

Tesis Doctoral

Zonas homogéneas de la cuenca del arroyo del Azul: algunos aspectos de su dinámica analizados usando sensores remotos y sig

Gandini, Marcelo Luciano

2005

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Gandini, Marcelo Luciano. (2005). Zonas homogéneas de la cuenca del arroyo del Azul: algunos aspectos de su dinámica analizados usando sensores remotos y sig. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Cita tipo Chicago:

Gandini, Marcelo Luciano. "Zonas homogéneas de la cuenca del arroyo del Azul: algunos aspectos de su dinámica analizados usando sensores remotos y sig". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2005.

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

Lic. Marcelo Luciano Gandini



***ZONAS HOMOGÉNEAS DE LA CUENCA DEL
ARROYO DEL AZUL: ALGUNOS ASPECTOS DE SU
DINÁMICA ANALIZADOS USANDO SENSORES
REMOTOS Y SIG***

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en
el área de Ciencias Biológicas*

Autor: Marcelo Luciano Gandini

Director: Eduardo Jorge Usunoff

Consejero de Estudios: María Busch

Lugar de Trabajo: Facultad de Agronomía e Instituto de Hidrología de Llanuras de Azul,
UNCPBA.

Buenos Aires, 2005

Lic. Marcelo Luciano Gandini

ZONAS HOMOGÉNEAS DE LA CUENCA DEL ARROYO DEL AZUL: ALGUNOS ASPECTOS DE SU DINÁMICA ANALIZADOS USANDO SENSORES REMOTOS Y SIG.

Nombre del Jurado	Firma	Calificación

Agradecimientos:

Quiero agradecer a todos aquellos que de una manera u otra colaboraron tanto en el trabajo manual como en el aporte de ideas en esta tesis. Especialmente a Ilda Entraigas, con la que recorrimos juntos gran parte de la tediosa tarea del ingreso de datos.

También quiero agradecer a Jean Pierre Paris, y al GDTA (Groupement pour le developement de la teledetection appliqué) por su gestión para la beca que posibilitó que pudiera viajar a Francia y hacer mi primer curso de Teledetección en 1996.

Por otra parte quiero agradecer a la Facultad de Agronomía de la UNCPBA, por poseer una política de investigación que favoreció el desarrollo de esta tesis, y el aporte del dinero suficiente como para sostener la parte básica de los proyectos de investigación que formaron parte de la misma.

También quiero agradecer a la CONAE, por posibilitar el acceso de los investigadores Argentinos a las imágenes SAC-C, las cuales son de una calidad óptima para el estudio de los recursos naturales a nivel regional.

Por otro lado agradezco a todos aquellos investigadores, técnicos, y gestores que tomaron la decisión para que las imágenes con el NDVI calculado estuvieran disponibles para la comunidad científica. Principalmente al USGS edc (USA), y a VITO, Bélgica (UE).

Además quisiera agradecer también a los consejos directivos de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA, por mantener la política de enseñanza gratuita en el Doctorado, sin la cual seguramente debería haber abandonado la intención de presentar esta tesis.

A Inés Malvárez, (aunque ella querría que no le agradezca nada) cuyas discusiones teóricas enriquecieron esta Tesis.

Por último, agradezco y dedico esta tesis a la Dra. Vilma Manfreda por la corrección de sus primeras versiones y su continuo apoyo.

Lic. Marcelo Luciano Gandini

Para Vilma, Luchi y Matu

TABLA DE CONTENIDOS

PAGINA DEL JURADO Y CALIFICACIONES	2
<i>Agradecimientos:</i>	3
PRÓLOGO	8
<i>RESUMEN</i>	11
<i>SUMMARY</i>	12
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	13
<i>1.1 Aspectos generales</i>	13
<i>1.2 Criterios de regionalización</i>	16
<i>1.3 El análisis multivariado y la regionalización ecológica</i>	17
<i>1.4 Los Sistemas de Información Geográfica y el manejo de la información Ecológica.</i>	19
1.4.1 Aspectos generales	19
1.4.2 Aspectos metodológicos.....	20
<i>1.5 El uso de las imágenes de satélite en la descripción de la vegetación:</i>	21
<i>1.6 Proceso de precipitación-escorrentía en una cuenca y el paisaje</i>	24
<i>1.7 Definición de las variables a utilizar</i>	26
<i>1.8 Objetivo general</i>	27
2. LA ZONA DE ESTUDIO	28
<i>2.1 Ubicación geográfica y descripción de la zona de estudio</i>	28
<i>2.2 Suelos de la cuenca</i>	31
<i>2.3 Clima</i>	36
<i>2.4 Sistemas de producción agropecuarios</i>	37
<i>2.5 Vegetación Natural: Comunidades Vegetales</i>	38
3. DELIMITACIÓN DE ECOZONAS	41
<i>3.1 Metodología de regionalización</i>	41
3.1.1. Variables y criterios de selección.....	41
3.1.1.1 Fisiografía	41
3.1.1.2 Suelos:.....	44
3.1.1.3 Pendiente y Orientación:.....	48
3.1.1.4 Lluvias:.....	51
3.1.1.5 Anegabilidad:	53
3.1.2. Tratamiento de los datos:	54
<i>3.2 Resultados</i>	55
<i>3.3 Conclusiones</i>	68

4. NDVI 1992-93 Y EL COMPORTAMIENTO DE LA VEGETACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS	70
4.1 Introducción	70
4.1.1 Comportamiento espectral del paisaje: Los elementos Vegetación, Suelo y Agua.	70
4.1.1.1 Vegetación.....	70
4.1.1.2 Agua	71
4.1.1.3 Suelos	72
4.1.2 La vegetación y el ambiente	73
4.1.3 Los índices de vegetación	74
4.2 Materiales y métodos	75
4.2.1 Características Generales de las imágenes NOAA-AVHRR.....	75
4.2.2 Características de las imágenes almacenadas en el USGS (Eidenshink y Faundeen, 1994).....	76
4.2.3 Tratamiento de los datos:	76
4.3 Resultados y discusión	77
4.4 Conclusiones	83
5. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE VARIABLES DE IMPORTANCIA AGROECOLÓGICA Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI.	84
5.1 Introducción	84
5.2 Metodología	87
5.2.1 Estimación de Uso/Cobertura de la Tierra:	87
5.2.2 Tratamiento de imágenes Vegetation.....	89
5.2.3 Tratamiento estadístico de los datos	92
5.3 Resultados	93
5.4 Discusión y conclusiones	104
6. APLICACIÓN DE LA BASE DE DATOS DE REGIONALIZACIÓN: ESTIMACIÓN DE LA CURVA NÚMERO SCS PARA LA CUENCA DEL ARROYO DEL AZUL.	107
6.1 Aspectos generales	107
6.2 Introducción	108
6.3 Materiales y métodos	110
6.4 Resultados y discusión	113
7. DISCUSIÓN GENERAL	124
7.1 La base de datos:	124
7.2 Zonas homogéneas.....	125
7.3: El índice verde NDVI y las zonas homogéneas	128
7.4 Una aplicación de los datos regionales:	129
7.5 El Uso de la Tierra y las zonas homogéneas.....	130

<i>7.6 Productos colaterales y nuevas metas</i>	<i>131</i>
<i>8. BIBLIOGRAFÍA CITADA</i>	<i>133</i>

Prólogo

A continuación quisiera presentar la traducción de un fragmento del editorial de C. S. Holling al primer número de la revista ***Conservation Ecology*** que creo que, aunque los temas de la revista se alejan de los de esta tesis, fue la publicación que guió mis pensamientos durante la redacción de la presente.

“La ciencia de la Ecología está en transición. Están uniéndose escuelas previamente separadas de la ecología cruzando los límites de las escalas de trabajo. Están integrándose la política y la práctica de manera que demuestran que la ciencia es benéfica tanto en teoría como en práctica. La Ecología está combinándose con las ciencias medioambientales y con la comprensión social y económica. Es una transición hecha posible por un cuerpo de teoría, métodos, y ejemplos, que va madurando. Y viene en un momento en el que las políticas necesitan armonizar la interacción entre las personas y la naturaleza a escalas poco familiares como las regionales o globales.

Como en cualquier transición, hay defensores extremos de un punto de vista o del otro, un acercamiento u otro. Mucho de eso es exagerado por la experiencia limitada de las partes. Los ecólogos están sólo empezando a desarrollar el rango de experiencia necesario para unir ciencia, política, y política simplemente. Por otro lado, las personas de la política están generalmente poco familiarizadas con maneras de reconocer las nuevas interacciones que surgen ahora entre los sistemas económicos, sociales y ecológicos. Porque la ciencia está en transición, allí no sólo están chocando voces, allí están chocando modos de pregunta y están chocando criterios por establecer la credibilidad de una línea de argumento.

La velocidad de la transición está siendo manejada por la velocidad a la que los cambios regionales y globales están corroyendo la herencia natural del planeta” (C.S. Holling, 1998)

En este contexto, existen dos “culturas” de la Ecología: la analítica y la integrativa, cada una de ellas con sus ventajas y desventajas (tabla A). En esta tesis se ha decidido optar por el enfoque integrativo, por ser el que puede aportar más novedades en este campo de la ciencia, aunque reconozco (y he padecido) todas las “desventajas” que aparecen en la tabla.

De Holling, C.S. 1998. Two cultures of ecology. Conservation Ecology [online] 2(2): 4. Available from the Internet. URL: <http://www.consecol.org/vol2/iss2/art4/>

Tabla A: Dos culturas de la Ecología

ATRIBUTO	ANALÍTICA	INTEGRATIVA
Filosofía	<ul style="list-style-type: none"> Afinada y con objetivos claros Rechazo por experimentos parsimonia es su regla 	<ul style="list-style-type: none"> amplia y exploratoria múltiples líneas de evidencia convergente La simplicidad es la meta requerida.
Organización Percibida	<ul style="list-style-type: none"> Interacciones bióticas Ambiente fijo Única escala 	<ul style="list-style-type: none"> Interacciones biofísicas Auto-organización Múltiples escalas con interacciones “cruzadas”
Causación	<ul style="list-style-type: none"> única y separable 	<ul style="list-style-type: none"> múltiple y parcialmente separable
Hipótesis	<ul style="list-style-type: none"> única hipótesis y rechazo de hipótesis nulas falsas 	<ul style="list-style-type: none"> hipótesis múltiples que compiten. separación de hipótesis más que rechazo.
Incertidumbre	<ul style="list-style-type: none"> elimina la incertidumbre 	<ul style="list-style-type: none"> incorpora la incertidumbre
Estadísticas	<ul style="list-style-type: none"> clásicas experimentales concernientes con errores de tipo I 	<ul style="list-style-type: none"> Estadísticas no estándar concernientes con errores de tipo II
Objetivos de evaluación	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación por pares para alcanzar un consenso mutuo 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación por pares para alcanzar un consenso parcial
El peligro	<ul style="list-style-type: none"> Respuesta exacta a una pregunta mal formulada 	<ul style="list-style-type: none"> Pregunta correcta pero respuesta inservible

ZONAS HOMOGÉNEAS DE LA CUENCA DEL ARROYO DEL AZUL: ALGUNOS ASPECTOS DE SU DINÁMICA ANALIZADOS USANDO SENSORES REMOTOS Y SIG.

RESUMEN

Se zonificó la cuenca del arroyo Del Azul, Buenos Aires Argentina, mediante una regionalización de tipo paramétrica con base paisajística. Como un primer paso para el diagnóstico y evaluación de los recursos naturales de la zona, se analizaron las regiones delimitadas en relación con variables de interés agronómico e hidrológico, como el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) y el Uso/Cobertura de la Tierra (no usados como variables en la regionalización). Se utilizaron tres tipos de datos: temáticos, cartográficos y producto del análisis de datos de sensores remotos, que incluyeron variables estáticas y dinámicas. Mediante la aplicación de Análisis de Componentes Principales al conjunto de datos se obtuvo una regionalización objetiva que resultó en un reducido número de componentes que contienen la influencia de todas las variables originales. El NDVI, calculado con datos provenientes de los satélites NOAA-AVHRR, SPOT-VEGETATION y SAC-C, y analizado mediante Regresiones sobre Componentes Principales y Correlaciones Canónicas, fue totalmente compatible con las regiones definidas. Tal no es el caso para el Uso/Cobertura de la Tierra, parámetro que parece estimado a una escala diferente a la regionalización realizada, pero que fue de utilidad para definir el comportamiento hidrológico de la cuenca mediante el uso del parámetro Curva Número.

Palabras claves: Ecosistemas, Agroecosistemas, Agua, Sistemas de Información Geográfica, SIG, Sensores Remotos, Índice Normalizado de Vegetación, NDVI, Uso de la tierra, Cobertura de la Tierra, Análisis Multivariado, Componentes Principales, Regresión, Correlaciones Canónicas, Curva Número, Escorrentía superficial.

***HOMOGENEOUS ZONES OF AZUL CREEK BASIN: SOME DYNAMIC ASPECTS
ANALYZED BY REMOTE SENSING IN A GIS ENVIRONMENT.***

SUMMARY

The Azul creek basin, Buenos Aires Argentina was regionalised, based on a parametric-paisajistic technic. The defined regions were analyzed in connection with variables of agronomic and hydrological interest as a first step for the diagnosis and evaluation of the natural resources of the area. Three types of data were used: thematic, cartographic and remote sensing data including static and dynamic variables. The application of Principal Component Analysis yielded a reduced number of components containing the influence of all the original variables. With this method an objective regionalización was obtained. The regions were related with some parameters of hydrological importance, such as the Normalized Index of Vegetation (NDVI) and Land Use/ Land cover (both not used as variables in the regionalización).

The NDVI, calculated with data coming from NOAA-AVHRR, SPOT-VEGETATION and SAC-C satellites, and analyzed by means of Regressions on Principal Components and Canonical Correlations, was completely compatible with the defined regions. Land Use seems to operate at different scale as the one used for regionalisation but it was of utility to define the basin's hydrological behavior by means of Curve Number parameter.

Keywords: Ecosystems, Agroecosystems, Water, Geographical information Systems, GIS, Remote Sensors, Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, Land Use, Land Cover, Multivariate Analysis, Principal Components, Regression, Canonical Correlations, Curve Number, Surface runoff.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Aspectos generales

La Ecología Regional ha hecho contribuciones significativas en diversos campos (Noss, 1983, 1990; Hansson y Angelstam, 1991; Forman, 1995; etc.) aunque la mayoría de las investigaciones ecológicas se referencian en ecorregiones cuya definición se realizó de manera subjetiva o arbitraria (Fairbanks y Benn, 2000).

En los últimos años, se ha producido un cambio en la aproximación a la definición de ecorregiones, basándose en los trabajos pioneros de Host et al. (1996) y Wright et al. (1998). Anteriormente a éstos se han hecho diversos intentos para desarrollar estrategias orientadas a clasificar y agrupar los paisajes o las unidades de paisaje en sistemas jerárquicos de clasificación hasta que el término “ecorregión” fue definido (Crowley, 1967). Bailey (1976) combinó las ideas de Kuchler (1970) con información climática regional y delineó las primeras Ecorregiones para los Estados Unidos (zona continental).

