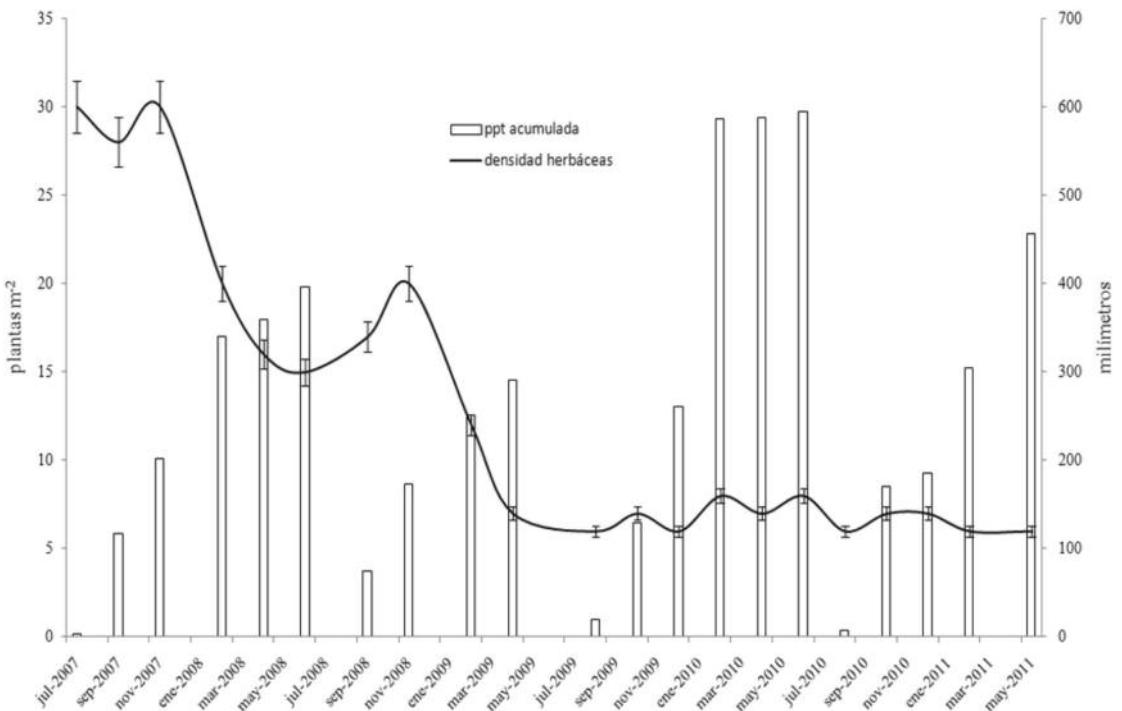


Figura 1: Evolución de la precipitación acumulada por ciclo de crecimiento y la densidad de herbáceas forrajeras en el tratamiento testigo de un ensayo de control de leñosas en la localidad de Chacharramendi (provincia de La Pampa).

de densidad de herbáceas forrajeras y PPNA por ciclo de crecimiento ($julio_t - junio_{t+1}$) fueron construidos considerando la información de las campañas 2007-2011 (entre 5 y 6 cortes por año, 4 años de cortes, $n=21$), donde se contó con información completa. Los modelos de evolución de densidad de herbáceas y PPNA durante el año contemplaron la participación de información pluviométrica anual de campañas anteriores y la evolución del IVN acumulado. Este último parámetro fue extraído de una serie temporal de 115 imágenes del sensor MODIS TERRA, producto MOD13Q1 v05 (Oak Ridge National Laboratory 2011), para el período enero 2007-diciembre 2011. Este producto genera una imagen de valores máximos de IVN cada 16 días (23 imágenes en el año) por el procedimiento Maximun Value Compositing, similar al descrito por Holben (1986) para productos generados a partir del sensor AVHRR, con una resolución espacial de 250 m (píxel de 6.25 ha). Esto disminuye notablemente las áreas con falta de información por presencia de nubes.

Las variables derivadas de precipitación e IVN fueron contrastadas con la densidad de herbáceas y la PPNA mediante el procedimiento GLM (SYSTAT 11, © SYSTAT Software 2008). Para validar el modelo de manera local, se reconstruyó la evolución de la den-

sidad de herbáceas forrajeras para el período 2001-2006, ya que no fue medida en el ensayo original. Luego de obtener la densidad de herbáceas forrajeras al final de cada ciclo de crecimiento, se modeló la PPNA anual para el período 2001-2006. Estos resultados fueron contrastados con las PPNA medidas durante ese mismo período, donde no se contó con la información completa.

RESULTADOS

El período julio 2007-mayo 2011 presentó una importante sequía desde septiembre 2008 hasta marzo 2010, estableciendo una secuencia hidrológica húmedo-seco-húmedo (Figura 1).

La curva evolutiva de densidad de herbáceas forrajeras indicó que el momento de máximo número de individuos en el año fue noviembre; a partir de ese momento, se experimentó una pérdida paulatina de plantas hasta el final de cada ciclo. La sequía presente entre los años 2008 y 2009 favoreció una baja tasa de reclutamiento y muerte de muchas plántulas, de tal modo que no se pudo recomponer la población original, incluso después de dos años posteriores con buena disponibilidad hídrica (Figura 1). La evolución de la PPNA acumulada medida por

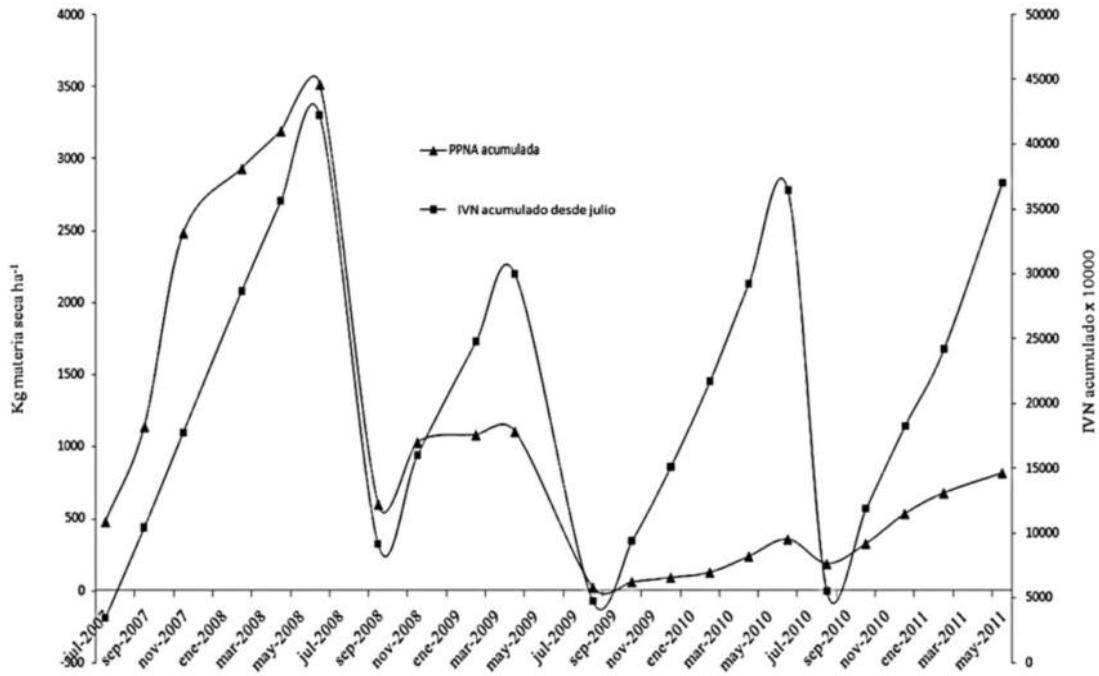


Figura 2: Evolución de la PPNA y el IVN acumulados durante el ciclo de crecimiento en el tratamiento testigo de un ensayo de control de leñosas en la localidad de Chacharramendi (provincia de La Pampa).

Tabla 1: Modelo para estimar densidad de herbáceas forrajeras al final del ciclo de crecimiento (δ) y productividad primaria neta aérea anual de herbáceas forrajeras (PPNA) en función del índice verde normalizado (IVN) acumulado durante toda la estación de crecimiento (β_1), precipitación acumulada durante el ciclo de crecimiento anterior (β_2), precipitación acumulada durante los dos ciclos de crecimiento anteriores (β_3) y la densidad modelada de herbáceas forrajeras al inicio del ciclo de crecimiento (β_4). * Indica ($P<0,05$); ** Indica ($P<0,01$)

| Modelo | N | R ² | Error | Intercepto | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | p |
|--|----|----------------|-------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|--------|
| δ fin de ciclo f(IVN y lluvia) | 21 | 0.98 | 1.43 | -112.1 (**) | 0.003 (**) | -0.046(**) | 0.033(**) | - | 0.0001 |
| PPNA anual f(δ inicio ciclo y lluvia) | 11 | 0.84 | 1048 | -2420(*) | - | 6.9(*) | - | 42.5(*) | 0.004 |

ciclo de cortes presentó un comportamiento similar a la evolución del número de plantas metro cuadrado (Figuras 1 y 2).

El IVN acumulado presentó una evolución similar a la PPNA solo durante el período julio 2007-noviembre 2008, caracterizado por condiciones constantes (en este caso, una paulatina disminución de la disponibilidad de agua). Cuando esta condición se perdió por un aumento significativo de la precipitación en febrero 2010 (Figura 1), el IVN acumulado se incrementó de manera proporcional a la lluvia caída, mientras que la PPNA acumulada presentó un comportamiento similar al de la densidad de plantas

forrajeras (Figuras 1 y 2).

La densidad de herbáceas forrajeras estuvo asociada a diferentes períodos de lluvias acumuladas antecedentes y al IVN acumulado desde el inicio de la estación de crecimiento (julio) hasta el momento de cada observación, no hallándose relación con lluvias ocurridas durante el ciclo de crecimiento.