Según Bailey (1983) las ecorregiones pueden considerarse como grandes ecosistemas de extensión regional que contienen en su interior a un cierto número de ecosistemas más pequeños. Son zonas que representan la asociación de ecosistemas definidos a mayor escala y tienen un funcionamiento que justifica agruparlas en grandes zonas.

Burkart et al (1999) definen Ecorregión como “un territorio geográficamente definido en el que dominan determinadas condiciones geomorfológicas y climáticas relativamente uniformes o recurrentes, caracterizado por una fisonomía vegetal de comunidades naturales y seminaturales que comparten un grupo considerable de especies dominantes, una dinámica y condiciones ecológicas generales y cuyas interacciones son indispensables para su persistencia a largo plazo.

El grado de heterogeneidad del territorio y la velocidad de cambio en sus manifestaciones favorece la desagregación con fines de estudio de sus recursos u ordenamiento de éstos (Valicenti, 2001).

Una gestión sustentable de los recursos naturales renovables necesita de una planificación regional consistente (De Pablo et al., 1993). La delimitación de regiones ecológicamente homogéneas puede ser la base de la definición de los potenciales productivos de una región, o puede servir para identificar usos incorrectos de los ecosistemas. La necesidad de los planificadores de saber “Qué? o quién? y dónde?” es el primer paso.

Los mapas de Ecorregiones y sus descripciones han sido usados por muchos investigadores y planificadores, para evaluar el alcance de datos tomados en sitios específicos y de resultados de investigaciones a escala regional (Ramsey et al., 1995). Por su parte, un marco ecológico que pueda integrar múltiples características de los ecosistemas de una región (ver por ejemplo Omernik, 1987; Gallant et al., 1995; Omernik, 1995; Wiken, 1986) favorece, según Fairbanks (2000) el intercambio de información y resultados de investigaciones entre investigadores, y además reduce el riesgo de duplicación de información a nivel gubernamental, cuando existen funcionarios capaces de interpretar los resultados.

La regionalización es el paso inicial del proceso que lleva al diagnóstico y evaluación del ambiente a escala regional. Responde a la necesidad de aplicar políticas de corrección, control o mejoramiento ante situaciones críticas del ambiente, ya que permite localizar los problemas y analizar espacialmente la estructura y el funcionamiento del territorio en cuestión.

Omernik (1987) hipotetizó que los ecosistemas muestran patrones regionales que son función del clima, el suelo, la vegetación y la fisiografía, y utilizó estas características para delimitar ecorregiones. Los mapas ecológicamente definidos representan hipótesis acerca de los factores que controlan la estructura y el funcionamiento del ecosistema (Rowe y Sheard, 1981; según Host et al., 1996). Por otro lado, al establecerse una jerarquía de variables, es posible plantear hipótesis de manejo y predecir los resultados mediante modelos analíticos (ver.: Hughes y Larsen, 1988; Nathan y McMahon, 1990; Beran et al., 1990).

De acuerdo a la Ecología del Paisaje, la introducción de energía en un sistema genera cambios en el paisaje por los cuales puede llegar a ser espacialmente heterogéneo en dos formas: como mosaico y como gradiente (Forman, 1995). En un gradiente, los elementos del paisaje cambian gradualmente, generando la heterogeneidad a través de un continuo de fluctuaciones. En esta representación no hay fronteras claramente definidas sino más bien un espacio de transición caracterizado por el constante aumento y disminución de un factor de acuerdo a la distancia (Forman y Godron, 1986). En un “paisaje mosaico” los elementos que lo componen son diferenciables unos de otros y se pueden reconocer límites entre parches adyacentes, originándose también una zona de borde con distintos efectos. De esta forma, los patrones de mosaico y gradiente son teóricamente conceptos excluyentes, pero en realidad pueden coexistir en el mismo paisaje. El concepto mosaico implica

idealmente discreción de elementos que lo forman y existencia de límites claros entre los parches vecinos. Por supuesto, el paisaje también puede estar compuesto de elementos que cambien gradualmente de unos a otros y en los cuales los límites no estén bien definidos, dependiendo de las escalas de percepción y análisis.

La idea de que las ecorregiones son factibles de delimitar, basándose en características mapeables, y que existen al momento herramientas como los SIG y las imágenes satelitales para evaluarlas, lleva a plantear una metodología para la delimitación y definición de ecosistemas regionales en la cuenca del arroyo Azul, Argentina, como se verá más adelante.

1.2 Criterios de regionalización

Mabbut (1968) y Malvárez (1993) presentan tres enfoques posibles para encarar la subdivisión del espacio en ecorregiones:

- a) **Genético:** se basa en la identificación de relaciones causales entre factores ambientales y subdivide el espacio sobre la base de esas relaciones en forma jerárquica (se definen factores con distinta importancia).
- b) **Paisajístico:** se apoya en que el paisaje es el resultado de la acción conjunta de todos los factores y que es imposible atribuirlo a ningún factor en particular. En el mismo, el espacio está subdividido de forma jerárquica. Por ejemplo, Paisajes contenidos en Subregiones, las que están contenidas en Regiones (Valicenti, 2001).

- c) **Paramétrico:** Supone que la cuantificación de los factores evita la subjetividad, confiere rigurosidad científica, y facilita las comparaciones.

Los dos últimos enfoques tienen una base “multivariada” de percepción, aunque el paramétrico parece ser más apropiado para plantear hipótesis sobre el funcionamiento del ecosistema, pues puede aportar una evaluación cuantitativa de la jerarquía de factores de organización.

De cualquier manera, en esta tesis se considera que ninguno de los tres enfoques es excluyente del otro, y los tres serán usados para interpretar los resultados obtenidos.

1.3 El análisis multivariado y la regionalización ecológica

Según Gallopín (1982) y Gazia et al. (1982), una metodología objetiva para la regionalización es la subdivisión del área de estudio en Elementos Ambientales Unitarios (EAU) y un posterior agrupamiento o clasificación de los mismos mediante técnicas de análisis multivariado. Para la definición de las EAU existen dos alternativas: subdivisión del espacio territorial en unidades geométricas regulares ("artificiales"), o en unidades irregulares, basadas en algunas características observadas (o "naturales").

La metodología tradicional de superposición de mapas temáticos se vuelve poco operativa al considerar una gran cantidad de variables, por lo que es necesario eliminar de alguna manera aquellas que aportan poca información o información redundante. Una forma objetiva de hacerlo es mediante la aplicación, sobre la matriz de datos original, de un análisis multivariado tal como el de Componentes Principales. De esta manera se obtienen

nuevas variables (factores) que son combinación lineal de las originales, y nuevos valores de las mismas (escores factoriales) en cada EAU.

Para el análisis de los datos existen varias técnicas multivariadas aplicables a la regionalización como Análisis de Componentes Principales, Análisis de Factores, Análisis de Agrupamiento (Cluster), y otros. A partir de cada una de éstas se obtienen distintos resultados (Nathan y McMahon, 1990), por lo que la elección de la técnica apropiada es de gran importancia para obtener resultados coherentes con los objetivos planteados.

Una variedad de métodos han sido usados para mapear ecosistemas a escala de paisaje. Por ejemplo Allen y Wilson (1991) y Palik et al. (2000) usan Funciones Discriminantes con datos de vegetación y variables ambientales para mapear vegetación potencial. Por otro lado los modelos de árbol de decisiones también han sido exitosos (Moore et al., 1991; Lynn et al., 1995).

Host et al. (1996) realizan una primera aproximación al desarrollo de clasificaciones de ecosistemas usando análisis de componentes principales, pero definen los límites de clasificación de una forma arbitraria (usando los límites de mapas escala 1:250000). Esta decisión, basada en límites “artificiales” podría llevar a que se subestime o sobreestime la varianza de variables que luego son usadas para definir los límites de ecosistemas regionales. Una solución posible a este problema puede ser la definición de un área de clasificación que presente menos conflictos de límites externos, como los límites de una cuenca hidrográfica (Rafaelli y Pérez Ayala, 2000), donde uno de los componentes más importantes del ciclo del agua, como el proceso de precipitación-escorrentía se puede considerar como cerrado.

1.4 Los Sistemas de Información Geográfica y el manejo de la información Ecológica.

1.4.1 Aspectos generales

Un serio problema que enfrentan los investigadores sobre recursos naturales son los métodos de evaluación, porque la actualización de la información que debe ser actualizada por sus características dinámicas no es continua, y en base a esta información se plantean las políticas de uso y manejo de los recursos naturales. Todo esto lleva a resultados poco representativos repercutiendo de forma negativa sobre el uso y manejo de los mismos.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en nuevos elementos de identidad territorial en el ámbito de la nueva sociedad de la información. Su valor más esencial reside en las posibilidades que ofrecen para mostrar la realidad geográfica de la cual dependen la mayoría de las actividades del hombre. El análisis de la información geográfica describe los elementos espaciales en función de su posición en la superficie terrestre, de sus atributos temáticos y de las relaciones entre ellos en un tiempo concreto, permitiendo a la sociedad disponer de los suficientes elementos de juicio para afrontar decisiones de futuro con el rigor necesario.

Un SIG es un tipo especial de base de datos capaz de manejar datos espacialmente referenciados, los cuales pueden representarse gráficamente como imágenes. Entre las posibilidades de un SIG se destaca su capacidad de trabajar conjuntamente con un grupo de mapas de la misma porción del territorio, en los que un lugar concreto posee siempre las mismas coordenadas geográficas. Entre las bondades de un SIG se destaca la de poder

relacionar y gestionar distintos tipos de información, predecir, estimar, visualizar, realizar seguimientos temporales, etc. (Eastman, 1997).

1.4.2 Aspectos metodológicos

La mayor potencialidad del GIS como herramienta para una regionalización de base paramétrica se encuentra en la posibilidad del procesamiento y representación espacial de matrices numéricas georreferenciadas (GIS con base raster, Burrough 1986), con la posibilidad de importación y exportación de los datos a planillas de cálculo y/o bases de datos.

Por otro lado, las posibilidades de procesamiento de imágenes que poseen estos sistemas aportan un sustrato óptimo para visualizar espacialmente los resultados obtenidos mediante un análisis numérico.

El papel del SIG en esta metodología es, entonces, la ordenación espacial de los nuevos datos en un mapa que es combinación de las variables que explican la mayor parte de la varianza original contenida en la matriz de datos de partida.

Por otro lado, la elaboración de una imagen de falso color compuesto agrupando los componentes de mayor varianza explicada puede ser un sustrato apropiado para la subdivisión en zonas homogéneas, ya sea por interpretación visual o agrupamiento de los nuevos valores de los EAU.

La ventaja de utilizar esta técnica es la reducción drástica en el número de variables a utilizar y la posibilidad de utilizar una combinación objetiva de todas las variables consideradas *a priori* en la regionalización.

1.5 El uso de las imágenes de satélite en la descripción de la vegetación:

La información proveniente del estudio dinámico de la vegetación es crucial para comprender procesos que ocurren en los ecosistemas a nivel regional como los ciclos del carbono, la productividad primaria de la superficie terrestre, el balance energético y las variaciones en los ciclos hidrológicos (Tucker et al., 1986; Schmidt y Karnieli, 2000).

Al momento, la mayoría de los trabajos realizados por especialistas en sensores remotos y por ecólogos para mapear y categorizar paisajes, han sido estáticos en su naturaleza (Ramsey et al., 1995). Es decir, un único momento del tiempo es considerado representativo del área en cuestión. A pesar de la evidente limitación de este tipo de información, se generan mapas de cobertura de la tierra y las áreas se agrupan en grandes regiones con base ambiental o ecológica. Una justificación de este tipo de análisis es el enorme esfuerzo económico, operativo, etc., que implica un seguimiento en el tiempo y en el terreno de todas las variables utilizadas. El advenimiento de las nuevas tecnologías, como los sistemas de sensores remotos, los ordenadores y el software SIG, posibilitan este seguimiento con un esfuerzo razonable.

Las imágenes de satélite son tomadas por los sensores de recursos naturales (LANDSAT , SPOT, ERS, SAC-C y otros) en forma periódica sobre toda la cobertura terrestre, por lo que podrían ser utilizadas como herramientas para monitorear los cambios temporales y espaciales que se producen en los ecosistemas a escala local, regional y global.

Desde los 80, Investigadores de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration de EEUU) realizaron cálculos de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a partir de imágenes de sus satélites AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Este instrumento mide la reflectancia de la superficie terrestre a diversas longitudes de onda, entre las cuales están las usadas para el cálculo del NDVI. De la misma manera, otros satélites que poseen bandas en el rojo e infrarrojo cercano fueron usados con el mismo objetivo (Lyon et al., 1998; Marsh et al., 1993; Qui et al., 1993)

Las plantas muestran un fuerte pico de absorción causado por los pigmentos fotosintéticos en longitudes de onda cercanas a los 700 nm, hecho que contrasta con una fuerte reflexión de las longitudes de onda del infrarrojo cercano. Por su parte, los suelos desnudos se caracterizan por un incremento suavemente monotónico de la reflectancia a medida que aumenta la longitud de onda, y los cuerpos de agua se comportan de manera inversa, con absorciones importantes en todas las longitudes de onda (exceptuadas aquellas correspondientes al azul (450-550 nm.)). Teniendo en cuenta las características citadas, es posible definir un índice que estime la “densidad de biomasa verde” o “densidad de clorofila” basándose en datos radiométricos.

Este índice se define como la diferencia entre los canales de Infrarrojo cercano y Rojo, dividido por la suma de estos canales:

$$\text{NDVI} = \text{Irc-R} / \text{Irc+R}$$

Donde: NDVI: Índice Normalizado de Vegetación

Irc: Reflectancia de la superficie de la tierra en el intervalo del espectro electromagnético correspondiente a 725-1100 nm (Infrarrojo cercano).

R: Reflectancia de la superficie de la tierra en el intervalo del espectro electromagnético correspondiente a 580-680 nm (Rojo).

Este índice resulta en valores entre -1 y 1 , en relación directa con la cobertura vegetal verde presente en cada píxel (Tucker, 1979 ; Tucker y Sellers, 1986).

Diversos autores han intentado transformar los valores de NDVI para ajustarlos a condiciones locales de suelo con baja cobertura, inundados, etc., pero se ha demostrado experimentalmente que si los índices son escalados dentro del mismo rango, tienen características espaciales y estadísticas similares. Según la teoría matemática, aportan la misma información para la detección de cambios temporales (Lyon et al., 1998). Por esta razón para este trabajo, se decidió utilizar el NDVI como indicador de los cambios temporales por ser el más antiguo y de más amplio uso en la literatura.

Varios intentos se han hecho para interpretar series de tiempo de NDVI con el objeto de estimar la productividad, el índice de área foliar o la absorción de CO_2 de la atmósfera por la vegetación de la superficie terrestre, basándose en el aumento de la cobertura vegetal (Tarpley et al., 1984; Sellers, 1985; Tucker y Sellers, 1986; Sellers et al., 1992; Lüdeke et al., 1996), para clasificar a escala regional por tipos de cobertura (Tucker et al., 1985; Derrien et al., 1992) o para relacionar el NDVI con las Ecorregiones (Ramsey et al., 1995).

Sin embargo, no existen hasta el momento en la bibliografía analizada estudios que utilicen los atributos anteriormente citados de la cobertura vegetal, para caracterizar en forma dinámica las ecorregiones que ocupan.

1.6 Proceso de precipitación-escorrentía en una cuenca y el paisaje

Cada paisaje consiste de un mosaico de factores que determinan la distribución espacial de la respuesta hidrológica de los ecosistemas (Andersson y Sivertun, 1991). Una profunda influencia ejerce el hombre sobre la respuesta de los Agroecosistemas, al modificar la cobertura vegetal y la infiltración de los suelos con sus prácticas agrícolas (Wu, 1997).

La teoría generalmente aceptada de la generación de escorrentía está basada en el concepto de área de contribución, donde cada zona dentro del área de estudio puede actuar como de recarga o descarga durante un evento de precipitación o derretimiento de nieves. La extensión de las áreas que contribuyen a la descarga varía dinámicamente de acuerdo a su condición de saturada- no saturada definida por las condiciones de humedad antecedente. Por otra parte, la respuesta hidrológica depende del perfil del suelo y de la comunidad vegetal presente antes y después de un evento de precipitación-escorrentía de la siguiente manera:

- 1) Por un lado la comunidad vegetal influye a largo plazo en la capacidad de retención del suelo, modificando su porosidad, a mediano plazo definiendo el proceso de evapotranspiración, y a corto plazo interceptando las gotas de lluvia.
- 2) La posición de un suelo con respecto a la pendiente del terreno modifica drásticamente su capacidad de retención de agua durante eventos discretos de precipitación (Hawley et al., 1983).

Estos dos parámetros pueden ser evaluados eficientemente con la ayuda de un SIG e imágenes de satélite.

La definición previa de zonas agroecológicamente homogéneas puede dar un marco de referencia sobre la superficie y los rangos en los cuales los parámetros a definir pueden variar. Sin la ayuda de un sistema que pueda integrar la información acerca de los factores que controlan el comportamiento hidrológico, es difícil de determinar la distribución y el comportamiento de los diferentes elementos del paisaje, por lo que un Sistema de Información Geográfica (SIG) puede ser una herramienta fundamental para la definición de sub-cuencas y la búsqueda de parámetros cuando se intenta modelar el comportamiento hidrológico de una zona.

Para evaluar el comportamiento hidrológico de una zona, es posible utilizar diferentes modelos, algunos enfocados en el escurrimiento (exceso) y otros en las pérdidas (Pilgrim y Cordery, 1993). La elección y la validez del modelo elegido dependen del tipo de problema, de los datos disponibles y de los mecanismos de escorrentía prevalentes (Silveira et al., 2000). En este caso, se ha elegido utilizar un modelo ampliamente probado de precipitación-escorrentía, que permite una aproximación empírica usando los parámetros de la “curva número” (Soil Conservation Service, 1972) por el tipo de datos disponibles y por tratarse de una cuenca principalmente asentada en una llanura.

Varios estudios han sido realizados principalmente en la década pasada para incorporar los SIG en el modelado hidrológico de cuencas. Estos estudios, según Melesse y Shih (2002), pueden agruparse en cuatro categorías:

- Computación de parámetros de entrada para modelos hidrológicos existentes (Muzik y Pomeroy, 1990; Stuebe y Johnson, 1990; Olivera y Maidment, 1999)

- Evaluación hidrológica (Moeller, 1991; Ragan y Kossicki, 1991) principalmente el mapeo y despliegue de factores hidrológicos.
- Mapeo de la superficie de cuencas hidrográficas (Sasowsky y Gardner, 1991; Smith y Brilly, 1992)
- Identificación de unidades hidrológicas de respuesta (Vieux, 1991; Melesse y Shih, 2002).

En este caso, enmarcado dentro de la primera categoría expuesta, la estimación de la humedad antecedente puede llevar a respuestas inadecuadas de los modelos de simulación de la escorrentía superficial cuando se estiman los datos para cuencas de media o gran extensión con pendientes suaves (Silveira et al., 2000) por lo que la ayuda del SIG para definir ajustadamente estos parámetros se hace crucial.

Por otro lado, una estimación de la cobertura vegetal (de importancia para la definición de los valores de curva número) es posible de realizar utilizando percepción remota. Con el sensor AVHRR de NOAA, se han hecho innumerables intentos exitosos (Lüdeke et al., 1996; Tucker, 1979; Tucker y Sellers, 1986; Sellers et al., 1992; entre otros)

1.7 Definición de las variables a utilizar

Los esfuerzos realizados en la delimitación de ecorregiones varían en cuanto a las variables utilizadas, dependiendo de la escala a la cual se intenta subdividir el espacio en ecosistemas regionales y de los objetivos planteados. Por ejemplo, Bailey (1983) basa su clasificación de los Estados Unidos en criterios climáticos, de vegetación potencial, fisiografía, patrones de uso de la tierra y suelos, y Nathan y Mc.Mahon (1990) lo hacen únicamente en función de variables relacionadas con el ciclo del agua.

Teniendo ésto presente y con el objetivo futuro de modelar el comportamiento hidrológico del ecosistema durante eventos de grandes lluvias, se procedió a recabar toda información pertinente, que consistió en mapas temáticos de suelos, fisiografía, topografía, precipitaciones y datos de campo de la cuenca del arroyo Del Azul. Este conjunto de datos se consideró representativo de las principales variables que controlan la dinámica del agua en una cuenca hidrográfica, sometida a un uso de la tierra como el de la estudiada.

1.8 Objetivo general

El fin de este trabajo fue organizar la información disponible en una base de datos SIG y establecer zonas ecológicamente homogéneas en la cuenca del arroyo Del Azul, que por su escala y características pudieran ser de amplia utilidad,. Para ello se utilizó una metodología objetiva y, posteriormente se analizó la posibilidad de uso de la regionalización obtenida para aplicaciones agronómicas e hidrológicas, mediante la relación entre las zonas y dos atributos relevantes como lo son la cobertura del suelo y la Curva Número, variables que definen el proceso de precipitación - escorrentía,.

2. LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación geográfica y descripción de la zona de estudio

La pampa deprimida comprende aproximadamente 10 millones de hectáreas, ubicadas en la zona centro - este de la provincia de Buenos Aires, entre los paralelos 35° y 38° de latitud sur y los meridianos 57° y 62° de longitud oeste. Limita al norte con la pampa ondulada, al sur con el sistema de Tandilia, al oeste con la pampa semiárida y al este con el océano Atlántico.

Esta zona incluye dos depresiones: la del Salado y la de Laprida. La depresión del Salado comprende 28 partidos de la provincia de Buenos Aires y ocupa una superficie de siete millones y medio de hectáreas (Figura 1.1).

El partido de Azul (Figura 1.1) es uno de los partidos que forma parte de la depresión del Salado. Se encuentra ubicado en la zona centro de la provincia de Buenos Aires entre las coordenadas geográficas 36° 58'30" y 37° 20'23" de latitud sur y 58° 59'21" y 60° 10'50" de longitud oeste. Tiene una superficie total de 661.500 ha, las que representan el 2,6% de la superficie bonaerense. A su vez está dividido políticamente en 21 cuarteles o distritos.

Cuenca del Salado

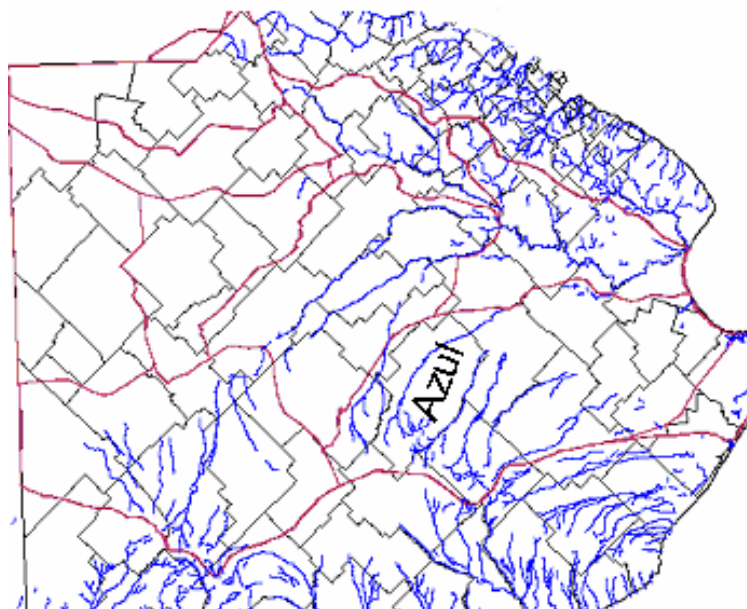


Figura 1.1: Ubicación del Partido de Azul dentro de la cuenca del Salado (En Marron). Límites de subcuencas en marron, cursos de agua en azul, y límites de partidos en gris.

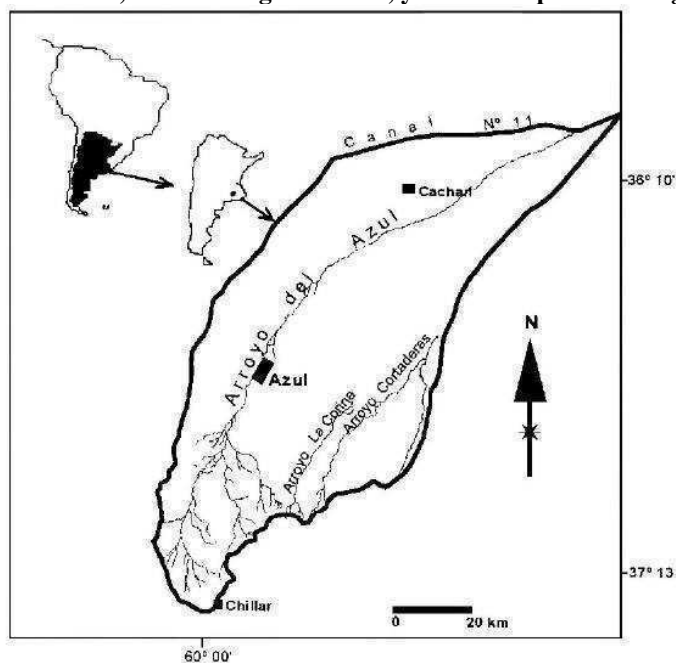


Fig. 1.2: Ubicación de la cuenca en Argentina y Sudamérica

La cuenca del arroyo Del Azul (Fig. 1.2) forma parte de la cuenca del Salado y vierte sus aguas por medio del arroyo Del Azul y el canal N° 11. Ocupa principalmente el partido del mismo nombre, extendiéndose en sus límites más extremos a otros partidos como Tapalqué, Las Flores, Rauch, y Olavarría. Esta cuenca posee como drenaje superficial cursos de agua permanentes en su mayoría, tales como los arroyos Del Azul, Videla, y Santa Catalina, y cursos de agua transitorios como La Corina y Cortaderas.

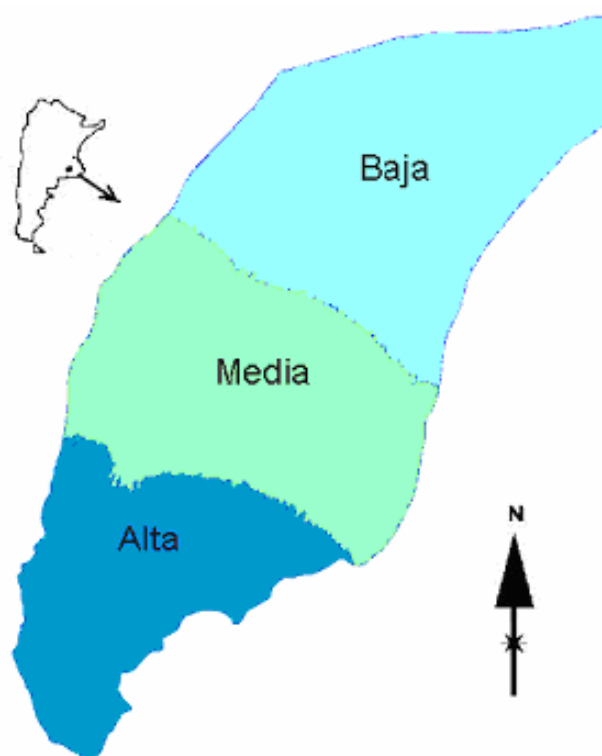


Figura 1.3 División de la cuenca en alta, media y baja.

La cuenca corre en sentido Sudoeste-Noreste y ocupa una superficie de 6236 km² (datos propios). En trabajos hidrológicos previos se identifican tres zonas: (Ver figura 1.3) la cuenca alta (donde nace el arroyo Azul y posee dos arroyos tributarios, Videla y Santa Catalina), la cuenca media (donde la pendiente general provoca que los cursos de agua se

hagan casi paralelos), y la cuenca baja (zona de desembocadura del arroyo Del Azul y sus tributarios en el canal N° 11 (límite artificial de la cuenca). Sus límites geográficos son: 35° 58'56" y 37° 20'23" de latitud sur y 58° 48'8" y 60° 10'50" de longitud oeste.

La cuenca del arroyo Del Azul es objeto de inundaciones recurrentes, que pueden ser clasificadas en dos tipos (IHLLA, 2003):

1. ***Anegamientos regulares***: Afectan principalmente a la cuenca baja y ocurren durante el otoño - invierno con una duración variable de alrededor de 1 a 3 meses. Los mismos son provocados por la combinación entre la baja permeabilidad de los suelos de esta zona, y el régimen de lluvias en esas estaciones. Ocurren generalmente todos los años.
2. ***Anegamientos extraordinarios***: Sucesos que ocurren debido a precipitaciones excepcionales (1980, 1985, 1992, 1998, 2001) en los cuales no puede definirse una periodicidad (IHLLA, 2003). Estos eventos extraordinarios ocurren en la cuenca media (zona de asentamiento de la ciudad de Azul) y baja, y son provocados principalmente por una combinación de factores como: grandes lluvias y uso agrícola del suelo que provoca una disminución de la cobertura vegetal en ciertas épocas del año.

2.2 Suelos de la cuenca

La cuenca alta se caracteriza por la presencia de ambientes periserranos (Figura 1.4) con afloramientos rocosos distribuidos irregularmente en el terreno y ambientes ondulados de piedemonte donde el relieve se presenta con suaves lomadas y es interrumpido por

numerosas vías de escurrimiento. Es posible observar en esta zona el comienzo de la planicie de derrame y las llanuras aluviales de los arroyos.

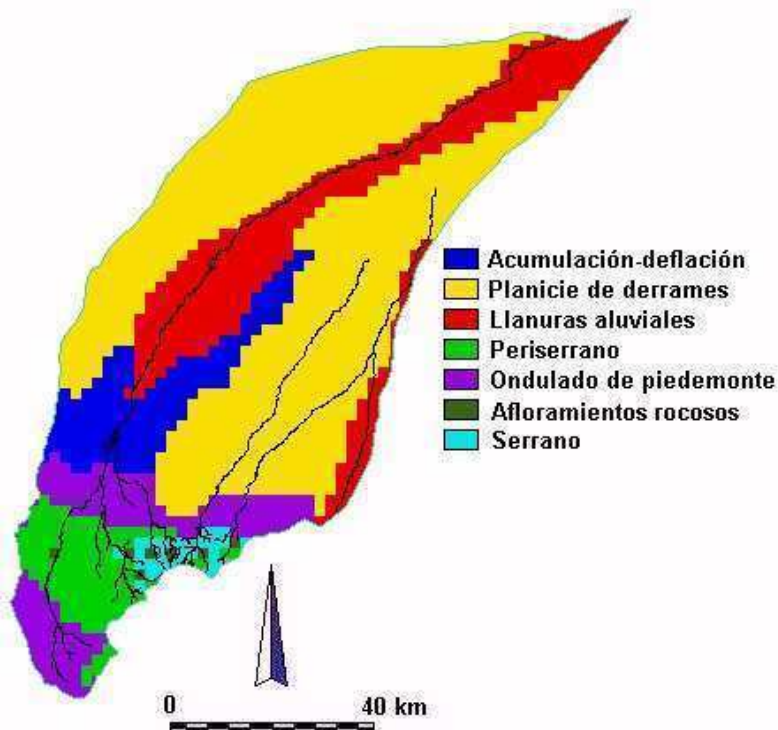


Figura 1.4: Ambientes fisiográficos de la cuenca del arroyo Del Azul (Piscitelli y Sfeir, 1993).