La evolución de la densidad de herbáceas forrajeras durante cada estación de crecimiento fue reconstruida considerando la precipitación acumulada durante la estación de crecimiento anterior, la precipitación acumulada durante las dos estaciones de crecimiento anteriores y el IVN acumulado desde

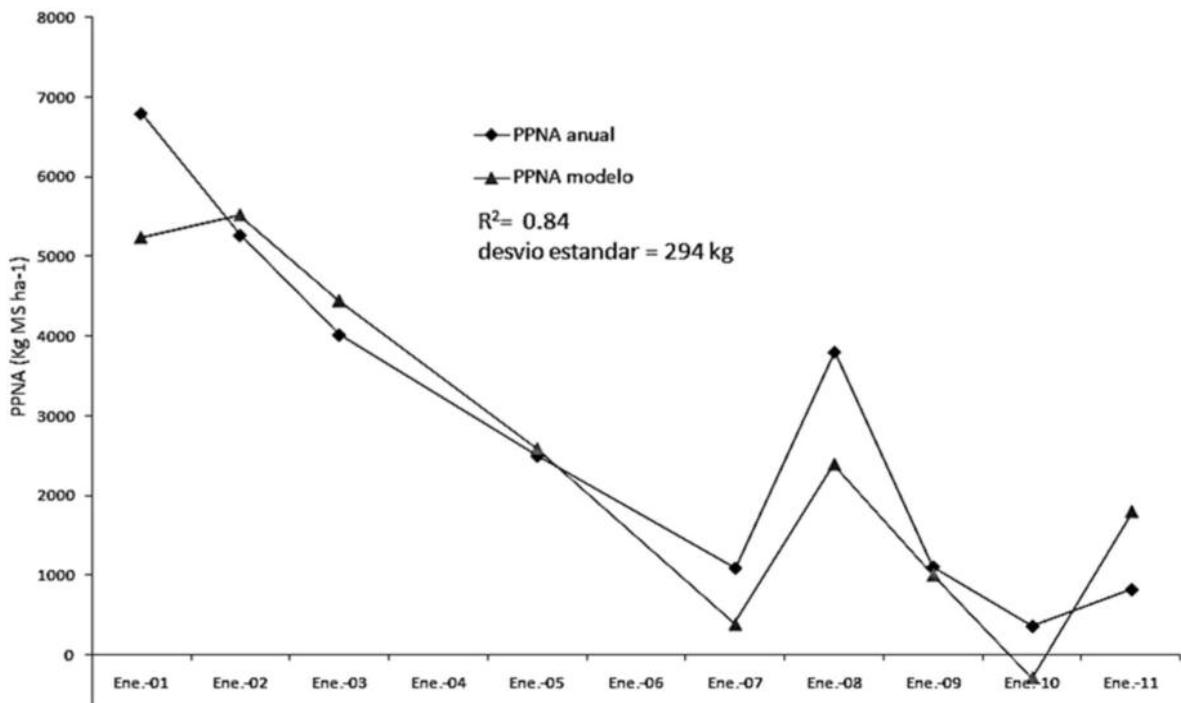


Figura 3: comparación entre datos de PPNA medidos a campo y modelados para el período 2001–2011 en la localidad de Chacharramendi.

el inicio de cada estación de crecimiento (julio) hasta el momento de cada observación, con un ajuste significativo ($R^2=0.98$, $R^2_{adj.}=0.92$, $RMSE=1.43 \text{ pl m}^{-2}$). Si bien existe colinealidad entre las variables de precipitación debido a su construcción, los coeficientes de ambas presentaron significancias muy altas ($p<0.01$). Esto, sumado a un valor de R^2 ajustado elevado son los criterios considerados por los autores para aceptar este resultado.

La evolución de la PPNA acumulada durante cada ciclo de crecimiento fue modelada a partir de la densidad de herbáceas al inicio de la estación de crecimiento actual (es igual a la densidad final observada en el período anterior de crecimiento) y la precipitación acumulada durante la estación de crecimiento anterior ($R^2=0.84$, $RMSE=1048$) (Tabla 1).

Cuando el modelo fue desafiado contra la serie completa de datos (período de cortes 2001–2011), presentó un ajuste muy satisfactorio. El desvío estándar observado durante todo el ciclo promedió 294 kg MS anuales, copiando perfectamente los cambios de pendiente, producto de la alternancia de períodos secos y húmedos (Figura 3).

DISCUSIÓN

El número de plantas por metro cuadrado y las condiciones pluviométricas del ciclo de crecimiento anterior fueron seleccionados como los componentes de rendimiento de los pastizales semiáridos más importantes, relegando a un segundo lugar las condiciones para maximizar la productividad primaria de cada individuo (Pickup 1995, Begon 2006). El efecto del aumento de las precipitaciones hacia el final del período evaluado se vio reflejado claramente en un mayor IVN acumulado. Sin embargo, esto no fue suficiente para incrementar sensiblemente la PPNA, pues el aumento del área foliar o el mayor verdor de las plantas individuales sobrevivientes por mayor disponibilidad de agua y nutrientes no fue suficiente para compensar la baja densidad de plantas. También se debe considerar que gran parte de ese IVN corresponde a la respuesta de las leñosas al mejor estado hídrico. Es por este motivo que los modelos predictivos de productividad primaria basados exclusivamente en IVN presentan una baja performance predictiva, sobre todo cuando hay cambio bruscos entre estaciones de crecimiento.

Los métodos basados en el concepto propuesto por Monteith (1972) están enfocados en las condiciones de crecimiento de la planta individual, sin tener en cuenta la dinámica poblacional.

La relación existente entre la densidad de herbáceas forrajeras y la precipitación ocurrida durante estaciones de crecimiento previas (hasta 24 meses) es consistente con lo observado por Wang *et al.* (2003) en los grandes llanos centrales de Estados Unidos para la evolución quincenal del IVN. Esta relación también fue descrita para savanas africanas, pero solo en áreas semiáridas-áridas (Chamaillé-Jammes & Fritz 2009). La falta de asociación entre PPNA y precipitación acumulada dentro de la estación de crecimiento coincide con bajos coeficientes de correlación ($R \leq 0.3$) hallados en otro estudio realizado en la zona (Frank *et al.* 1994). Según lo previamente mencionado, la evolución del IVN estaría reflejando en este caso las condiciones ambientales actuales para el reclutamiento y supervivencia de propágulos. Los períodos de precipitación acumuladas en los ciclos de crecimiento previos estarían resumiendo las interacciones existentes entre lluvias mensuales antecedentes, simplificando el modelo.

En ambientes semiáridos es muy difícil separar el comportamiento del IVN entre herbáceas y arbustales; más aún, la precipitación y temperatura afectan de manera diferencial a ambos componentes, por lo cual deben ser modelados de manera independiente (Jobbagy & Sala 2000).

BIBLIOGRAFÍA

- ADEMA, E. 2006. Recuperación de pastizales mediante rolado en el Caldenal y en el Monte Occidental. Publicación Técnica Nº 65. INTA (Ed) ISSN 03252132. 52 p.
- ADEMA, E; L BUTTI & F BABINEC. 2011. Efecto de diferentes aplicaciones de rolado sobre la composición botánica del pastizal en el semiárido-árido de La Pampa. En: Memorias de la 2^a Jornada de actualización técnica en manejo y control del renovoal. Serie Informes técnicos EEA Santiago del Estero. Nº 82. INTA (Ed.).Pp. 73-84.
- BEGON, M; C TOWNSEND & J HARPER. 2006. Ecology. From individuals to ecosystems. Blackwell Publishing (Ed). Oxford, U.K. Fourth edition. 714 p.
- CHAMAILLÉ-JAMMES, S & H FRITZ. 2009. Precipitation-NDVI relationships in eastern and southern African savannas vary along a precipitation gradient. International Journal of Remote Sensing. 30: 3409-3422.
- FRANK, E; E LLORENS & D CABRAL. 1994. Productividad de los pastizales de la provincia de La Pampa. INTA, EEA Guillermo Covas (Ed). Anguil. 167 p.
- GALLO, K; C DAUGHTRY & M BAUER. 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. Remote Sensing of Environment. 17: 221-232.
- GOLLUSCIO, R. 2009. Receptividad ganadera: marco teórico y aplicaciones prácticas. Ecología Austral. 19: 215-253.
- GRIGERA G. 2011. Seguimiento de la productividad forrajera mediante teledetección: desarrollo de una herramienta de manejo para sistemas de producción ganaderos. Tesis Doctoral en Ciencias Agropecuarias. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires. 109 p.
- GUTIÉRREZ, J; G ARANCIO & F JAKSIC. 2000. Variation in vegetation and seed bank in a Chilean semi-arid community affected by ENSO. Journal of Vegetation Science. 11: 641-648.
- HOLBEN, B. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing. 7: 1417-1434.
- HUETE, A; K DIDAN; T MIURA, E RODRIGUEZ; X GAO & L FERREIRA. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment. 83: 195-213.
- HUTCHINGS, M. (1983) Ecology's law in search of a theory. New Scientist. 98: 765-767.
- INTA. 1980. Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa: clima, geomorfología, suelo y vegetación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Provincia de La Pampa, Universidad Nacional de La Pampa (Eds). Buenos Aires. Acceso online <http://www.lapampa.edu.ar/recursosnaturales>. 490 p.
- JAMES, J; T SVEJCAR & M RINELLA. 2011. Demographic processes limiting seedling recruitment in arid grassland restoration. Journal of Applied Ecology. 48: 961-969.
- JOBBAGY E & O SALA. 2000. Controls of grass and shrubs aboveground production in the Patagonian steppe. Ecological applications. 10 (2): 541-549.
- KEMP, P. 1989. Seed banks and vegetation processes in deserts. En: Leck, M; V Parker & R Simpson (Eds). Ecology of seed banks. San Diego. Harcourt Brace Jovanovich. 257-281.
- MARONE, L; J LÓPEZ DE CASENAVE & V CUETO. 2000. Granivory in southern South American deserts: conceptual issues and current evidence. BioScience. 50: 123-132.
- MONTEITH, J. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. J. Applied Ecology. 9: 747-766.
- O'CONNOR, T. 1996. Hierarchical control over seedling recruitment of the bunch-grass *Themeda triandra* in semi-arid savanna. Journal of Applied Ecology. 33: 1094-1106
- OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY DISTRIBUTED ACTIVE