La cuenca media del arroyo se puede caracterizar por llanuras aluviales que se disponen a las orillas de los cauces de los arroyos en forma paralela. También se encuentran planicies de derrame con relieve muy plano, numerosos cauces inestables o antiguos que se anegan en época de lluvias intensas; ambientes de acumulación-deflación con relieves ondulados muy suavemente y, donde se alternan las lomadas con las cubetas de deflación eólicas. En menor medida se pueden observar ambientes periserranos, serranos y de piedemonte.

Finalmente, la zona correspondiente a la cuenca baja del arroyo se corresponde con planicies de derrame y llanuras aluviales de iguales características que las citadas para la cuenca media y en menor medida es posible observar ambientes de acumulación-deflación. Las pendientes son muy suaves, del 1 al 5 por mil (datos propios según modelo digital de terreno)

De acuerdo a la clasificación en Grandes Grupos (Soil Taxonomy, 1975) se han identificado en el partido de Azul los siguientes suelos: Argiudoles, Argialboles, Natracuoles, Natracualfes, Hapludoles y complejos indiferenciados (aluviales) ubicados generalmente bordeando los arroyos (INTA, 1992).

En la zona correspondiente a las nacientes del arroyo Del Azul (cuenca alta; sudoeste) predominan suelos Argiudoles (Figura 1.5), ocupando pequeñas lomas que emergen entre la planicie aluvial, o depresiones entre los afloramientos rocosos. En general se trata de suelos bien drenados y neutros; que presentan horizontes A y B bien desarrollados, estando el primero moderadamente bien provisto de materia orgánica y el segundo, enriquecido en arcillas y con valores variables de carbonatos. Luego, en orden de importancia areal, se encuentran también suelos del tipo Hapludoles, Natracualfes, Aluviales y Natracuoles.

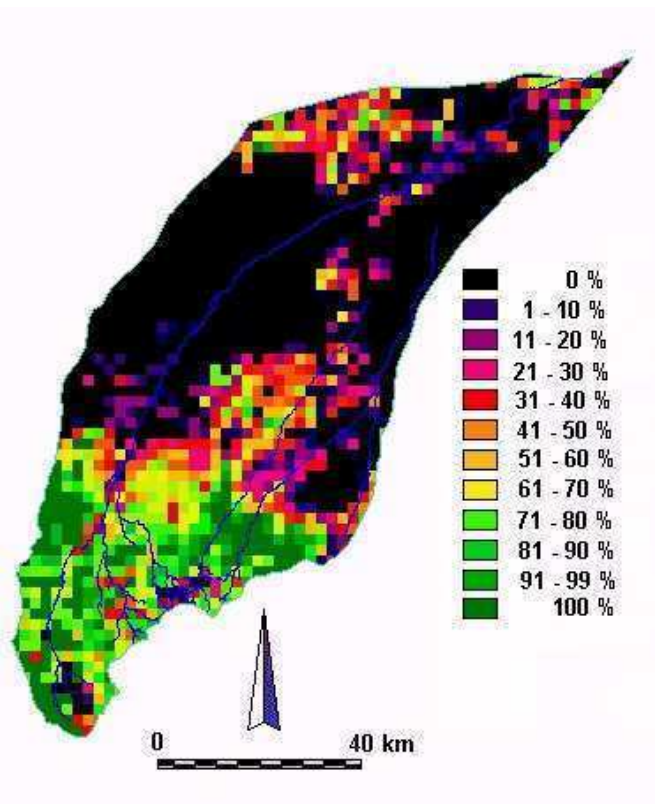


Figura 1.5: Porcentaje de Argiudoles. Cada píxel representa un área de 4 km².

En la cuenca media, principalmente hacia el Este, predominan los suelos Natracualfes (Figura 1.6), con un horizonte A delgado y claro, con estructura degradada por la presencia de sodio, y los Natracuoles (con mayor cantidad de materia orgánica). Estos dos grupos de suelos presentan restricciones severas para el desarrollo de los cultivos. En zonas restringidas, existen también Argiudoles, los cuales son generalmente aprovechados para la implantación de cultivos, tanto de invierno como de verano.

Lic. Marcelo Luciano Gandini

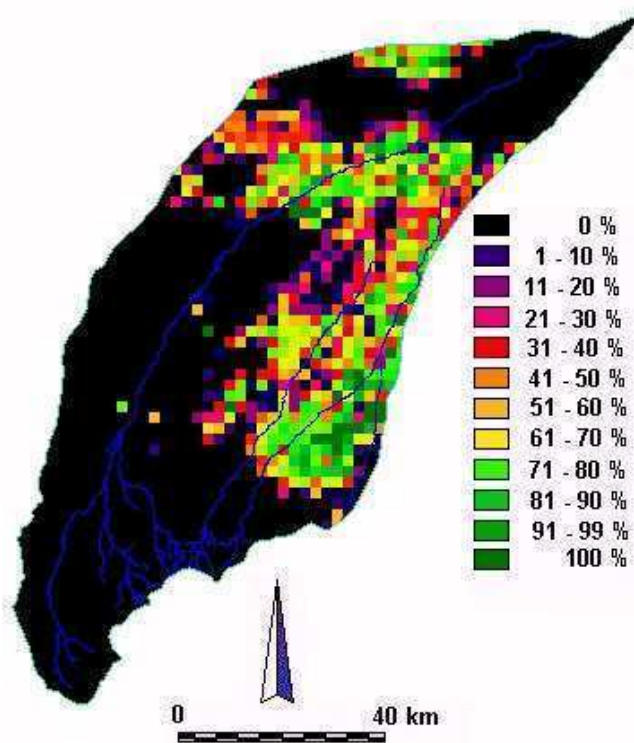


Figura 1.6: Porcentaje de Natracuolfes. Cada píxel representa un área de 4 km².

La cuenca baja (zona Norte) y la centro-Oeste presentan altos porcentajes de cobertura de suelos Natracuoles (Figura 1.7) que ocupan terrenos llanos, producto de la acción fluvial casi sin presencia de lomas, con un horizonte A muy delgado y un horizonte B en el que se observan signos de hidromorfismo y tenores de sodio que alcanzan más del 45% del complejo de intercambio. Debajo del horizonte B es posible hallar un horizonte petrocálcico (tosca). También están presentes en la zona aunque en muy menor proporción suelos de los subgrupos Natracuolfes, Argiudoles y Aluviales.

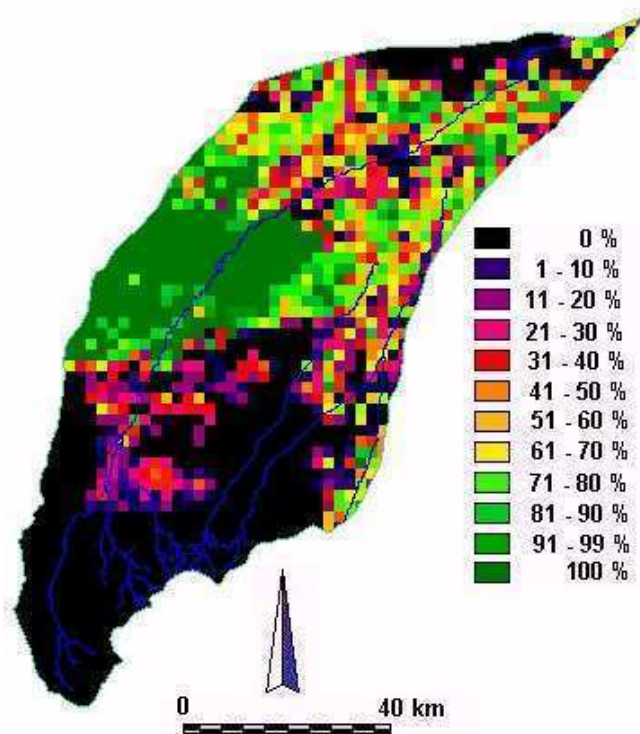


Figura 1.7: Porcentaje de Natracuoles. Cada píxel representa un área de 4 km².

Esta región se caracteriza por presentar problemas de drenaje pues la casi totalidad de sus suelos son sódicos desde la superficie o los primeros 40 cm de profundidad. El agua superficial escurre de manera que produce anegamientos muy frecuentes y deposita, algunas veces, capas limo-arcillosas con sales que provocan la dispersión de las arcillas.

2.3 Clima

En cuanto al clima, según la clasificación de Köppen (1918), la zona se caracteriza por ser templado húmeda con influencia oceánica, inviernos suaves, veranos cortos y

frescos y presenta todas las estaciones húmedas. La temperatura media anual es de 13,9°C, siendo 21,2°C la del mes más cálido y 6,3°C la del mes más frío. La temperatura máxima media de enero (mes más cálido) es de 28,5°C con una máxima absoluta de 34,5°C. El período libre de heladas es de 208 días, siendo la primera helada alrededor del 04/05 ± 26 días y la última el 08/08 ± 24 días. El régimen de precipitaciones presenta una distribución normal, (con una media anual de 850,4 mm hasta 1980 y de alrededor de 970 mm entre 1980 y 2000) concentrándose la mayor proporción en el período primavera-estival, siendo marzo el mes más lluvioso (IHLLA 2003).

2.4 Sistemas de producción agropecuarios

La agricultura y la ganadería son las principales actividades que se llevan a cabo en la zona rural de la cuenca Del Azul. En suelos bajos e intermedios (Natracuoles y Natracualfes) se desarrolla la actividad ganadera con énfasis en la cría de ganado vacuno. Vacas, toros, novillos, terneros, terneras, novillitos y vaquillonas conforman principalmente el stock ganadero que, generalmente, se destinan a remates feria dentro y fuera de la zona, a otros establecimientos dentro y fuera del partido de Azul, a la Comunidad Económica Europea, al Mercado de Liniers, frigoríficos y mataderos.

En los suelos altos se lleva a cabo la agricultura con predominio de algunos cultivos. El orden de importancia en cuanto a superficie sembrada es el siguiente: trigo, soja, maíz, girasol, alpiste y lino.

Los productores del partido comercializan su producción a través de casas cerealeras que funcionan en Azul o en la zona y las cooperativas agrarias. La proporción de productores que operan directamente con agentes portuarios o intermediarios es muy baja. Los puertos de operación son básicamente Quequén y Buenos Aires, siguiéndole luego Bahía Blanca y Rosario.

Otras actividades que contribuyen a la economía del partido, aunque en menor escala, son la producción lechera que no resulta significativa en cuanto al número de tambos y cantidad de vacas de ordeño, aunque ha logrado una alta integración con la agroindustria local, la producción frutihortícola y la producción apícola.

2.5 Vegetación Natural: Comunidades Vegetales

La pampa deprimida suele ser asociada territorialmente a la depresión del Salado y a la depresión de Laprida las que, en conjunto, ocupan una superficie de 7.5 millones de ha (Soriano, 1975). El bajo potencial de escurrimiento superficial no sólo influye fuertemente en la morfogénesis y la pedogénesis, sino también en la naturaleza de la vegetación y en los requerimientos de manejo de las tierras (Valicenti, 2001).

Vervoost (1967) indica que la mayoría de los paisajes de la pampa se presentan como mosaicos intrincados, lo que induce a la necesidad de establecer varios niveles de desagregación en la concepción de estudios integrales de la cuenca del Salado.

León (1976) define doce unidades de vegetación agrupadas en cuatro comunidades

vegetales que las denomina A, B, C y D para la zona de Castelli-Pila pero es posible, con algunas variaciones extender esta clasificación para toda la cuenca del Salado. Estas comunidades son posibles de reconocer y delimitar a escala de potrero, caracterizando a su vez los distintos tipos de suelos y posiciones topográficas.

La comunidad A o de loma, es característica de las tierras altas, asociada a suelos bien drenados y no inundables (Argiudoles), esto le permite ser reemplazada por pasturas cultivadas o agricultura. Es característica de esta comunidad la presencia de especies que forman matas fuertes y abundancia de cardos. Botánicamente se la diferencia por la presencia de dicotiledóneas exclusivas y la dominancia de algunas gramíneas. Las especies más conspicuas son: *Paspalum dilatatum*, *Bothriocloa laguroides*, *Stipa neesiana* y *Piptochaetium bicolor*.

La comunidad B o de media loma, sigue a la anterior y se constituye en suelos menos profundos (hapludoles), salinos y no bien drenados. No presenta especies exclusivas y se distingue por la dominancia de algunas gramíneas y dicotiledóneas. Dominan en este caso *Piptochaetium montevidense* y *Stipa papposa*, acompañados de *Stenotaphrum secundatum* y *Ambrosia tenuifolia*.

La comunidad C o de bajo dulce ocupa la posición cóncava del relieve, estando asociada a acuíferos freáticos cuyo nivel está muy próximo a la superficie (suelos Argialboles). Esto es una ventaja para la producción ganadera en cuanto a que permanece húmeda durante más tiempo, siendo en las sequías estivales la principal fuente de forraje. Se distingue de las otras comunidades en que permanece verde todo el año. Se destacan *Eleocharis spp.*, *Leersia hexandra* y *Alternanthera philoxeroides*.

Finalmente, la comunidad D o de bajo alcalino presenta severas condiciones de alcalinidad y serias limitantes de drenaje (suelos Natracuoles y Natracualfes). Esta comunidad se destaca por la escasa cobertura de los suelos y una baja riqueza florística, con amplia dominancia de *Distichlis spp.* Acompañado de *Paspalum vaginatum*, *Ambrosia tenuifolia*, *Salicornia ambigua* y *Spartina densiflora*.

3. DELIMITACIÓN DE ECOZONAS

3.1 Metodología de regionalización

3.1.1. Variables y criterios de selección

Se contó con información proveniente de distintas fuentes, la cual fue analizada y procesada mediante dos Sistemas de Información Geográfica: ILWIS 2.2 (ITC, 1998) e IDRISI 2.0 Rev. 2 (Eastman, 1997). Un área rectangular abarcando la cuenca a estudiar, fue dividida mediante una grilla regular en 4560 celdas (EAU) de 4 Km² cada una. De la misma, se tuvieron en cuenta 1575 celdas que estaban incluidas dentro de la cuenca (6300 km²).

Las variables utilizadas fueron elegidas teniendo en cuenta cuáles son los principales componentes ambientales de la producción agropecuaria de la región, y las variables que afectan el proceso de precipitación-escorrentía en una cuenca hidrográfica. Fue así como se recopilieron algunas variables, y, otras como el Uso/Cobertura de la Tierra o las lluvias, se evaluaron con datos de campo, o se realizaron campañas específicas para su recolección. A continuación se presenta una descripción de las variables utilizadas.

3.1.1.1 Fisiografía

Esta variable provino de la digitalización del mapa fisiográfico elaborado por Piscitelli y Sfeir (1993) y de la estimación del porcentaje de cobertura de cada ambiente. En dicho mapa se reconocen ambientes serranos, peri serranos, ondulados de piedemonte, de acumulación-deflación, de planicies de derrame, de llanuras aluviales y afloramientos

rocosos en el área cubierta por el partido de Azul. Para la superficie restante de la cuenca, se debió interpretar una imagen Landsat TM (Falso Color Compuesto, bandas 3, 4 y 5) para completar la delimitación de aquellos ambientes que excedían estos límites políticos (Figura 3.1). La proyección del mapa se corrigió mediante la ubicación de puntos en coordenadas de Gauss-Kruger, utilizando un modelo polinómico de segundo orden, previo a la incorporación al SIG.

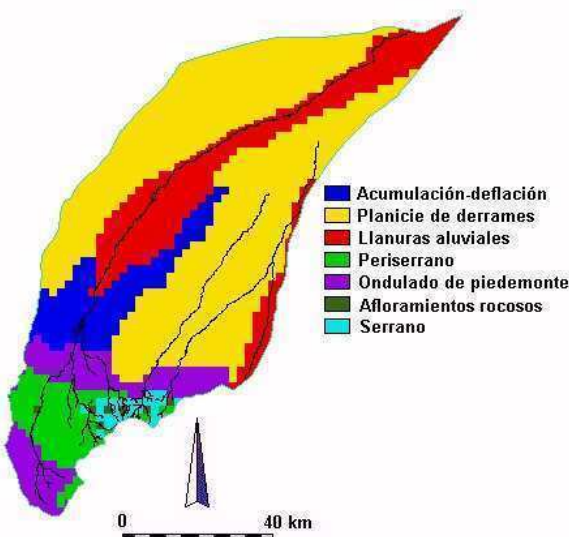


Figura 3.1. Asignación a cada píxel (EAU) de la cuenca del arroyo Del Azul, de tipo de ambiente fisiográfico según las categorías de clasificación de Piscitelli y Sfeir (1993).

Las principales características de estos ambientes, son:

Ambiente serrano: constituido por cerros que presentan afloramientos de roca consolidada, laderas de roca alterada y suelos poco profundos. Sus valles, encajonados,

frecuentemente conforman las cabeceras de los afluentes de los arroyos de Los Huesos y Del Azul. En la periferia, se encuentran lomas y valles con cubetas de suelos hidromórficos o de régimen hídrico más húmedo.

Ambiente periserrano: caracterizado por la presencia y disposición irregular de afloramientos rocosos que constituyen lomadas convexas. Los valles fluviales son amplios, originándose en manantiales o áreas bajas.

Ambiente ondulado de piedemonte: de relieve ondulado y recortado por numerosas vaguadas o vías de escurrimiento.

Ambiente de deflación-acumulación: de relieve muy suavemente ondulado, con típico modelado eólico, donde las lomas (sectores de acumulación) alternan con las pequeñas cubetas de deflación creadas por erosión eólica.

Ambiente de planicie de derrames: dispuesto casi en forma paralela al curso del arroyo Del Azul, caracterizado por la presencia de numerosos cauces inestables o antiguas divagaciones que se anegan fácilmente en épocas de lluvias intensas.

Ambiente de llanuras aluviales: constituido por fajas que corren en forma casi paralela, sobre ambos márgenes del arroyo Del Azul, y también en la del arroyo de Los Huesos que ingresa en el área de estudio. El relieve es sumamente plano.

Afloramientos rocosos: zonas donde la roca está expuesta y el suelo es muy incipiente.

3.1.1.2 Suelos:

Superposición de una grilla "blanco" y estimación visual del porcentaje de cobertura en cada EAU de los subgrupos de suelos presentes en el área de estudio (clasificados según Soil Taxonomy, 1975): Argiudoles típicos, Argiudoles líticos, Argialboles, Natracuoles típicos, Natracualfes típicos, Natracualfes mólicos, Hapludoles líticos y Complejos Indiferenciados (Figuras 3.2 a 3.9). Dicha información fue extraída de las cartas de suelo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1992), escala 1:50000. El resultado de esta superposición consistió en 8 mapas temáticos, uno por cada tipo de suelo, con valores de píxel entre 0 y 100 % de cobertura.

Una descripción simplificada de los distintos suelos, se detalla a continuación (INTA, 1992):

Argiudoles: suelos con horizonte A profundo, rico en materia orgánica, buena saturación con bases (mayor del 50%) y bien estructurado. Poseen un horizonte argílico (desarrollado por lixiviación) que se reconoce por la presencia de barnices. El régimen de humedad del suelo es típico de climas húmedos, pudiendo tener períodos secos de escasa intensidad (régimen údico). Esto también implica que la sección de control de humedad, en la mayoría de los años, no esté seca en ningún sector por un período mayor de 90 días acumulativos. Los típicos no tienen ningún tipo de limitación, por lo que en ellos se desarrolla la mayor parte de la actividad agrícola; mientras que en el caso particular de los *líticos*, la roca se encuentra dentro de los primeros 50 cm.

Argialboles: poseen un horizonte sub-superficial álbico, definido por la presencia de materiales álbicos, generalmente granos de arena no revestidos (sin barnices), empobrecido de materiales finos, bien lavado. Es el eluvial por excelencia, muy frecuente en suelos bajos,

ocupando las partes cóncavas del relieve (esta ubicación topográfica, justamente, produce una concentración de agua pluvial, lo que favorece la lixiviación del perfil y la formación del horizonte álbico, el que generalmente está muy bien definido y muestra marcados rasgos de hidromorfismo). Entre este horizonte y el Bt subyacente se produce un cambio textural abrupto, característico de este subgrupo.

Natracuoles: suelos con drenaje deficiente, con períodos de saturación y ambiente reductor. Con horizonte nátrico caracterizado por poseer más del 15% de sodio intercambiable, pH mayor de 8.5 desde la superficie, generalmente estructura columnar, acumulación de arcillas, materia orgánica dispersada (muy móvil), plásticos en húmedo y duros en seco. Poseen un horizonte oscuro, profundo, rico en bases y alto contenido de material orgánico (epipedón mólico). El subgrupo *típico* agrupa a los suelos cuyos caracteres no se apartan de los que son taxonómicamente diagnósticos para este Gran Grupo, y hasta el momento la taxonomía no considera otros subgrupos.

Natracualfes: al igual que los anteriores, son suelos con drenaje deficiente, en algún momento del año están saturados y hay ambiente reductor (ausencia de oxígeno en el suelo, pero no se define la longitud del período). Presencia de horizontes argílico y nátrico. Más del 35% de saturación con bases. En el caso de los *mólicos*, el horizonte de superficie es oscuro, profundo, rico en bases y alto contenido de material orgánico.

Hapludoles: suelos con régimen údico de humedad, sin horizonte argílico, mullidos, blandos, con un horizonte superior moderadamente provisto de materia orgánica, con estructura débil, susceptible a la erosión eólica y excesivamente permeable. En el caso particular de los *líticos*, sólo constan de un horizonte A en contacto con el sustrato consolidado que limita la profundidad del suelo, impidiendo la normal percolación del agua y la exploración radicular.

Complejos indiferenciados: agrupación compuesta por suelos diferentes, que se encuentran muy entremezclados, de tal manera que es muy difícil separarlos como unidades puras aunque se agrande la escala del relevamiento. En el área bajo estudio, los mismos se encuentran, sobre todo, en las márgenes de los diferentes arroyos.

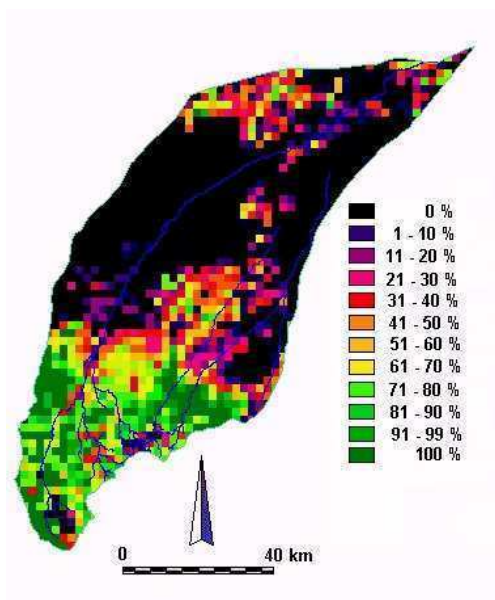


Figura 3.2. Argiudoles típicos

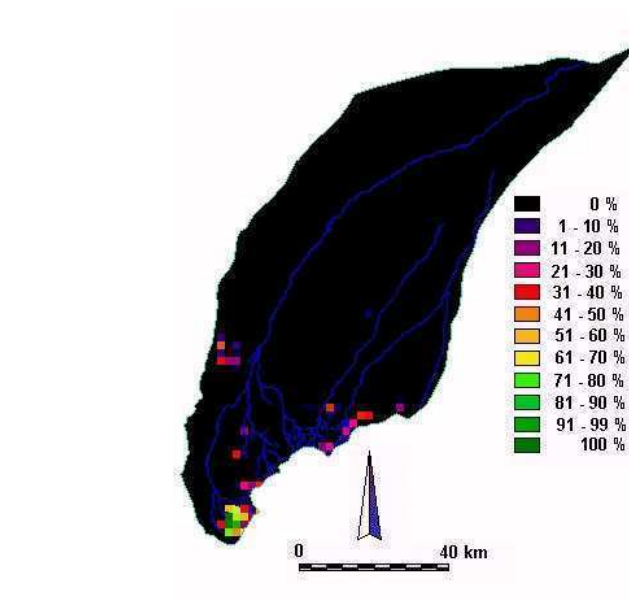


Figura 3.3. Argiudoles líticos

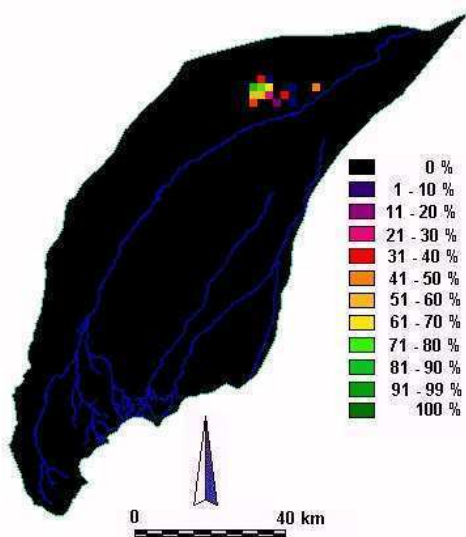


Figura 3.4. Argialboles

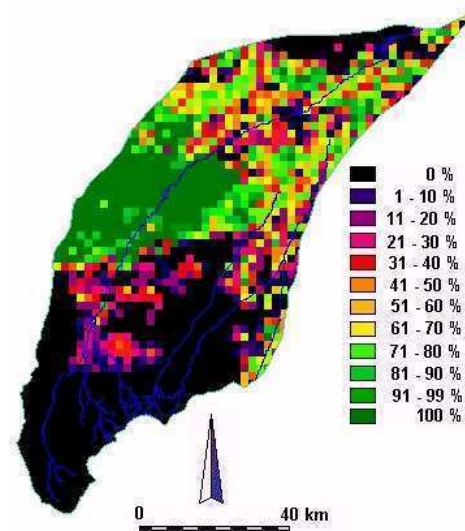


Figura 3.5. Natracuales típicos.

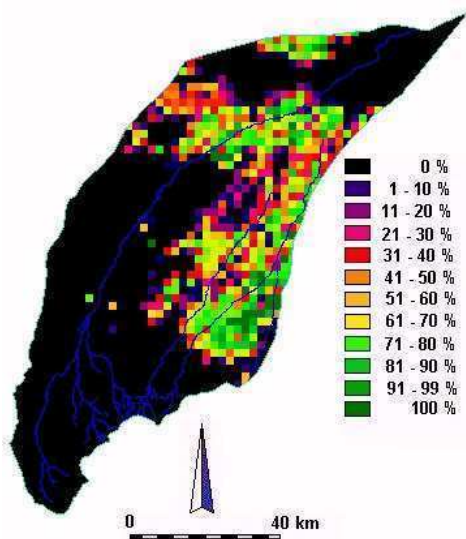


Figura 3.6. Natracualfes típicos

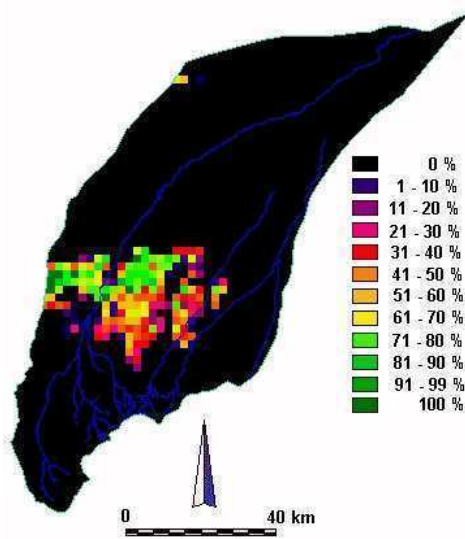


Figura 3.7. Natracualfes mólicos

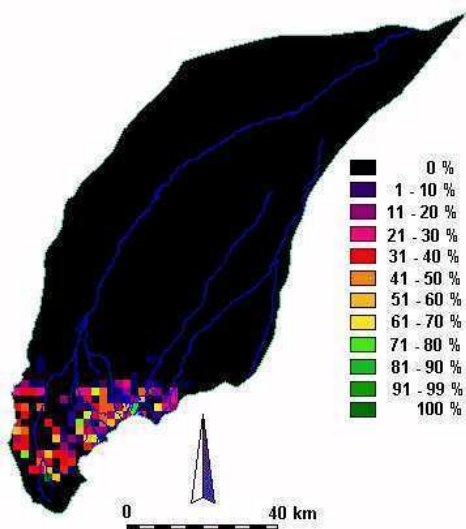


Figura 3.8. Hapludoles líticos

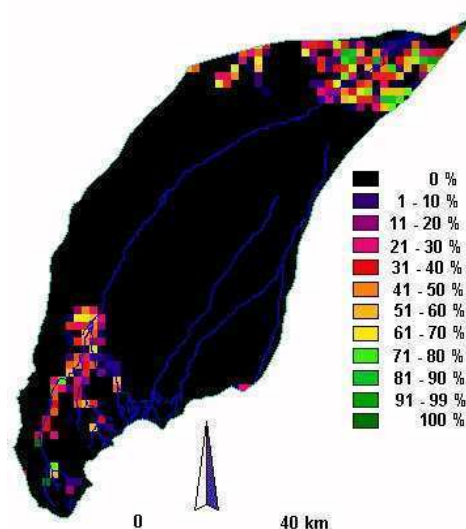


Figura 3.9. Complejos indiferenciados

3.1.1.3 Pendiente y Orientación:

Para la inclusión de estas variables, se procedió a la digitalización de las curvas de nivel a escala 1:50000 a partir de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM, 1953, 1954 y 1955), equidistancia 2.5 y 5 m. Una vez logrado este mapa de estructura vectorial, se construyó el modelo digital del terreno (Figura 3.10) y, a partir de éste, el mapa de pendientes (Figura 3.11), expresadas en porcentaje. El mismo mapa vectorial sirvió de base para la construcción del mapa de orientación (Figura 3.12) que representa la dirección en la cual está expuesta la "cara" de cada EAU; se expresa en grados decimales y utiliza las designaciones estándar de azimut, 0 – 360°, en sentido horario a partir del norte. En regiones donde la superficie es perfectamente plana con una pendiente igual a 0, la orientación los píxeles tienen asignado un valor de -1.