- ARCHIVE CENTER (ORNL DAAC). 2011. MODIS subsetted land products, Collection 5. Available on-line daac.ornl.gov/MODIS/modis.html from ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Accesado 03-03-2013.
- PARUELO, J; M OESTERHELD; C DI BELLA; M ARZADUM; J LAFONTAINE; *et al.* 2000. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science*. 3: 189-195.
 - PARUELO, J; R GOLLUSCIO; J GUERSCHMAN; A CESA; V JOUVE; *et al.* 2004. Regional scale relationship between ecosystem structure and functioning: the case of Patagonian steppes. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 13: 385-395.
 - PICKUP, G. 1995. A simple model for predicting herbage production from rainfall in rangelands and its calibration using remotely-sensed data. *Journal of Arid Environments*. 30: 227-245.
 - PIÑEIRO, G; M OESTERHELD& J PARUELO. 2006. Seasonal variation of aboveground production and radiation use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*. 9: 1-9.
 - POTTER, C; J RANDERSON; C FIELD; P MATSON; P VITOUSEK; *et al.* 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Geochemistry Cycles*. 7: 811-841.
 - RUDOLF, B & U SCHNEIDER. 2005. Calculation of Gridded Precipitation Data for the Global Land-Surface using in-situ Gauge Observations, Proceedings of the 2nd Workshop of the International Precipitation Working Group IPWG, Monterey October 2004, EUMETSAT, ISBN 92-9110-070-6, ISSN 1727-432X, 231-247.
 - SCARNECCHIA, D. 1990. Concepts of carrying capacity and substitution ratios: a system viewpoint. *J. Range Management*. 43: 553-555.
 - SELLERS, P. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*. 6: 1335-1372.
 - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). 1997. World Atlas of Desertification. Nick Middleton, David Thomas (eds) UK. ISBN: 0470244194, 9780470244197. Second edition. 182 p.
 - VÁZQUEZ, P; E ÁDEMA& B FERNÁNDEZ. 2013. Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa. *Ecología Austral*. 23:77-86.
 - WANG, J; P RICH & K PRICE. 2003. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*. 24 (11): 2345-2364.
 - YODA, K; T KIRA; H OGAWA & K HOZUMI. (1963) Self thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Biology, Osaka City University*, 14: 107-12

**Nivel
Regional:
Caso**

5

Modelado del proceso de lignificación en la provincia de La Pampa

RESUMEN

Se modeló la presencia de procesos de lignificación en la provincia de La Pampa a partir de series temporales de índice verde normalizado (IVN) provenientes del sensor MODIS Terra y el algoritmo Seasonal Trend Decomposition – LOESS (STL) durante el período 2000-2013. Se relacionó la ocurrencia de estos procesos con la razón entre la estacionalidad y la tendencia acumuladas durante todo el período, y la frecuencia de fuegos observadas durante el mismo período. Las áreas afectadas se caracterizaron por presentar una relación ≤ 0.8 . El 38% de la superficie provincial (5.400.000 millones de hectáreas) fue clasificada en proceso de lignificación con un índice de certeza de 0.81. El 90% de las áreas afectadas por el fuego en estos sitios fueron quemadas entre 1 y 3 veces por fuegos muy fuertes durante el período estudiado. Las áreas no quemadas o con alta frecuencia de fuegos no presentaron procesos de lignificación, coincidiendo con lo observado por varios autores. La carga animal fue otro elemento significativo presente en sitios arbustizado, siendo un 40% más alta que en los sitios sin la presencia de este proceso ($p=0.0001$).

Palabras clave: arbustización, modelo, áreas quemadas, tendencia.

INTRODUCCION

Por definición, un proceso de lignificación se caracteriza por la invasión progresiva de especies leñosas presentes en un ambiente en bajas densidades,

des, siendo muchas veces versiones arbustivas de especies forestales, producto de incendios fuertes o la intervención del hombre (Van Auken 2000). El proceso de lignificación de sitios dominados por pastizales está ocurriendo globalmente debido a procesos naturales y a una variedad de procesos antropogénicos (Knapp *et al.* 2008). Las estructuras de las praderas áridas y semiáridas de Nuevo México cambiaron mucho en los últimos 150 años, sobre todo tras el ingreso de la ganadería (Van Auken 2000).

En la provincia de La Pampa, estudios dendroecológicos demostraron la presencia de dos grandes procesos de lignificación en los últimos 250 años, asociados principalmente a la presencia de ganado bovino (Gaignard 1989; Dussart *et al.* 2011). Un estudio dendroecológico más detallado fue desarrollado sobre dos sitios ocupados por *Prosopis caldenia* (Caldén) (pastizal y savana) en función de la historia de uso durante los últimos 55 años (Dussart *et al.* 1998; Lerner 2004). Se demostró que haber pasado de cría de ganado ovino a bovino a principios de la década de 1940, incrementó la implantación de nuevos individuos de 5 a 31 plantas hectárea⁻¹ año⁻¹ (Dussart *et al.* 1998). Este hecho es en particular importante, pues los grandes rumiantes, al morder las vainas, escarifican la semilla y promueven la implantación de nuevos individuos (Peinetti *et al.* 1993).

La historia pluviométrica y los eventos de fuego, si bien estos últimos se duplicaron en el siglo XX respecto del siglo anterior (Medina *et al.* 2000), no tuvieron impacto en la implantación de nuevos individuos. El fuego no siempre elimina individuos, pero altera la estructura del bosque. Al eliminarse el

brote apical de crecimiento, los renuevos crecen de manera arrosetada desde la base, generando áreas de difícil accesibilidad (Llorens 1995).

Si bien se menciona el proceso de lignificación y se estudiaron las posibles causas en la provincia de La Pampa, éste no ha sido estrictamente cuantificado aún. El análisis de evolución de la cobertura leñosa en la última década, basado en el uso del producto MOD44 (Hansen *et al.* 2010), no validado para esta región, detectó 4000000 de hectáreas con un aumento en su proporción (Vázquez *et al.* 2013). Esto sería compatible con el proceso de lignificación descrito para la provincia de La Pampa.

A partir de la descomposición de series de tiempo de índice verde normalizado (IVN) en los componentes estacionalidad, tendencia y error mediante el algoritmo LOESS (STL) (Cleveland *et al.* 1990), la CSIRO logró diferenciar la cobertura de bosques y herbáceas para toda Australia (Lu *et al.* 2001; Lu 2003). Esto pudo realizarse por un fuerte componente tendencia, muy estable en el año, atribuible a la condición de perennidad de los bosques de Eucaliptus sp. En la provincia de La Pampa, la vegetación presenta un fuerte componente de estacionalidad, debido a las bajas temperaturas y escasas precipitaciones invernales (Vázquez *et al.* 2013). Sin embargo, sería esperable encontrar un componente de tendencia mayor al de estacionalidad en presencia de procesos de lignificación. Esto sería más evidente durante períodos prolongados de déficit hídrico (segunda mitad de la década del 2000), donde las únicas especies esperables de prosperar bajo estas condiciones serían las leñosas.

El objetivo de este trabajo será identificar y cuantificar procesos de lignificación en la provincia de La Pampa a partir del análisis de series temporales de IVN mediante el algoritmo STL, y relacionar estos resultados con el tipo de comunidad y la frecuencia de fuegos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo fue desarrollado sobre toda la extensión de la provincia de La Pampa ($35^{\circ} 1' 13''$ lat S, $63^{\circ} 21' 16''$ long O – $39^{\circ} 23' 28''$ lat S, $68^{\circ} 2' 42''$ long O).

Información satelital utilizada

Para el análisis se utilizó la serie temporal de 322 imágenes del sensor MODIS, producto MOD13Q1

vo5, para el período enero 2000-diciembre 2013. Este producto genera una imagen de valores máximos de IVN cada 16 días por el procedimiento Maximun Value Compositing (Holben 1986), con una resolución espacial de 250 m (píxel de 6.25 ha). Esto disminuye notablemente las áreas con falta de información por presencia de nubes.

Modelo STL

Para poder detectar áreas en proceso de lignificación, bajo la hipótesis de que éste debería presentar un componente de tendencia positivo, se aplicó el algoritmo STL a la serie temporal de imágenes de IVN MOD13Q1 (período enero 2000-diciembre 2013) para descomponer esta señal en sus componentes tendencia (T), estacionalidad (E) y error (Err) (Lu 2003):

$$IVNi = Ti + Ei + Err_i \quad (1)$$

donde $i = 1$ a N denota la línea temporal, siendo N el número total de imágenes utilizado en la serie de tiempo. La tendencia Ti incluye la media, de tal modo que $\langle T_i \rangle = \langle IVNi \rangle$, $\langle E_i \rangle = \langle Err_i \rangle = 0$, donde el símbolo $\langle \rangle$ representa la inclusión del valor medio.

Este procedimiento es computacionalmente eficiente y simple, y permite descomponer las 76000 series de tiempo requeridas para cubrir toda la superficie de la provincia de La Pampa. Además, este método es adecuado para trabajar con información que presente outliers o datos perdidos. En términos generales, la tendencia Ti estaría asociada proporcionalmente al componente leñoso, mientras que la estacionalidad Ei lo estaría al componente herbáceo. Está demostrado que el valor mínimo de IVN no es un buen estimador de la proporción de leñosas debido a la contaminación por nubes (Roderick *et al.* 1999; Lu 2003), por lo cual proponen utilizar la línea base de valores de IVN (B_i) (Figura 1).

Ésta se calcula desplazando Ti por una constante K igual al mínimo valor de $|Ei|$ observado durante dos años consecutivos donde el tiempo i está justo en medio de ellos, siendo

$$Bi = Ti - K \quad (2)$$

Si se asume que la razón entre la tendencia del IVN de leñosas (Twi) y herbáceas (Thi) es igual a la razón entre la línea de base del IVN (B_i) y la amplitud

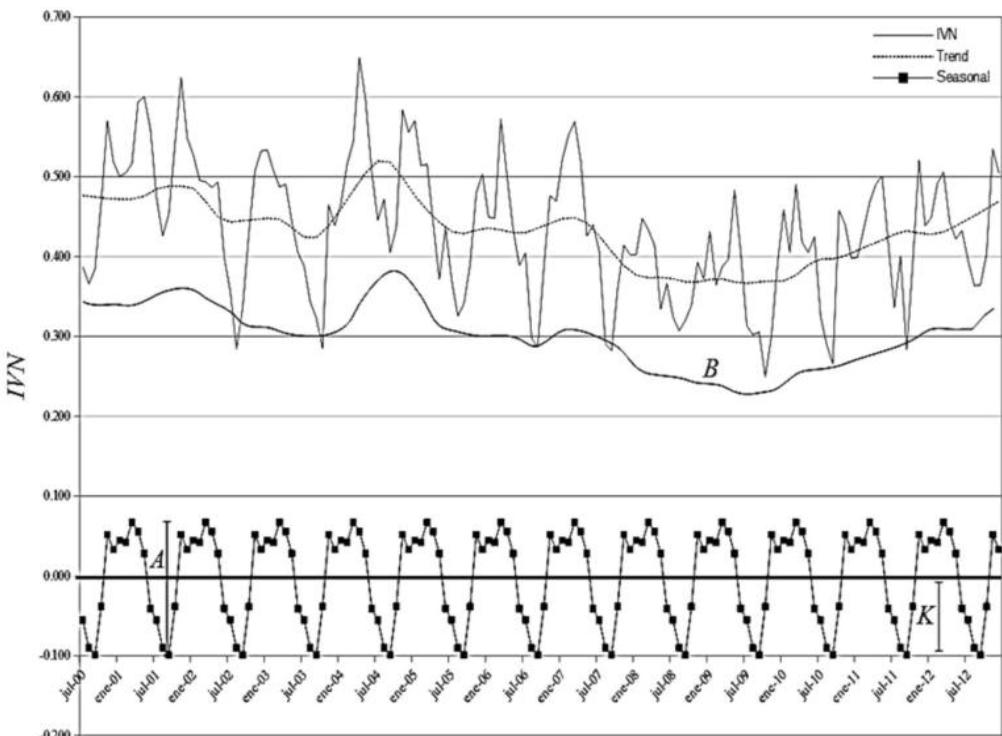


Figura 1: Descomposición de la serie de tiempo IVN en sus componentes estacionalidad (seasonal) y tendencia (trend) mediante el algoritmo STL. Se indican los componentes amplitud (A), línea de base (B) y el factor de corrección K (adaptado de Lu 2003).