Lic. Marcelo Luciano Gandini

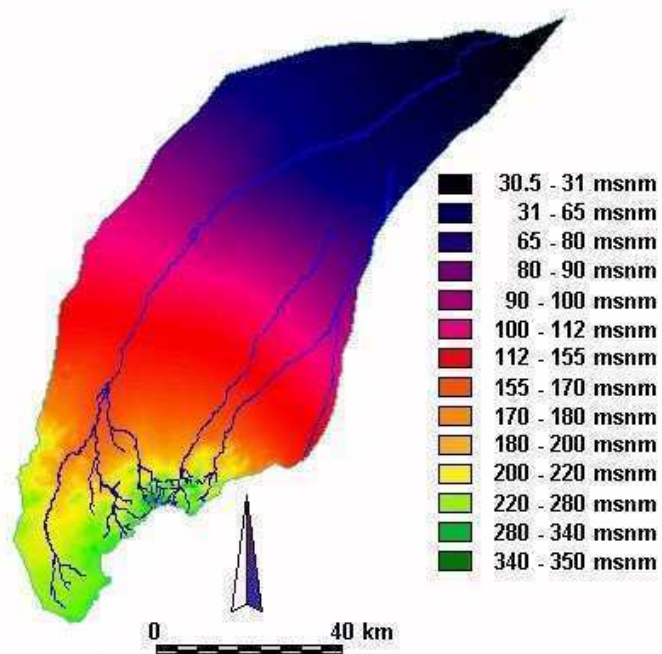


Figura 3.10. Modelo digital de terreno (MDT). La altura (metros sobre el nivel del mar-msnm) de cada píxel fue obtenida a partir de cartas topográficas 1:50000 del IGM.

Lic. Marcelo Luciano Gandini

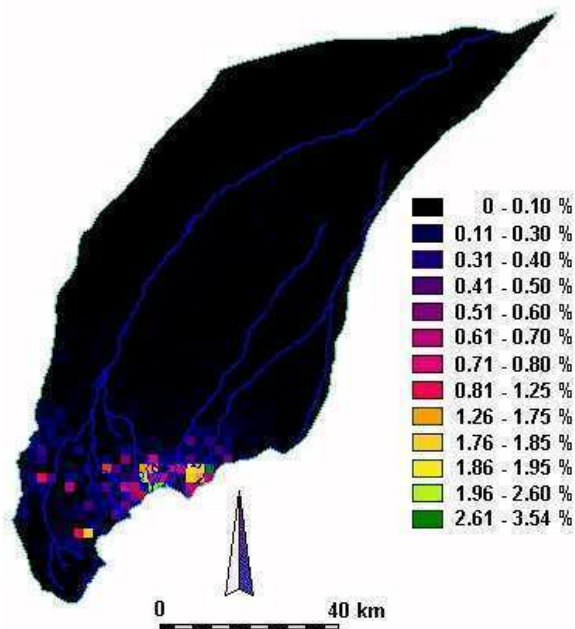


Figura 3.11. Mapa de Pendientes calculadas a partir del MDT (en porcentaje). La pendiente se supone constante para el píxel considerado

Lic. Marcelo Luciano Gandini

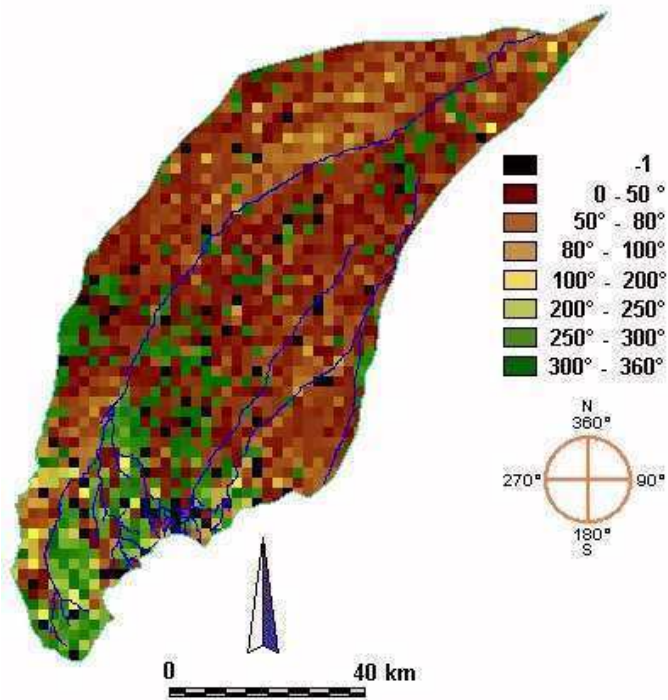


Figura 3.12. Mapa de Orientación de la cara de los píxeles (ídem 3.11). Los valores entre 0 y 360° indican hacia qué dirección geográfica se orienta la cara del píxel considerado.

3.1.1.4 Lluvias:

Los valores de cada píxel en esta variable provienen de la interpolación mediante polinomios de segundo grado de datos pluviométricos anuales pertenecientes a 12 estaciones de muestreo (Tabla 3.1) durante el período 1985 - 1994 (Figura 3.13).

Tabla 3.1. Ubicación geográfica y elevación de las estaciones pluviométricas.

Nombre	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)
Azul	36° 44' 49''	59° 50' 25''	127,8
Las Flores	36° 3' 55''	59° 6' 12''	36,2
Olavarría	36° 53' 26''	60° 10' 23''	161,0
Trapenses	37° 6' 24''	59° 42' 43''	260,0
San Gervasio	37° 20' 56''	60° 6' 27''	250,0
San Ramón	37° 11' 37''	59° 49' 14''	230,0
La Dolores	36° 56' 17''	60° 1' 15''	175,0
Campodónico	36° 20' 55''	59° 47' 26''	81,8
La Firmeza	36° 58' 30''	59° 57' 51''	167,5
Moeraki	36° 31' 3''	59° 27' 14''	78,5
Miramonte	36° 18' 55''	59° 27' 30''	65,0
La Isabelita	36° 48' 32''	59° 20' 21''	107,5

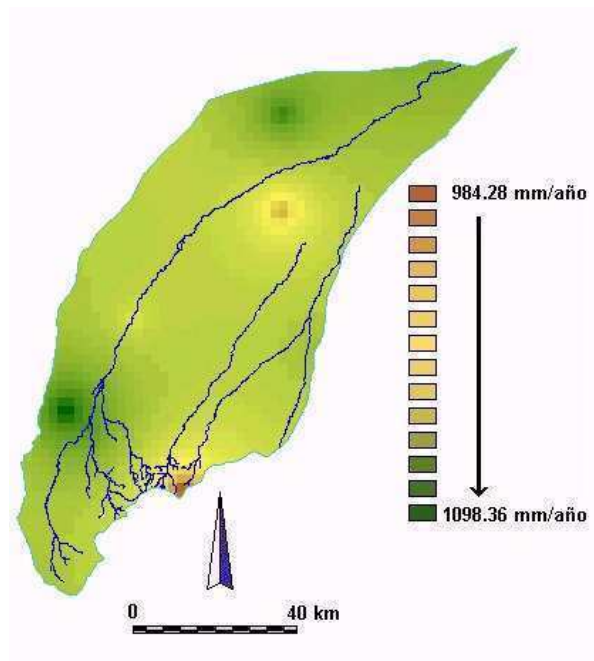


Figura 3.13. Mapa de distribución de precipitación total anual (mm/año) obtenido a partir de la interpolación de datos puntuales para el período 1985-1994.

3.1.1.5 Anegabilidad:

Esta estimación se realizó remuestreando el mapa de anegabilidad de Vázquez et al. (2003). El mismo proviene del análisis de 7 imágenes del satélite LANDSAT 5 y 7, sensores TM y ETM+.. En el mismo se produjo un mapa en el que se definieron 22 niveles de anegabilidad, basándose en datos de clasificación de agua en las imágenes y las lluvias antecedentes. La imagen original y los datos de anegabilidad obtenidos fueron con una resolución de 30m de pixel, aunque la imagen ingresada a la base de datos fue con resolución de 2 x 2 km.

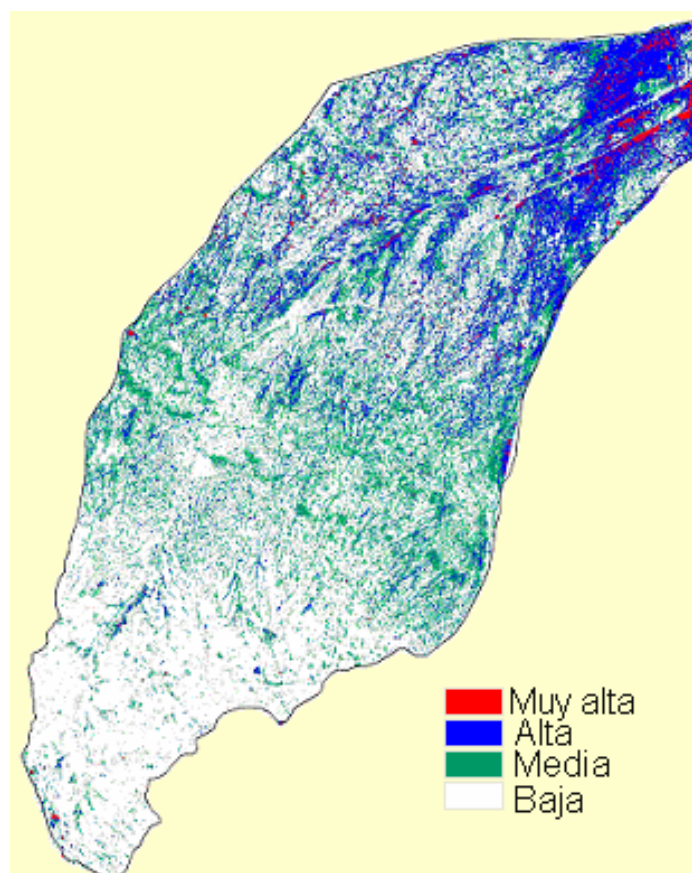


Figura 3.14: Grados de anegabilidad estimados a partir de imágenes LANDSAT 5 y 7 (Vázquez et al., 2003) Colores rojos: anegamiento permanente; azules: temporarios con alta frecuencia; verdes: temporarios con baja frecuencia; blanco: no anegados durante el análisis).

3.1.2. Tratamiento de los datos:

Luego de la obtención de las variables, los datos fueron estandarizados y tratados mediante un Análisis de Factores, con método de extracción de ejes de componentes principales (ACP; Harman, 1976). Los scores factoriales obtenidos del ACP fueron transformados en archivos ASCII e importados al SIG como nuevas imágenes, con el módulo sstidris de IDRISI. (Eastman 1997) Luego se elaboró una imagen compuesta

(módulo composit de IDRISI) con los escores factoriales de los tres primeros componentes, con el objeto de visualizar la variación conjunta de los mismos. La imagen compuesta fue tratada con una rutina de agrupamiento (Gallopín, 1982) con el fin de agrupar en clases homogéneas la mayor parte de la varianza explicada por el análisis.

Los colores en la imagen compuesta fueron interpretados utilizando la teoría de la composición color, que se explica brevemente:

La mezcla de colores luz, normalmente rojo, verde y azul (RGB), se realiza utilizando el sistema de color aditivo, también referido como el modelo RGB o el espacio de color RGB. Estos colores al ser mezclados en partes iguales forman el blanco; y cuando ningún color luz está presente, se percibe el negro. Los colores luz tienen aplicación en los monitores de un ordenador, televisiones, proyectores de vídeo y todos aquellos que utilizan combinaciones de fósforos rojos, verdes y azules (Wikipedia, 2005). En este caso, se utilizará la teoría del color para explicar gráficamente los valores de los píxeles producto de la combinación de los escores factoriales de los tres primeros ejes de Componentes Principales.

3.2 Resultados

Se observa que un total de cinco componentes poseen autovalores mayores que la unidad (Tabla 3.2), con lo que explican un porcentaje de varianza mayor que la de cualquier variable individual. Analizando la variabilidad total explicada por cada componente, se observa que el porcentaje es bajo, lo que refleja una baja correlación entre las variables, hecho que lleva a aceptar la inclusión de todas las variables elegidas como componentes no redundantes en el análisis. La variabilidad total explicada por los tres primeros ejes de

componentes alcanza al 46.10% (Tabla 3.2) la consideración de un cuarto eje eleva la misma a un 55.66%. Del balance entre las limitaciones de la composición de imágenes en el SIG y el número de ejes a considerar en el análisis, surgió como adecuado el uso de tres, considerando que los mismos permiten una buena interpretación de la variabilidad de los datos. Por otro lado, se observa que la varianza explicada es mayor a 1 (uno) en los 5 primeros componentes y que, entonces si tomamos este grupo de combinaciones lineales, la proporción acumulada de varianza en el espacio de los factores alcanza a un 72,34%, más de un 70 % de la variabilidad observada dentro del modelo (espacio de los factores).

Tabla 3.2. Autovalores y proporción acumulada de varianza en el espacio de datos y factores obtenidos por análisis de componentes principales de 13 variables.

Componente	Autovalores (varianza explicada)	Proporción acumulada en el espacio de los datos	Proporción acumulada en el espacio de los factores (componentes)
1	2,9648	0,2281	0,3579
2	1,7574	0,3632	0,5700
3	1,2706	0,4610	0,7234
4	1,2427	0,5566	0,8734
5	1,0491	0,6373	1,0000

Las cargas de las variables sobre los ejes de los componentes, pueden ser interpretadas como el grado de afinidad entre las mismas y los ejes extraídos (Noy Meyr, 1971; según Montaña y Ezcurra, 1991). La misma se repartió como se muestra en la Tabla 3.3.

Primer eje: grupos de suelos de mayor representatividad areal en la zona de estudio (Natracuoles y Argiudoles), fisiografía, anegabilidad, pendientes y Hapludoles líticos.

Segundo eje: Lluvias y complejos indiferenciados, Argialboles, pendientes y anegabilidad.

Tercer eje: Natracualfes típicos y Natracuoles.

Tabla 3.3. Carga de las variables en los primeros tres componentes obtenidos con ACP (valores < 0.25 obviados para facilitar la interpretación visual).