del componente estacionalidad (A), podemos asumir

$$\frac{Twi}{Thi} = \frac{Bi}{A - 0.08Bi} \quad (3)$$

El valor 0.08 es utilizado pues se ha observado que la amplitud estacional de un bosque denso es aproximadamente ese valor. Combinando las ecuaciones (1), (2) y (3), se podría estimar el IVN correspondiente a la tendencia ($IVNw$) como

$$IVNwi = Twi = \frac{Ti(Ti-K)}{0.92(Ti-K)+A} \quad (4)$$

y el IVN correspondiente a la estacionalidad ($IVNh$) se estimaría como

$$IVNhi = Thi + Si + \omega_i Ii = \frac{Ati - 0.08(Ti-K)}{0.92(Ti-K)+A} + Si + \omega_i Ii \quad (5)$$

donde ω_i es un factor de ponderación del efecto I al momento i , minimizando su impacto para valores extremos (Lu *et al.* 2001).

La resolución espacial original de las imágenes (pixel de 250m) fue re escalada (pixel de 1.6 km) para adecuarla al elevado consumo de memoria del proceso de cálculo.

El algoritmo completo escrito en lenguaje R se incluye en el Apéndice.

Caracterización de áreas con y sin procesos de lignificación

Se identificaron a campo doce usos del suelo con presencia o ausencia de procesos de lignificación. Cada uno de ellos fue caracterizado a partir de tres muestras independientes de aproximadamente 5 hectáreas cada una. Para definir un área en proceso de lignificación, se consideraron los siguientes aspectos:

1. Definiremos como lignificación a la proliferación de especies leñosas de porte arbustivo (plantas sin un eje principal definido, con ramificaciones desde la base) en ambientes dominados por herbáceas o árboles.
2. La bibliografía no especifica un número de individuos leñosos implantados por año para definir un proceso de lignificación. Se tomará

como referencia una densidad ≥ 150 individuos jóvenes ha^{-1} reclutados durante el período 2000-2013. Este valor consideró los valores de implantación entre 12 y 48 plantas $ha^{-1} año^{-1}$ hallados en el Caldenal en períodos post fuego y actualmente arbustizadas (Dussart *et al.* 1998).

3. Para cuantificar la densidad de especies arbustivas, se realizaron en cada sitio 10 transectas distribuidas al azar de 50 m de largo por 2 m de ancho donde se contabilizaron los individuos jóvenes de porte arbustivo.

Identificación del proceso de lignificación

Se calcularon los valores mensuales de $IVNw$ e $IVNh$ a partir de la serie temporal de IVN MODIS por el procedimiento STL modificado por la CSIRO (STL_{mod}) (Lu *et al.* 2001) para los doce usos del suelo planteados durante el período 2000-2013. Para determinar la importancia relativa de la tendencia sobre la estacionalidad, se calcularon las sumatorias totales del período estudiado de $IVNw$ e $IVNh$, (expresados como $\sum IVNw$ e $\sum IVNh$ respectivamente) y la razón $(\sum IVNh)/(\sum IVNw)$. Según la hipótesis planteada, se esperarían valores entre 0 y 1 en áreas con un proceso de lignificación evidente.

Las medias de los doce usos del suelo fueron contrastadas mediante un análisis de la varianza (ANVA) ($\alpha=0.05$). Una vez confirmada esta hipótesis, se calculó $(\sum IVNh)/(\sum IVNw)$ para la provincia de La Pampa y se clasificó como área en proceso de lignificación a aquellos pixeles que obtuvieron valores compatibles con dicho proceso.

El producto resultante fue sometido a un filtro de mediana con una grilla de 3x3 pixeles para eliminar ruido y se eliminó del análisis la superficie utilizada para agricultura (Vázquez *et al.* 2013). Las predicciones fueron contrastadas contra 250 verdades de campo evaluadas visualmente (no fueron realizadas mediciones de densidad de individuos). El ajuste del modelo fue verificado mediante una matriz de confusión, aceptando como satisfactorio un $K \geq 0.7$.

Se relacionó espacialmente el proceso de lignificación con diferentes comunidades vegetales y la presencia de fuegos. Para ello, se tomó una muestra al azar de 329209 puntos sobre la provincia de La Pampa donde se identificó la ausencia o presencia de procesos de lignificación modeladas en este trabajo ($0=ausencia$, $1=presencia$), la comunidad vegetal predominante (Vázquez *et al.* 2013) y la frecuencia de grandes fuegos. Para controlar esta variable

en el análisis, se identificaron áreas incendiadas durante el período 2000-2013 a partir del producto mensual de detección de fuegos activos MOD14, suministrado por el proyecto NASA Earth Observation con resolución espacial de 10x10 km (Justice *et al.* 2006). La detección de grandes fuegos fue verificada contrastando 35 sitios seleccionados al azar con la casuística de incendios de Defensa Civil, seccional La Pampa (Vázquez *et al.* 2013). La frecuencia de grandes fuegos dentro de cada pixel se calculó a partir de considerar como fuego aquellos pixeles con 30 por ciento o más de afectación (30000 hectáreas). Cabe aclarar que este producto detecta superficie afectada por fuego, no su intensidad ni velocidad. Los datos fueron analizados a partir del test X^2 de Pearson, una prueba no paramétrica que mide la discrepancia entre una distribución observada y otra teórica (bondad de ajuste), para probar la independencia de dos variables entre sí, mediante la presentación de los datos en tablas de contingencia (Cáceres 2007).

RESULTADOS

El cálculo de la razón $(\sum IVNh)/(\sum IVNw)$ para los doce usos del suelo durante el período 2000-2013, hallando un valor promedio de 1.46 en sitios sin procesos de lignificación evidentes y de 0.56 en áreas con proceso de lignificación (Tabla 1). El ANVA determinó que existen diferencias significativas entre los sitios con y sin proceso de lignificación, confirmándose la hipótesis que el proceso de lignificación se caracteriza por una participación relativa mayor $IVNw$ respecto de $IVNh$ (Tabla 2 y Figura 2).

Los pixeles identificados con un proceso de lignificación conspicuo totalizaron una superficie de 5400000 de hectáreas, un 38% de la superficie de La Pampa (figura 3), con un coeficiente de certeza global de 0.81 (Tabla 3). Se hace esta aclaración pues un pixel calificado con presencia de un proceso de lignificación no implica que esté afectado en su totalidad.

El análisis de correspondencia indicó que las comunidades afectadas por este proceso fueron las de *Condalia microphylla*, *Prosopis caldenia*, *Larrea sp + Atriplex lampa*, *Larrea sp.* y *Piptochaetium sp.* (Tabla 4). Las áreas con proceso de lignificación en estas cinco comunidades fueron afectadas por 1 a 3 incendios importantes (mayores a 30.000 hectáreas) durante el período estudiado (2000-2013) (Tabla

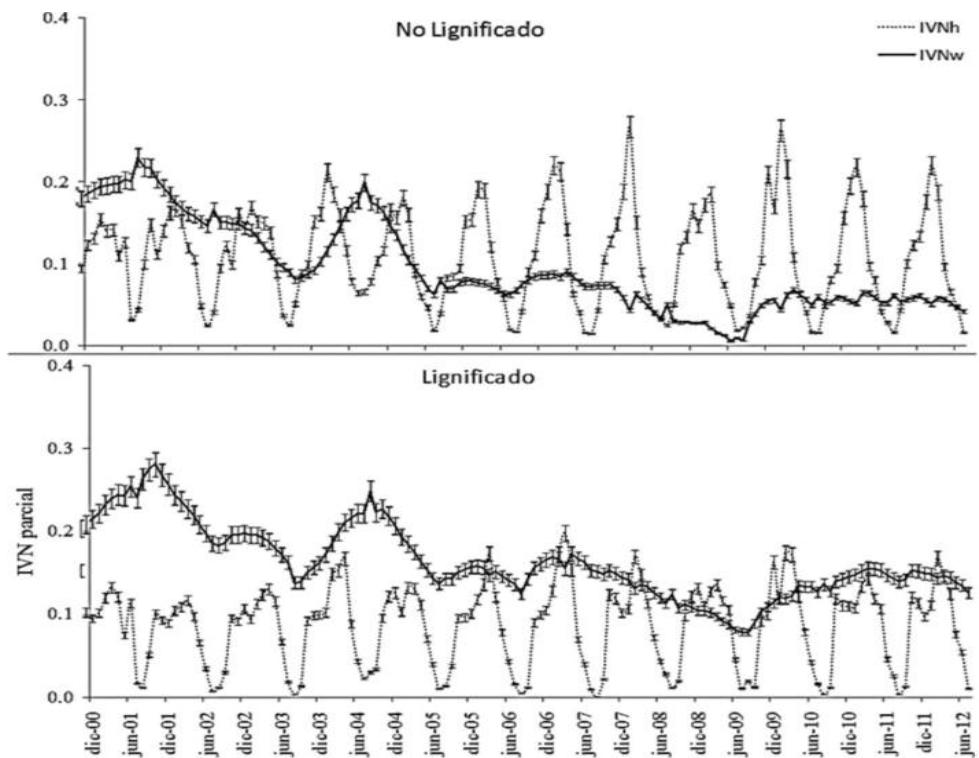


Figura 2: Evolución media mensual de la estacionalidad (IVNh) y tendencia (IVNw) en áreas con y sin proceso de lignificación durante el período 2000-2013.

5), siendo en estas áreas quemadas donde se observó el 90% de los procesos de lignificación (Tabla 6).

Las áreas quemadas con baja frecuencia presentaron una participación relativa alta de IVNw respecto del IVN (60%). En la medida que los fuegos se hicieron más frecuentes, comenzó a predominar el componente IVNh, observándose claramente en áreas del Espinal con más de cinco eventos de fuego durante el período estudiado. Este comportamiento fue extremo en áreas quemadas de pasto llorón, donde luego de doce eventos de fuego (antrópico) el IVNw solo representó el 15% del IVN (Figura 4).

Las áreas arbustizadas presentaron una carga animal 40% superior al resto, con valores de 0.15 EV ha⁻¹ vs 0.11 EV ha⁻¹, respectivamente ($p=0.0001$). Esto refuerza el efecto del mal manejo ganadero sobre el proceso arbustivo.

DISCUSIÓN

Se observó un proceso de lignificación activo en toda el área ocupada por leñosas. Las especies asociadas a este evento respondió a la región donde fue observado, siendo renuevos de *Prosopis caldenia* con crecimiento arrosetado, reclutamiento de nue-

vos individuos e invasiones de *Geoffroea decorticans* (chañar) en el Caldenal, reclutamiento de nuevos individuos de *Prosopis alpataco* (alpataco), *Condalia microphylla* (piquillín) y *Prosopidastrum globosum* (manca caballo) en el sector sudeste de la provincia, y *Prosopis alpataco*, *Condalia microphylla* y *Schinus fasciculatus* (molle) en el ecotono.

El comportamiento de la cubierta vegetal del sector sudeste no permitió diferenciar sitios en proceso de lignificación y estabilizados. Posiblemente, el componente tendencia esté siempre presente como algo propio de esta comunidad vegetal, por lo cual uno esperaría que, salvo intervención antrópica, esta comunidad esté en activo crecimiento cuando las condiciones ambientales lo permiten. Si bien ambas situaciones presentaban valores inferiores de $(\sum IVNh)/(\sum IVNw)$ a 1, aquellos sitios calificados como no lignificados presentaron un valor promedio más alto respecto a los lignificados (0.54 y 0.4, respectivamente) (Tabla 1).

En las áreas con cultivo y quema de pasto llorón también se observaron algunos casos donde $(\sum IVNh)/(\sum IVNw)$ fue inferior a 1 (0.74 y 0.88, respectivamente) (Tabla 1). En el caso de los cultivos, esto se debió a cambios en la estrategia productiva. Las

| Uso del suelo | lat | long | fuegos | $\sum IVNh$ (1) | $\sum IVNw$ (2) | (1)/(2) |
|------------------------|---------|---------|--------|-----------------|-----------------|---------|
| Frec. | | | | | | |
| cultivo | -35.682 | -63.657 | 0 | 18.23 | 17.63 | 1.03 |
| | -35.475 | -63.822 | 0 | 18.27 | 24.54 | 0.74 |
| | -35.988 | -64.057 | 0 | 19.56 | 13.22 | 1.48 |
| quemas de pasto llorón | -35.647 | -63.668 | 7 | 20.52 | 16.19 | 1.27 |
| | -35.627 | -63.793 | 12 | 22.32 | 18.54 | 1.20 |
| | -35.749 | -63.764 | 6 | 21.43 | 24.48 | 0.88 |
| pastizal | -36.552 | -65.628 | 2 | 15.20 | 6.07 | 2.50 |
| | -37.056 | -65.826 | 2 | 15.10 | 6.58 | 2.29 |
| | -37.450 | -65.637 | 0 | 13.65 | 11.79 | 1.16 |
| bosque abierto | -38.026 | -64.086 | 1 | 18.50 | 15.04 | 1.23 |
| | -36.219 | -64.682 | 1 | 16.19 | 13.75 | 1.18 |
| | -36.221 | -64.691 | 1 | 16.57 | 15.16 | 1.09 |
| piquillin + calden | -37.488 | -64.402 | 2 | 14.04 | 22.62 | 0.62 |
| | -37.562 | -64.380 | 1 | 14.03 | 29.44 | 0.48 |
| | -37.684 | -64.885 | 3 | 13.52 | 26.53 | 0.51 |
| ecotono | -37.178 | -65.967 | 1 | 7.68 | 3.30 | 2.33 |
| | -37.523 | -65.780 | 1 | 7.85 | 2.21 | 3.55 |
| | -37.643 | -65.922 | 1 | 7.30 | 3.79 | 1.93 |
| jarillal | -37.768 | -66.352 | 1 | 6.38 | 2.98 | 2.14 |
| | -38.081 | -66.134 | 1 | 7.38 | 3.95 | 1.87 |
| | -37.757 | -65.867 | 2 | 5.69 | 5.06 | 1.12 |
| bosque abierto | -37.191 | -65.087 | 2 | 13.30 | 16.27 | 0.82 |
| | -36.904 | -64.257 | 1 | 13.17 | 30.81 | 0.43 |
| | -36.905 | -64.260 | 0 | 13.34 | 25.36 | 0.53 |
| bosque cerrado | -36.426 | -65.618 | 1 | 15.92 | 20.86 | 0.76 |
| | -36.313 | -65.217 | 3 | 16.01 | 24.50 | 0.65 |
| | -36.137 | -65.252 | 2 | 16.11 | 33.54 | 0.48 |
| piquillin + calden | -37.703 | -64.877 | 3 | 11.03 | 31.57 | 0.35 |
| | -37.698 | -64.815 | 3 | 11.61 | 24.80 | 0.47 |
| | -37.569 | -64.861 | 2 | 11.06 | 30.04 | 0.37 |
| ecotono | -37.350 | -65.810 | 0 | 8.51 | 19.48 | 0.44 |
| | -37.295 | -65.901 | 1 | 8.46 | 17.16 | 0.49 |
| | -37.649 | -65.624 | 1 | 9.27 | 8.37 | 1.11 |
| jarillal | -37.350 | -65.810 | 1 | 7.40 | 30.14 | 0.25 |
| | -37.295 | -65.901 | 1 | 7.51 | 25.8 | 0.29 |
| | -37.649 | -65.624 | 1 | 8.97 | 9.46 | 0.95 |

SIN PROCESO DE LIGNIFICACIÓN

CON PROCESO DE LIGNIFICACIÓN

Tabla 1: Ubicación, frecuencia de fuegos y estimación de $\sum IVNh$, $\sum IVNw$ y $(\sum IVNh)/(\sum IVNw)$ para los doce usos del suelo con presencia o ausencia de procesos de lignificación.

| Lignificación | $\frac{\sum IVNh}{\sum IVNw}$ | | ANOVA | | | | | |
|---------------|-------------------------------|-----------|--------------|-------|-----------|------|-------|--------|
| SI | Media (n) | Desv.Est. | S. cuadrados | gl | C. medios | F | Sig. | |
| | | | E. grupos | 7.07 | 1 | 7.07 | 18.76 | 0.0001 |
| NO | 1.46 (21) | 0.77 | D. grupo | 12.82 | 34 | 0.37 | | |
| | | | Total | 19.89 | 35 | | | |

Tabla 2: Comparación de medias de $(\sum IVNh)/(\sum IVNw)$ entre usos del suelo con y sin proceso de lignificación mediante ANVA.

| MODELADOS | OBSERVADOS | | Error comisión | $\kappa=0.81$ |
|---------------|------------|------|----------------|---------------|
| | 0 | 1 | | |
| 0 | 50 | 38 | 0.43 | |
| 1 | 9 | 152 | 0.06 | |
| Error omisión | 0.15 | 0.20 | | |

Tabla 3: Matriz de confusión obtenida a partir del contraste entre áreas observadas y modeladas con (1) y sin (0) proceso de lignificación ($n=249$).

Tabla 4: Tabla de contingencia para relacionar la presencia (1) y ausencia (0) de procesos de lignificación con las comunidades vegetales, representadas por sus componentes botánicos más representativos ($n=329209$).

| COMUNIDAD | PROCESO LIGNIFICACIÓN | | | N |
|-----------------------------|-----------------------|--------|-------|--------|
| | 0 | 1 | TOTAL | |
| AGRICOLA CON TOSCA | 12.6 | 1.6 | 14.2 | 47588 |
| AGRICOLA SIN TOSCA | 5.3 | 0.1 | 5.3 | 17858 |
| <i>CONDALIA MICROPHYLLA</i> | 4.2 | 8 | 12.2 | 40724 |
| <i>ELYONURUS SP.</i> | 6.7 | 2 | 8.7 | 29131 |
| <i>LARREA + ATRIPLEX</i> | 7.9 | 6.8 | 14.7 | 49094 |
| <i>LARREA SP.</i> | 17.4 | 8.1 | 25.5 | 85294 |
| <i>PIPTOCHAETUM SP.</i> | 1.7 | 3.7 | 5.4 | 18059 |
| <i>PROSOPIS CALDENIA</i> | 6.3 | 6.1 | 12.4 | 41461 |
| TOTAL | 62.1 | 36.9 | 100 | |
| N | 204439 | 124770 | | 329209 |

χ^2 Pearson=123627, df=23, P<0.0001

Tabla 5: Tabla de contingencia para relacionar la frecuencia de fuegos identificados a partir del producto MOD14 con comunidades vegetales afectadas por procesos de lignificación. ($n=149338$).

| COMUNIDAD | FRECUENCIA DE FUEGO 2000-2013 | | | | N |
|-----------------------------|-------------------------------|--------|--------|-----------|--------|
| | 0 | 1 a 3 | 4 a 12 | Total (%) | |
| <i>LARREA + ATRIPLEX</i> | 1.1 | 31.3 | 0.5 | 32.9 | 49094 |
| <i>PROSOPIS CALDENIA</i> | 1.6 | 23.1 | 3.1 | 27.8 | 41461 |
| <i>CONDALIA MICROPHYLLA</i> | 1.5 | 25.6 | 0.1 | 27.3 | 40724 |
| <i>PIPTOCHAETUM SP.</i> | 0.3 | 10.9 | 0.9 | 12.1 | 18059 |
| Total (%) | 4.5 | 90.9 | 4.6 | 100 | |
| N | 6764 | 135729 | 6845 | | 149338 |

χ^2 Pearson=26983, df=72, P<0.0001

Tabla 6: Tabla de contingencia para relacionar la presencia (1) o ausencia (0) de procesos de lignificación con la frecuencia de fuegos detectados por el producto MOD14, sobre el área ocupada por las comunidades vegetales afectadas.

| FRECUENCIA DE FUEGO 2000-2013 | PROCESO DE LIGNIFICACIÓN | | | N |
|-------------------------------|--------------------------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1 | total | |
| 0 | 4.191 | 1.567 | 5.758 | 8599 |
| 1 a 3 | 35.543 | 52.948 | 88.491 | 132151 |
| 4 a 12 | 2.721 | 3.029 | 5.75 | 8587 |
| Total | 42.455 | 57.544 | 100 | |
| N | 63401 | 85937 | | 149338 |