Variable	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Argiudoles típicos	0,791	-----	-----
Fisiografía	0,773	-----	-----
Natracuoles	-0,753	-----	-0,454
Anegabilidad	-0,642	-0,380	-----
Pendiente	0,555	-0,316	-----
Hapludoles líticos	0,525	-----	-----
Lluvias	-----	0,749	-----
Complejos indif,	-----	0,697	-----
Natracualf típicos	-----	-----	0,922
Natracualf mólicos	-----	-----	-----
Argiudoles líticos	-----	-----	-----
Orientación	-----	-----	-----
Argialboles	-----	0,474	-----

En el primer eje posee alta carga positiva la variable Argiudoles, el suelo de mayor aptitud agrícola de la zona. El porcentaje de este tipo de suelo se halla correlacionado positivamente con la variable Fisiografía, y negativamente con los suelos sódicos (Natracuoles) y la Anegabilidad, todos estos relacionados directamente con la definición de capacidades de uso del suelo para el cultivo. Por esto podemos definir el eje como de “**aptitud ambiental para los cultivos**”. Cuando los escores factoriales son positivos, este eje definirá elementos del paisaje ubicados en los relieves positivos (zonas de baja acumulación de agua y sales). Por el contrario, cuando los escores son negativos, indica elementos del paisaje en zonas inundables, con suelos alcalinos o salinos. La relación de la Anegabilidad con los Natracuoles en el primer eje y con las pendientes en el segundo eje lleva a interpretar que, en el primer caso, se observa el efecto de la anegabilidad como factor formador de los suelos Natracuoles. Por otro lado, la relación entre esta variable y la pendiente, indica el efecto de esta última para definir el tiempo de estancia del agua sobre el perfil del suelo.

En el segundo eje predominan variables como Lluvias, Complejos Indiferenciados y Argialboles. Estos suelos presentan algunas restricciones a la capacidad de uso de la tierra (como escasa cantidad de materia orgánica). Por otra parte, las variables Pendientes y Anegabilidad poseen carga negativa, aunque baja, lo que indica que las zonas con estas restricciones son de bajas pendientes y poco anegables. Las EAU con alto escore en este eje son aquellos ubicados en posiciones topográficas intermedias, con relieve positivo pero cotas no tan extremas como las indicadas para el primer eje.

En el tercer eje, posee alta carga otro suelo de buena representatividad areal en la cuenca (Natracuol típico) relacionado negativamente con los Natracuoles. Este factor estaría indicando un gradiente de materia orgánica, desde suelos mólicos, como los

Natracuales, hasta alfisoles, como los Natracualfes. Este eje podría estar aportando otra dimensión en la definición de la aptitud agrícola de los suelos.

El resultado de la aplicación del modelo de ACP a los valores de las variables y la decisión de utilizar los tres primeros ejes, fue una matriz de 3 escores factoriales por 1575 celdas. Dado que la cantidad de datos es extremadamente grande, no es posible identificar grupos de EAU en un gráfico X-Y de escores factoriales, pero esto sí es posible con la ayuda del SIG, donde se pueden elaborar mapas parciales en los cuales, por construcción, ya es conocida la ubicación geográfica de cada EAU y un color con una paleta arbitraria indica similitudes o diferencias. Asimismo, la elaboración de una imagen compuesta sintetiza, en un gráfico, la variabilidad de los datos y el peso que tiene cada eje (y sus variables asociadas) en las EAU (Figura 3.15).

Al norte de la cuenca se observa un predominio de los colores rojos, lo que indica valores positivos altos de los píxeles en el tercer eje de componentes. En la zona central, los valores son altos en el eje 1 (azul), con tendencias a aumentar los valores del eje 2 hacia el este. En la zona sur, se observa una zona blanca (altos valores positivos en los tres ejes) y una zona con predominio de verdes y azules claro.

Si bien la Figura 3.15 puede considerarse el resultado final de la regionalización, es muy probable que no exista una conexión espacial entre EAU similares (Gallopín, 1982). Por lo tanto se propone recurrir a la interpretación de la variabilidad espacial de estas nuevas variables. El acercamiento a este objetivo se realizó mediante los siguientes pasos:

- Análisis de agrupamiento (Cluster Analysis, Host et al., 1996). Se agruparon los EAU en intervalos homogéneos según los valores de escores factoriales (Figura

3.16). Este paso se realizó teniendo en cuenta que la visualización de los clusters aportaría a una regionalización más objetiva.

- Interpretación visual de la imagen compuesta de los tres primeros ejes de componentes con delimitación de zonas según cambios significativos tanto de los valores de escores factoriales, como en el patrón de repetición espacial de los mismos (Figura 3.17).

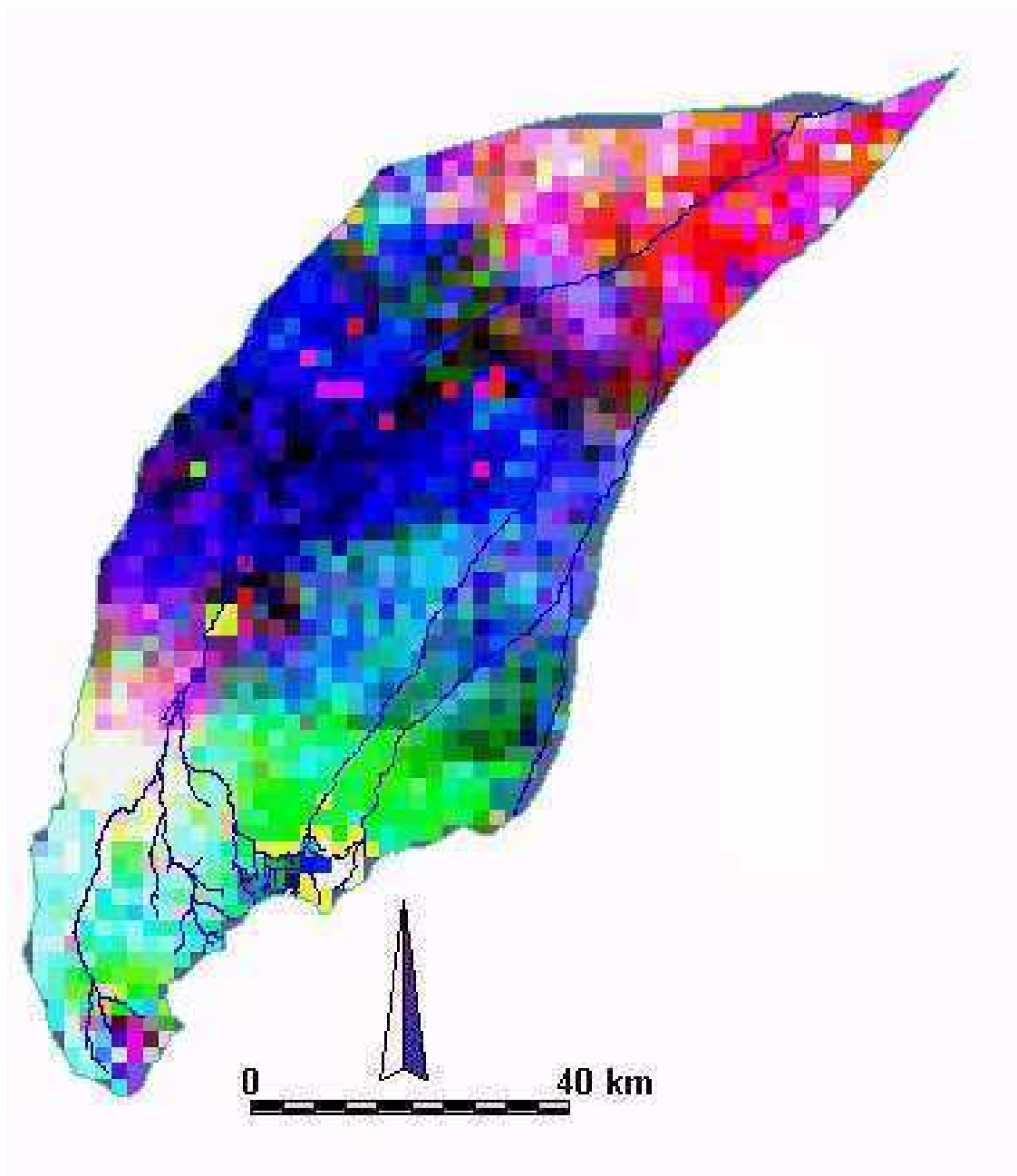


Figura 3.15. Imagen compuesta de los escores factoriales pertenecientes a los primeros 3 componentes del ACP n Rojo, Verde, Azul, (RGB) R: Eje 3; G: Eje 2; B:Eje 1.

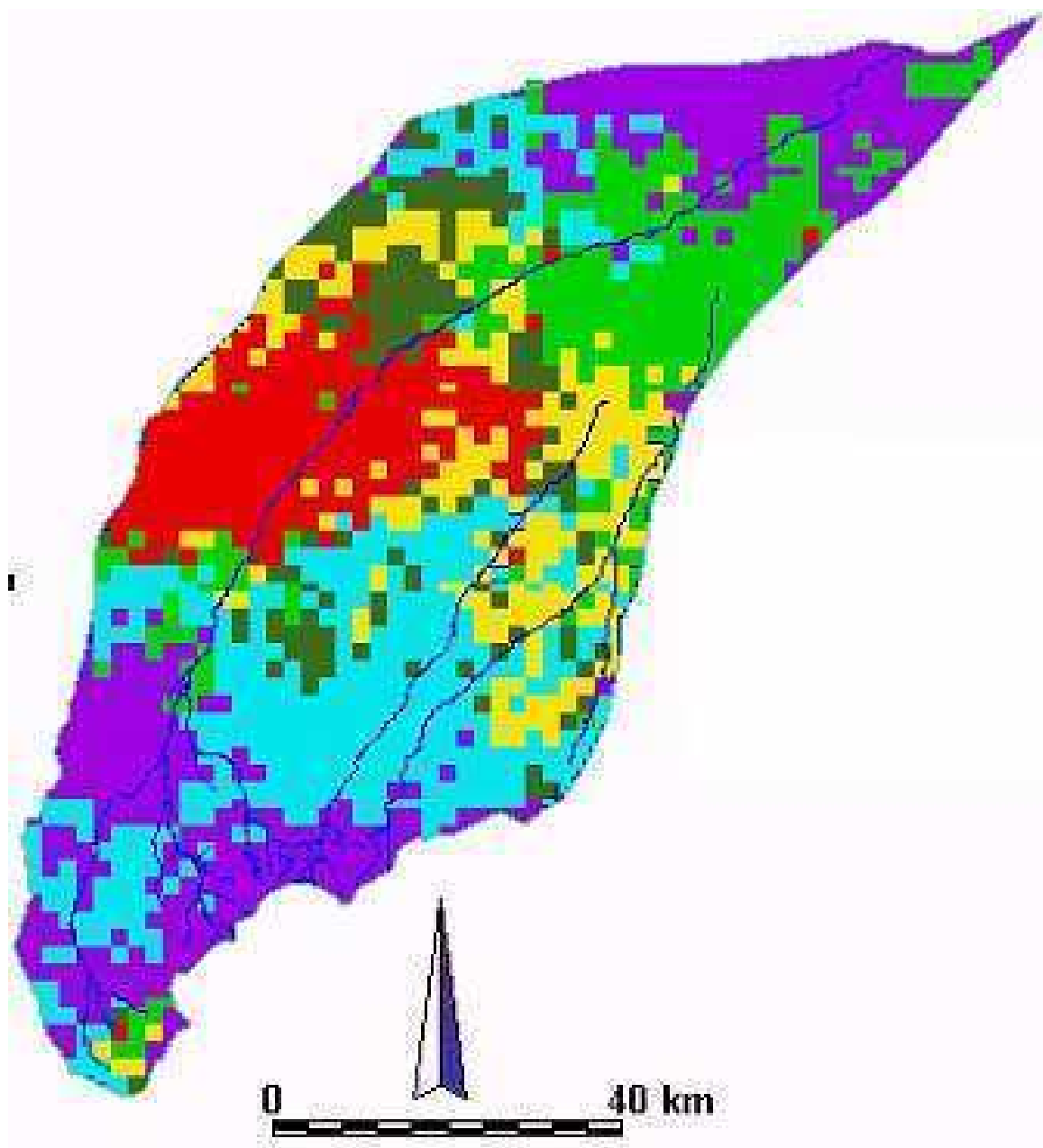


Figura 3.16. Agrupamiento de valores de los scores factoriales de los tres primeros ejes del ACP.

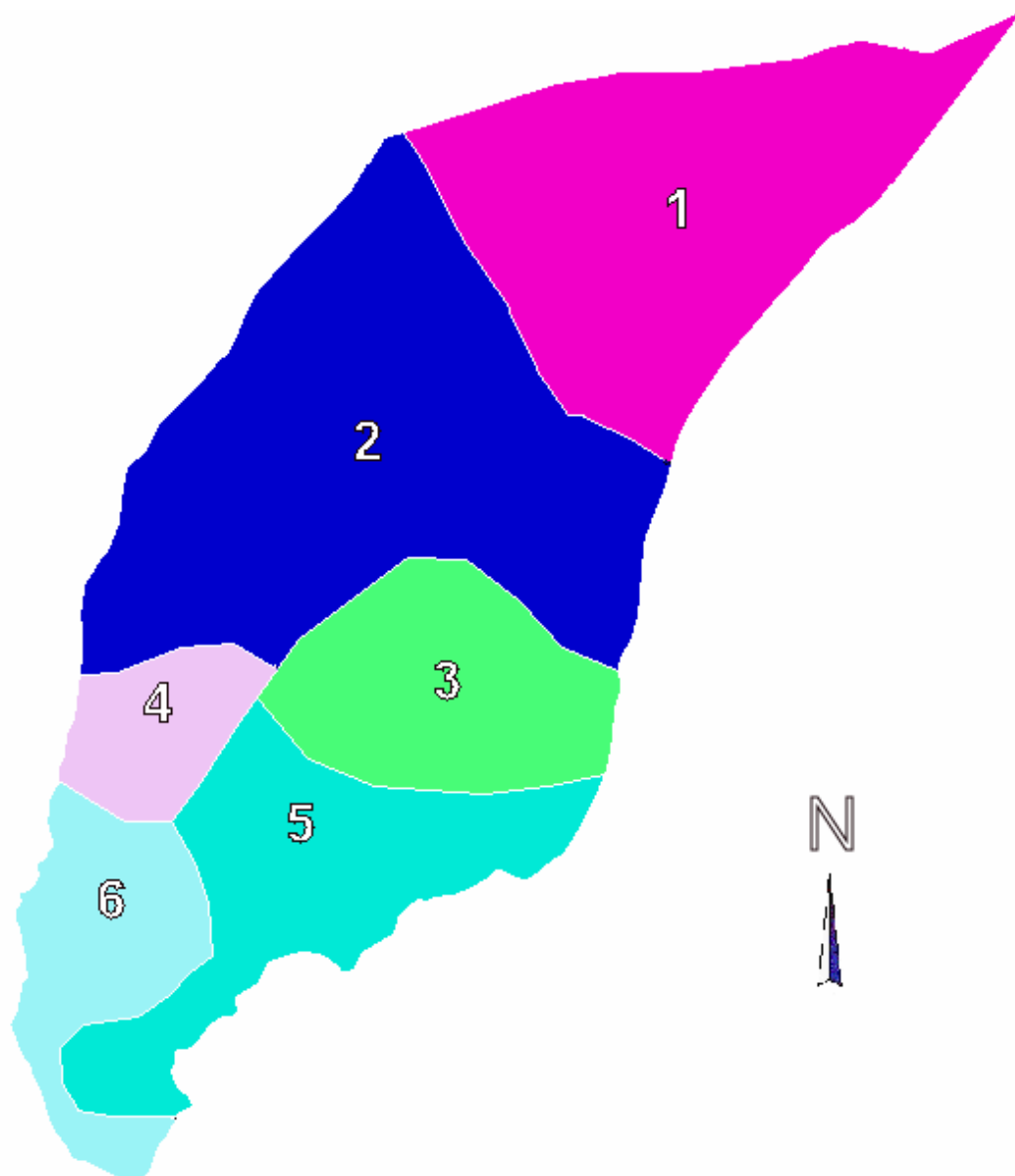


Fig 3.17: Zonas definidas de acuerdo a criterios visuales de homogeneidad y repetición de patrones. La denominación y descripción de cada una se encuentra en el texto.