χ^2 Pearson=4247, df=8, P<0.0001

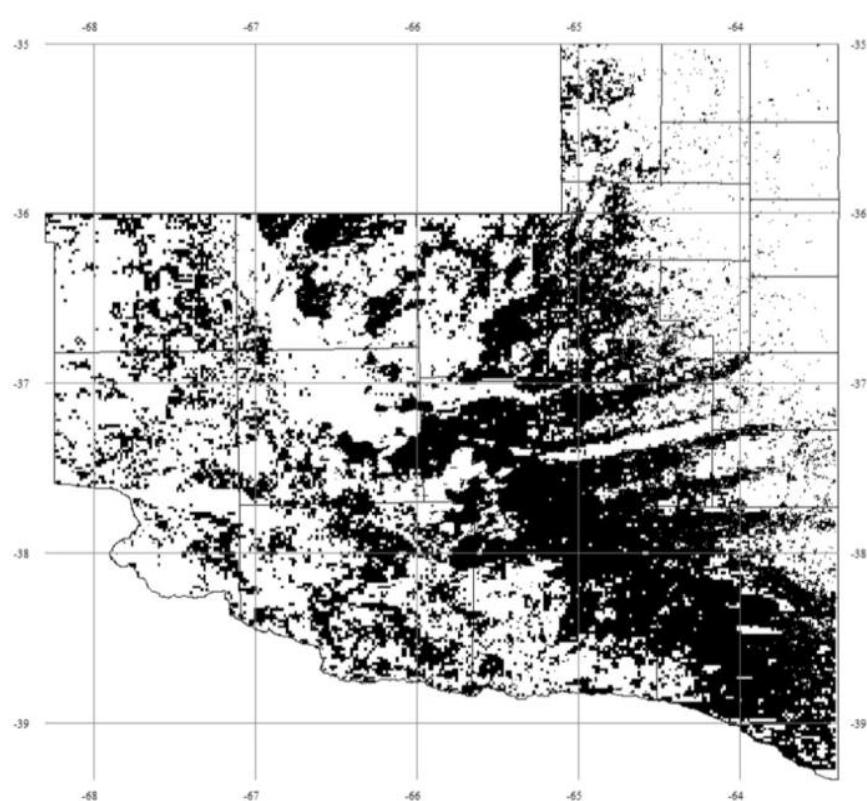


Figura 3: Procesos de lignificación identificados a partir de aplicar el algoritmo STL_{mod} .

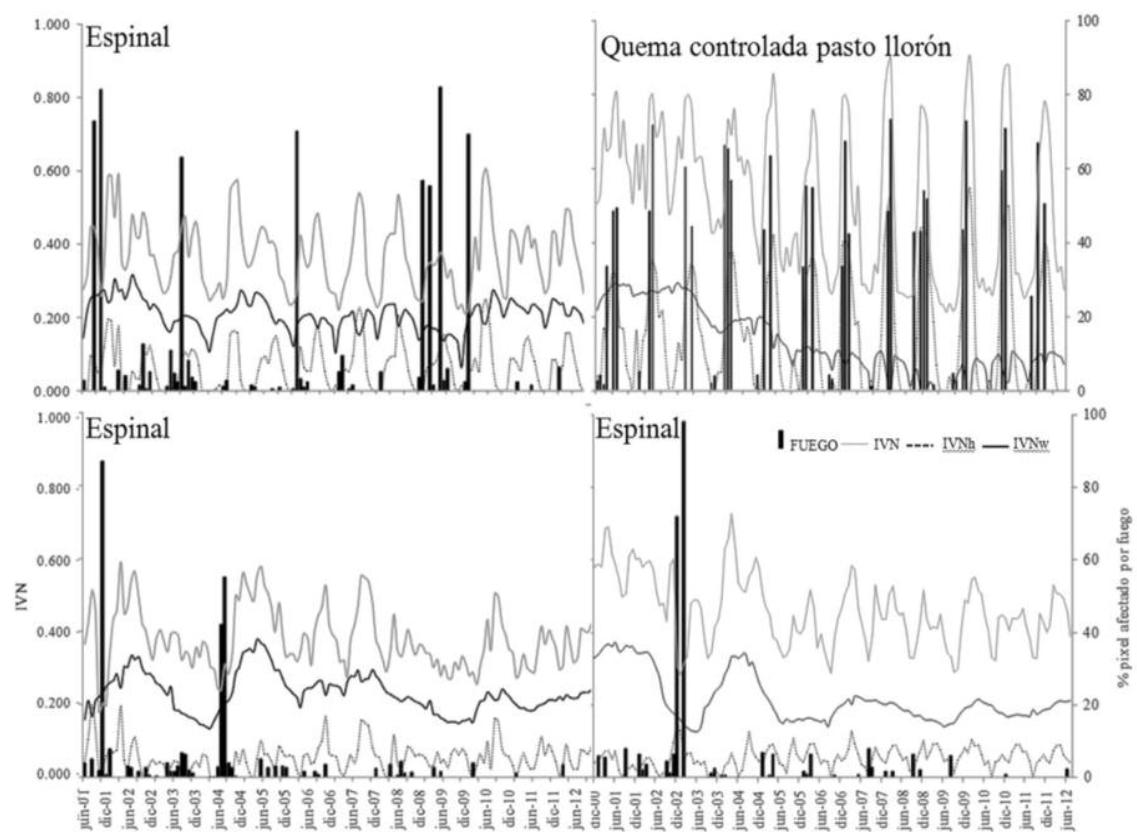


Figura 4: Evolución mensual del IVN, la estacionalidad (IVNh) y la tendencia (IVNw) en función de la frecuencia de fuegos, período 2000-2013.

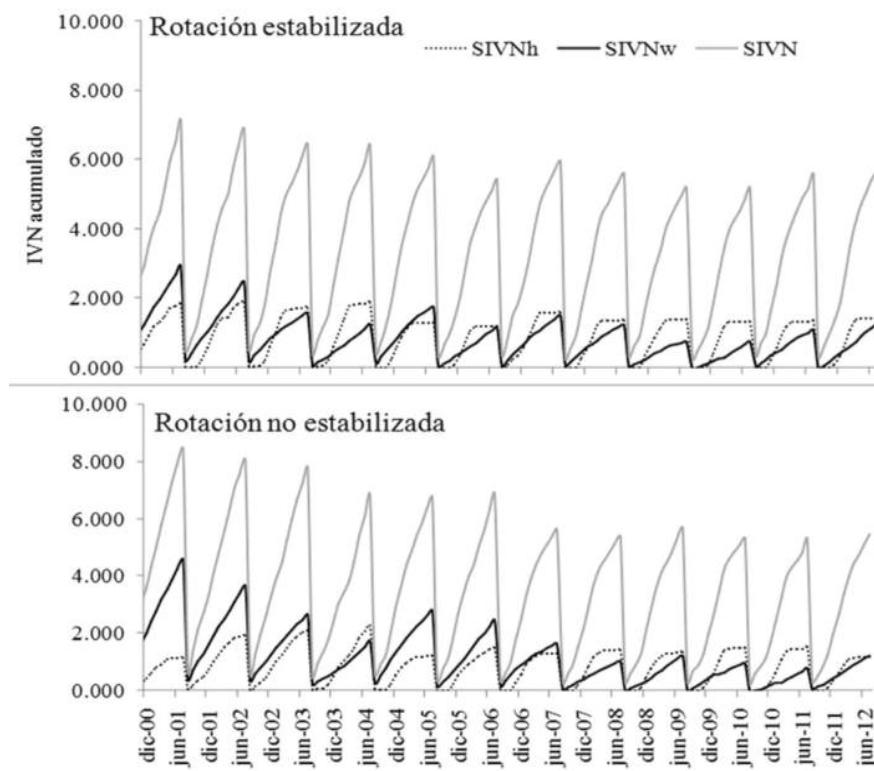


Figura 5: Evolución de valores acumulados anuales del IVN (*SIVN*), estacionalidad (*SIVNh*) y tendencia (*SIVNw*) para cultivos con rotación estabilizada desde el año 2000 y con rotación discontinuada desde el año 2003.

áreas con valores superiores a 1 corresponden a sectores donde no hubo cambios en las rotaciones agrícolas durante el período estudiado, observándose una leve caída del *IVN* acumulado anual de 7.1 (2000) a 5.8 (2013), producto de la sequía ocurrida en la región durante los años 2008 y 2009. Las áreas con valores inferiores a 1 coinciden con sitios donde los cultivos de invierno fueron eliminados de la rotación durante los primeros cuatro años del período estudiado, dejando simplemente agricultura de verano. Esto representó una caída en el *IVN* acumulado anual con valores que fueron desde 8.5 en el año 2000 hasta 5.4 en 2013. En consecuencia, el aporte de *IVNw* al *IVN* acumulado anual durante los primeros 3-4 años del período estudiado fue un 50% superior a los hallados en sitios con rotaciones estabilizadas (Figura 5).

En el caso de la quema de pasto llorón sucedió algo similar, ya que el fuego reduce el período de actividad fotosintética anual, concentrándola en uno solo más corto. Esto fue evidente cuando las quemas comenzaron a realizarse con regularidad ya iniciado el período de estudio.

El proceso de lignificación estuvo asociado a zonas de baja frecuencia de fuego (1 a 3 fuegos durante el período de estudio). Si bien no se contro-

ló la temperatura del fuego, la frecuencia del mismo en áreas ocupadas por leñosas estaría asociada inversamente a su intensidad. Fuegos suaves y rápidos permiten una elevada supervivencia de herbáceas, las cuales rebotarán y almacenarán material fino seco, elemento fundamental para el comienzo de un nuevo fuego. Un fuego fuerte, sin embargo, no dejará prácticamente nada, requiriéndose un largo tiempo para recomponer una cubierta vegetal y acumular material combustible. Esto favorece la implantación de nuevas leñosas y las sobrevivientes rebotan de forma arrosetada, lo cual es coincidente con lo mencionado por varios autores (Llorens 1995; Medina *et al.* 2000; Dussart *et al.* 2011; Dudinszky and Ghermandi 2013, Matula *et al.* 2014, Bogino *et al.* 2015).

Al comparar las 5400000 hectáreas afectadas por lignificación en este trabajo con las 4000000 hectáreas estimadas no verificadas a campo (Vázquez *et al.* 2013) utilizando el producto MOD44 para cuantificación de superficie cubierta por leñosas (Hansen *et al.* 2010), encontramos una diferencia del 25%. Si se tiene en cuenta que el tamaño de pixel original del producto MOD44 cubre 6.25 hectáreas (2.5% de la superficie cubierta por el pixel utilizado en este trabajo), podemos inferir de manera

preliminar que esta diferencia correspondería a la escala de trabajo utilizada en cada caso. La superficie promedio y máxima cubierta por leñosas estimada a nivel de sub pixel en este producto para la provincia de La Pampa no superan las 0.4 y 3.6 hectáreas, respectivamente (entre el 6 y el 50% de la superficie del pixel). Esto permite inferir que el área neta afectada por procesos de lignificación podría estimarse entre 324000 y 2700000 hectáreas. El valor de 5400000 hallado en este trabajo incluiría, por lo tanto, superficies afectadas por la inaccesibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Louis Reymondin y al Ing. Alejandro Coca Castro (Decision and Policy Analysis Research Area - DAPA-, International Center of Tropical Agriculture) por la traducción del modelo STL a lenguaje R, y por su adaptación a los datos disponibles en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- BOGINO, S., S. ROA-GIMÉNEZ, A. VELASCO-SASTRE, M. CANGIANO, L. RISIO-ALLIONE AND V. ROZAS. 2015. Synergetic effects of fire, climate, and management history on *Prosopis caldenia* recruitment in the Argentinean pampas. *Journal of Arid Environments* 117: 59–66.
- CÁCERES, R.Á. 2007. Estadística aplicada a las ciencias de la salud. Ediciones Díaz de Santos, España. ISBN 978-84-7978-823-0. 996 p.
- CLEVELAND, R.B., W.S. CLEVELAND, J.E. MCRAE AND I. TER-PENNING. 1990. STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics* 6: 3–73.
- DUSSART, E.G., C.C. CHIRINO, E.A. MORICI AND R.H. PEINETTI. 2011. Reconstrucción del paisaje del caldenal pampeano en los últimos 250 años. *Quebracho* (Santiago del Estero) 19: 54–65.
- DUSSART, E.G., P. LERNER AND R. PEINETTI. 1998. Long term dynamics of 2 populations of *Prosopis caldenia* Burkart. *Journal of Range Management Archives*. 51: 685–691.
- GAIGNARD, R. 1989. La Pampa. Ocupación - explotación. De la conquista a la crisis mundial, 1550-1930. Primera.edición. Ediciones Solar S.A., Buenos Aires. 512 p.
- HANSEN, M.C., S.V. STEHMAN AND P.V. POTAPOV. 2010. Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 107: 8650–8655.
- HOLBEN, B. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 7: 1417–1434.
- JUSTICE, C., L. GIGLIO, L. BOSCHETTI, D. ROY, I. CSISZAR, J. MORISSETTE AND Y. KAUFMAN. 2006. Algorithm Technical background Document: MODIS fire products (version 2.3). NASA: MODIS SCIENCE TEAM. 34 p.
- KNAPP, A.K., J.M. BRIGGS, S.L. COLLINS, S.R. ARCHER, M.S. BRET-HARTE, B.E. EWERS, *et al.* 2008. Shrub encroachment in North American grasslands: shifts in growth form dominance rapidly alters control of ecosystem carbon inputs. *Global Change Biology*. 14: 615–623.
- LERNER, P. 2004. Ecología y manejo de los bosques de Argentina. Capítulo: El Caldenar: dinámica de poblaciones de calden y procesos de expansión de leñosas en pastizales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNLPAM. 15 p.
- LLORENS, E. 1995. Viewpoint: the state and transition model applied to the herbaceous layer of Argentina's calden forest. *Journal of Range Management Archives*. 48: 442–447.
- LU, H., M. RAUPACH AND T. VICAR [online]. 2001. Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series. Technical Report 35/01. CSIRO Land and Water.
- <http://clw.csiro.au/publications/technical2001/tr35-01.pdf>.
- LU, H. 2003. Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*. 86: 1–18.
- MATULA, R., M. SVÁTEC AND R. ŘEPKA. 2014. The effect of fire exclusion on the structure and tree mortality patterns of a calden (*Prosopis caldenia* Burkart) woodland in semi-arid Central Argentina. *Journal of Arid Environments*. 100-101: 72–77.
- MEDINA, A., E.G. DUSSART, H.D. ESTELRICH AND E.A. MORICI. 2000. Reconstrucción de la historia del fuego en un bosque de *Prosopis caldenia* (Burk.) de Arizona, sur de la provincia de San Luis. *Multequina* 9: 91–98.
- PEINETTI, R., M. PEREYRA, A. KIN AND A. SOSA. 1993. Effects of cattle ingestion on viability and germination rate of calden (*Prosopis caldenia*) seeds. *Journal of Range Management Archives*. 46: 483–486.
- RODERICK, M.L., I.R. NOBLE AND S.W. CRIDLAND. 1999. Estimating Woody and Herbaceous Vegetation Cover from Time Series Satellite Observations. *Global Ecology and Biogeography*. 8: 501–508.
- VAN AUKEN, O.W. 2000. Shrub invasions of North American semiarid grasslands. *Annual Review of Ecology and Systematics* 31: 197–215.
- VÁZQUEZ, P., E. ADEMA AND B. FERNÁNDEZ. 2013. Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa. *Ecología Austral* 23: 77–86.

Nivel Predial: Caso 5

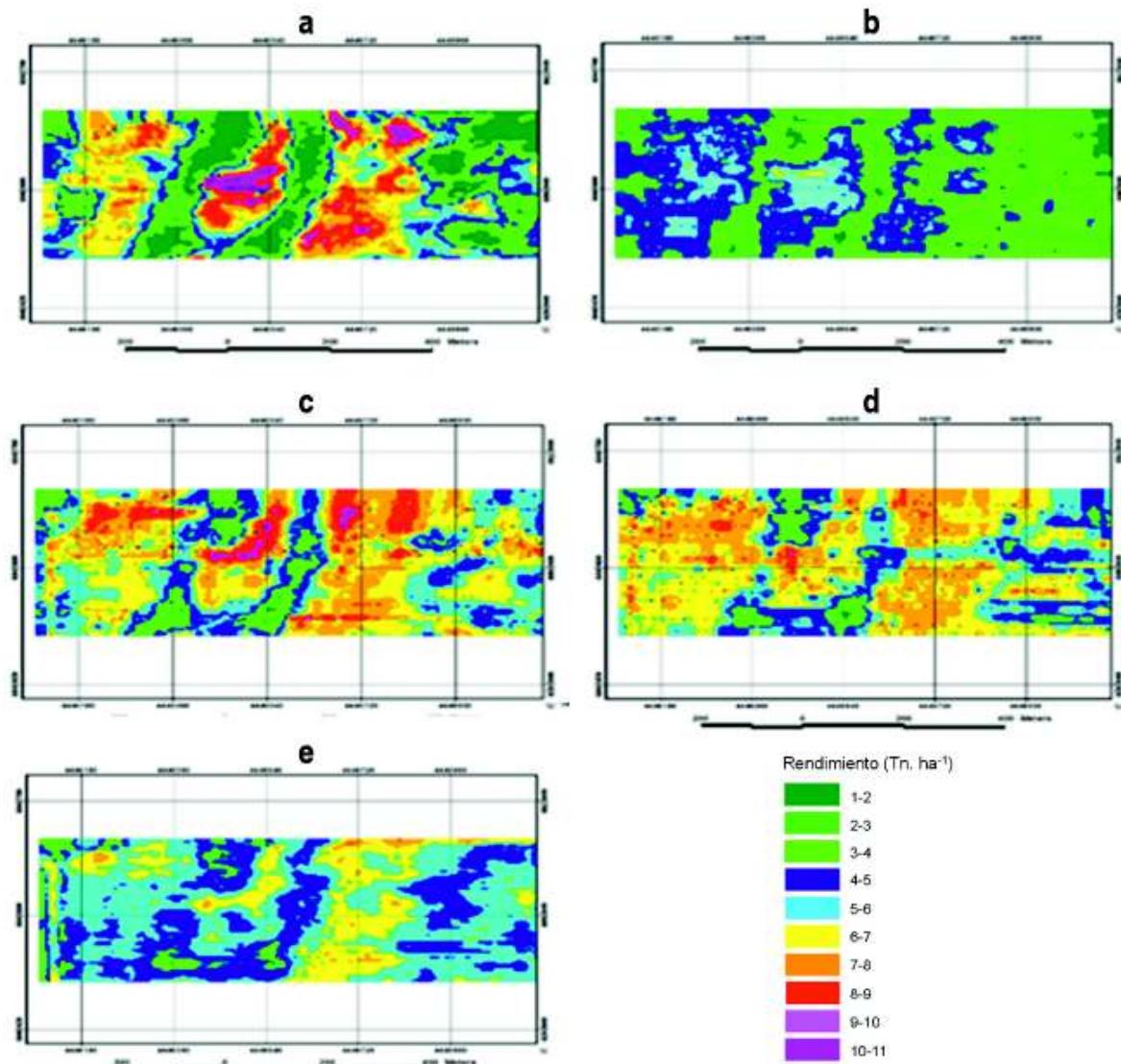


Figura 2: Mapas de rendimiento ($Tn\ ha^{-1}$) para las campañas agrícolas 2007-08 (a); 2008-09 (b); 2009-10 (c); 2010-11 (d); 2011-12 (e).

Nivel Local: Caso 5

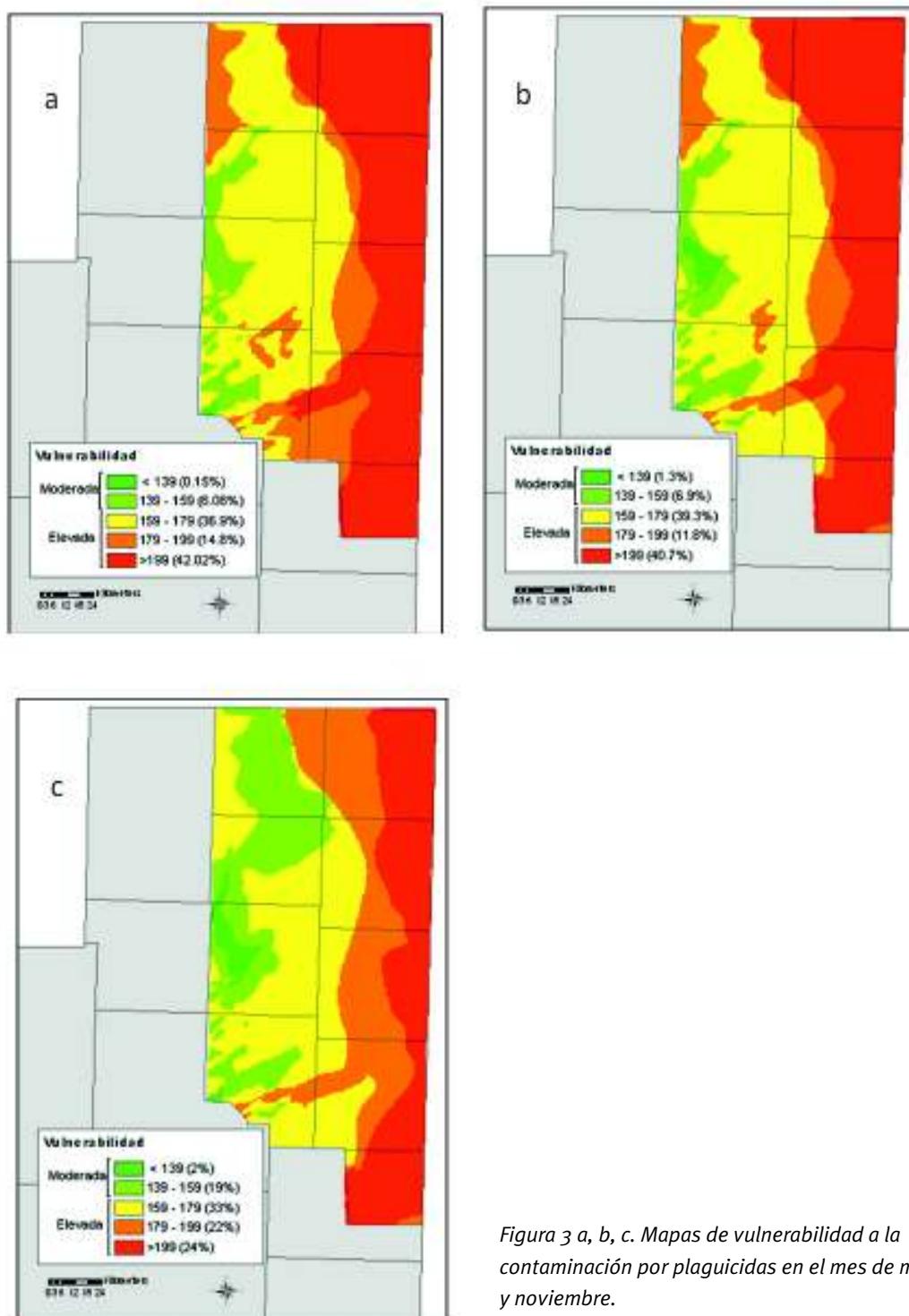


Figura 3 a, b, c. Mapas de vulnerabilidad a la contaminación por plaguicidas en el mes de marzo, abril y noviembre.

Nivel Regional: Caso 1

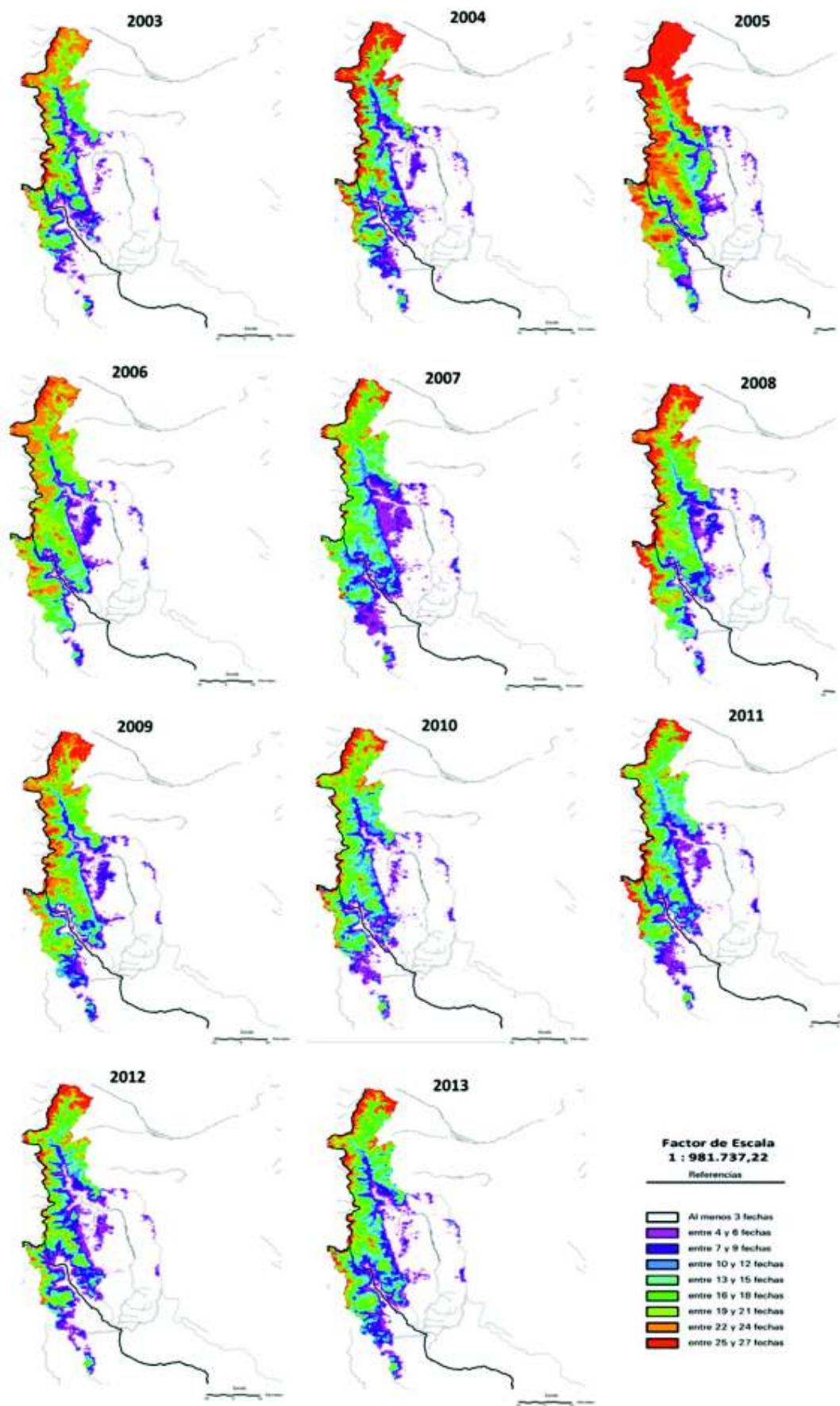


Figura 3. Mapas de frecuencia de cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado, derivados del producto MOD10A2, para los años 2003 a 2013 de abril a noviembre de cada año.

Nivel Regional: Caso 2

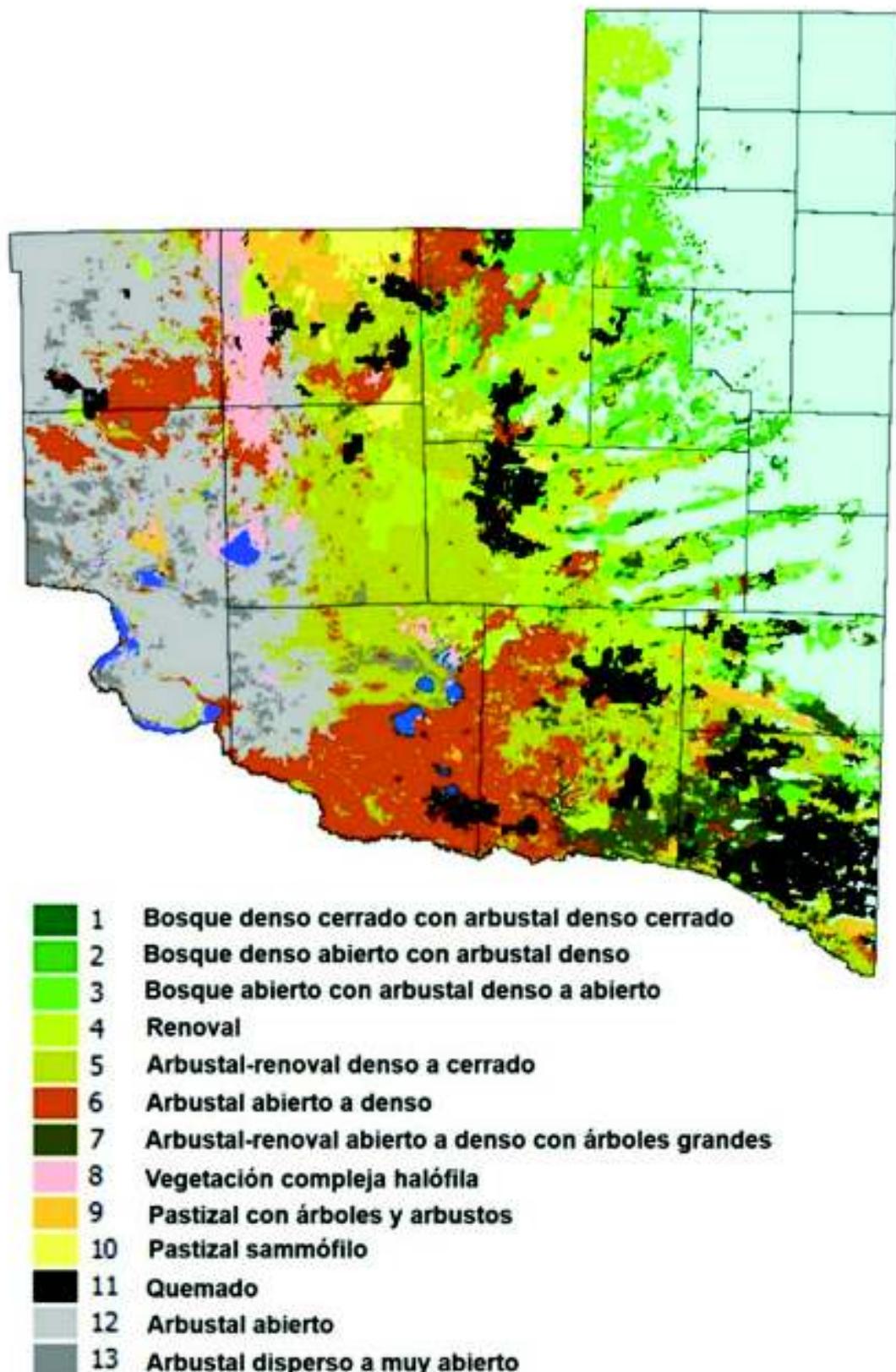


Figura 1. Mapa de fisonomía vegetal del presente estudio para la provincia de La Pampa (escala 1:100000).