Para delimitar las zonas que se observan en la figura 3.17, se tuvieron en cuenta los siguientes los siguientes criterios: Homogeneidad visual en la imagen compuesta de los tres componentes, y repetición de patrones en la imagen del cluster de componentes. De esta manera cada zona tiene un color predominante según la imagen 3.15 y un “patrón espacial” según la imagen 3.16. Puede observarse que más de la mitad de la cuenca en estudio está cubierta por las ecozonas 1 y 2, paisajes típicamente pertenecientes a la cuenca del Salado. Los paisajes restantes se encuentran en la zona serrana y sus alrededores, indicando una mayor variabilidad espacial en menor superficie.

En cuanto a la posición con respecto a la subdivisión en cuenca alta, media y baja, podemos observar que las zonas 4, 5 y 6 están en la cuenca alta; la zona 3 entre la cuenca alta y media; y las 1 y 2 casi en su totalidad en la baja. (comparar figura 3.17 y 3.18)

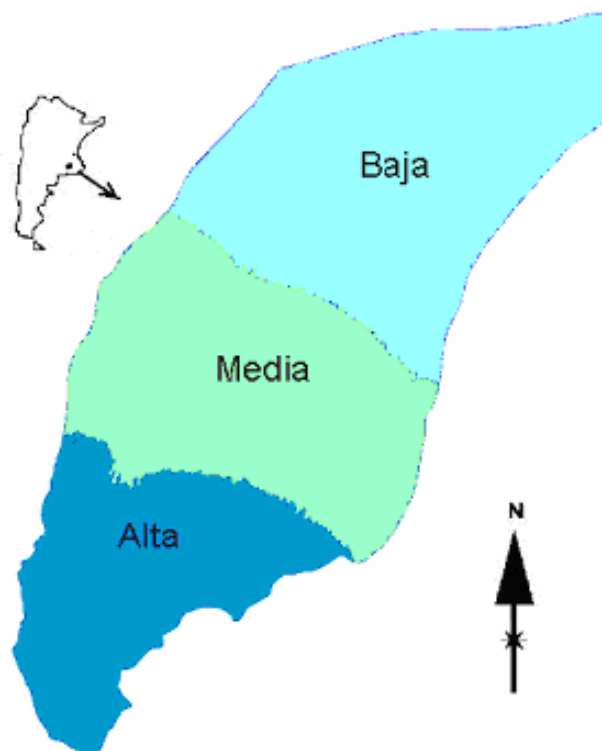


Figura 3.18: Subdivisión de la cuenca en alta, media y baja.

A continuación, se presenta una breve descripción de los paisajes definidos y de sus principales características según se desprende de las variables utilizadas para el análisis. Los nombres entre comillas se han agregado haciendo referencia a alguna ciudad, paraje o característica fisonómica sobresaliente del mismo.

- **Zona 1** “Cacharí”: Cubre el 34.13 % del área de estudio. Se presentan los subgrupos edáficos de Natruacuoles y Natracualfes típicos, y algunos Argiudoles en ambientes de planicies de derrame y llanuras aluviales. Las pendientes son muy bajas, con los máximos valores de anegabilidad y con una orientación indeterminada por la casi nula pendiente.
- **Zona 2** “Ariel”: Cubre el 25.54 % del área. Predominan absolutamente los Natruacuoles, en ambientes de planicies de derrame y llanuras aluviales. Las pendientes del relieve son bajas, con alta anegabilidad, y la orientación es hacia el arroyo Del Azul.
- **Zona 3** “Piedemonte”: Cubre el 8.65% del área de estudio. Predominan los subgrupos edáficos de Argiudoles y Natracualfes típicos, en ambientes de planicies de derrame. El relieve en general es de pendientes medias (menores al 1%), y está surcado por los cursos de agua no permanentes que corren paralelos al arroyo Del Azul, con una orientación general hacia el Norte. Anegabilidad baja
- **Zona 4** “Azul Sur”: Cubre el 5% del área de estudio. Se presentan los subgrupos edáficos de Argiudoles típicos y Natracualfes mólicos, en ambientes de acumulación-deflación principalmente. Las pendientes presentan los valores medios de la cuenca (alrededor del 0.7%), la anegabilidad es mínima, y la orientación es

hacia el arroyo Del Azul y sus tributarios. Uso mixto Ganadero-Agrícola.
Anegabilidad baja

- **Zona 5 “Pablo Acosta”** Ocupa el 14.74 % del área .Se presentan los subgrupos edáficos de Argiudoles típicos, Argialboles, Hapludoles líticos y Complejos indiferenciados. Los ambientes fisiográficos son muy variados: llanuras aluviales y planicies de derrame, al norte; y ambientes serranos, periserranos y afloramientos rocosos, al sur. Las pendientes disminuyen de sur a norte. La anegabilidad es mínima, y la orientación es hacia el arroyo Del Azul (al sur) y casi indefinida al norte.
- **Zona 6 “Chillar”:** Cubre el 12 % del área. Se presentan los subgrupos edáficos de Argiudoles típicos, Argialboles, y Complejos indiferenciados. Los ambientes son un mosaico de ondulaciones y periserranos. Este hecho también provoca una gran variación en los porcentajes de suelos y las pendientes. La orientación es hacia el este (arroyo Azul). Anegabilidad baja

Como puede observarse, la regionalización obtenida, no es concordante con la realizada según un criterio puramente fisiográfico, aún utilizando este criterio como variable de análisis. Evidentemente, existe un aporte del resto de variables, que no son redundantes con la fisiografía, y por tanto esta regionalización puede ser considerada más robusta. Por otro lado, se observan más similitudes entre la subdivisión obtenida, y una subdivisión isoareal entre cuencas alta, media y baja.

También se observa una similitud con el mapa de Vervoost (1967) (figura 3.19) en el cual la cuenca considerada podría separarse a mayor escala en dos zonas: la pampa deprimida y el sistema de Tandilia. Puede observarse que el número de ambientes

delimitados en estos casos es sensiblemente inferior al aquí obtenido. Esto podría deberse al menor número de variables y, principalmente, al enfoque puramente paisajístico utilizado.

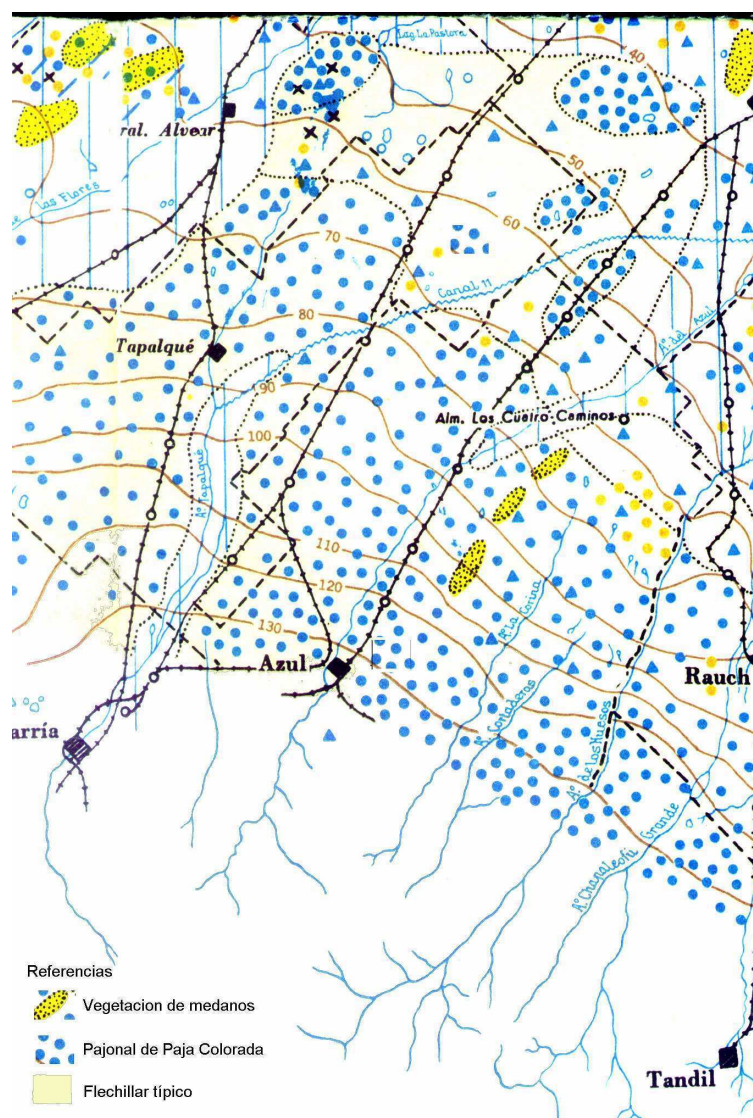


Figura 3.19: Comunidades vegetales de la zona de la cuenca del arroyo Del Azul según Vervoost (1967).

La regionalización obtenida mediante esta metodología no surge del análisis visual del conjunto de variables, como puede interpretarse a partir de la metodología utilizada,

pero concuerda en parte con otras existentes. En este sentido se puede afirmar que el aporte de este trabajo es el de combinar variables no utilizadas anteriormente para la zonificación de esta cuenca, con la de otros autores, utilizando un enfoque paramétrico. De esta manera se aporta más información sobre las zonas definidas y por lo tanto su uso puede ser más práctico y más ampliamente difundido (tasaciones con objetivos fiscales, planificación de usos de la tierra y el agua, relevamientos botánicos, etc.)

3.3 Conclusiones

La elección del ACP se debió a que dicha técnica permite, por un lado, usar un reducido número de componentes que contienen la influencia de todas las variables originales, e identificar y desechar aquellas menos significativas y, por otro lado, posibilita el desarrollo de una regionalización objetiva y flexible, pudiéndose realizar nuevos análisis a partir de nuevos objetivos o mediante la disponibilidad de nuevas variables.

La metodología utilizada, junto a la inclusión en el conjunto de variables de aquellas de importancia agro ecológica, ofreció la oportunidad de contar con una regionalización que podrá ser ajustada *a posteriori* de acuerdo a las tendencias en el uso de la tierra y/o cambios en las variables climáticas, o servir como base para la creación de planes maestros de uso de la tierra (Van der Velden et al., 1994). Por otro lado, el uso de un SIG resultó indispensable ya que, además de la descripción, interesa el modelado y manejo de las complejas relaciones espaciales presentes en el agro ecosistema.

En conclusión, en este capítulo se presenta el logro de una combinación de herramientas objetivas para la evaluación y caracterización de zonas que poseen abundante

información disponible pero no sistematizada y escasamente procesada, usando bases ecológicas teóricas.

4. NDVI 1992-93 Y EL COMPORTAMIENTO DE LA VEGETACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS

4.1 Introducción

4.1.1 Comportamiento espectral del paisaje: Los elementos Vegetación, Suelo y Agua.

4.1.1.1 Vegetación

El comportamiento espectral de la vegetación (tanto natural como cultivada) es especialmente variable, dependiendo de factores como estado fenológico, forma y contenido en humedad. De manera general se puede decir que presenta una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la región del verde (0.55 μ m). Esto se debe al efecto absorbente de los pigmentos fotosintéticos de las hojas. De entre estos, las hojas contienen clorofila que absorben las longitudes de onda del rojo y azul. Por eso, en vegetación no vigorosa la clorofila no absorbe tanto y la hoja se torna un color amarillento (verde + rojo) (Chuvieco, 1996).

La estructura celular interna da la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano que luego va reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio. Por lo tanto, el contraste más nítido se presenta entre las bandas visibles (especialmente rojo) y el infrarrojo cercano. Cuanto mayor sea ese contraste, mayor será el vigor de la vegetación.

Estos tres parámetros: cantidad de pigmentos, estructura celular y contenido en agua, manifestados por la respuesta espectral de esa masa de vegetación de la que forman parte, puede servir para discernir entre unas especies y otras, su nivel de desarrollo e incluso su estado sanitario (Chuvieco 1996).

En la práctica, puede decirse que la curva de reflectancia de un vegetal refleja su estado fisiológico. La respuesta espectral es acusada por los vegetales que se hallan en buenas condiciones espaciales y temporales; edafológicas e hidrológicas; climáticas y de exposición; de madurez y sanitarias. Inversamente, la respuesta espectral es más débil en el caso de malas condiciones (Ehrlinger, 1993):

- edafológicas (suelo de poca profundidad no conveniente para el vegetal), hidrológicas (falta de agua, sequía o anegamiento).
- mala exposición (exceso o insuficiencia de sol, sombra o viento).
- mal estado sanitario (vejez, enfermedades, contaminación).

De aquí se deduce que el análisis de la reflectancia de la vegetación informa también sobre el estado del entorno y viceversa.

4.1.1.2 Agua

El agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación visible que recibe. Por lo tanto presentará una curva espectral plana, baja y de sentido descendente. De todas formas, en aguas poco profundas la reflectividad aumenta. Los factores que afectan este comportamiento, además de la profundidad, son el contenido de materias en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes) y la rugosidad de la superficie, dependiendo de el ángulo de vista (Chuvieco 1996).

4.1.1.3 Suelos

Muchas veces son invisibles debido a la vegetación, pero cuando es posible observarlos con un sensor remoto, los suelos desnudos presentan un comportamiento espectral mucho más uniforme que el de la vegetación. La curva espectral que presentan es bastante plana y de carácter ligeramente ascendente.

Los principales factores que intervienen en este caso son la composición química del suelo, su textura y estructura y el contenido de humedad. Para ilustrar se puede citar que un suelo de origen calcáreo tiende al color blanco, resultando en una respuesta de alta reflectividad en todas las bandas visibles. Por otro lado, uno arcilloso ofrece mayor reflectividad en el rojo como consecuencia de su alto contenido en óxido de hierro. Además, la reflectividad espectral presenta mayores valores en suelos de textura gruesa, apelmazados, secos y sin materia orgánica.

Como ya se ha dicho para la vegetación, el contenido de humedad es uno de los elementos destacados en la reflectividad en longitudes de onda largas (infrarrojo medio) y así suelos con alto contenido de humedad darán una reflectividad baja en esa banda. Cuanto más seco y apelmazado esté un suelo, mayor será su reflectividad.

Lic. Marcelo Luciano Gandini



Fig 4.1 Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas

4.1.2 La vegetación y el ambiente

Un estudio de la vegetación implica necesariamente un análisis de los factores del medio ambiente, en especial de los topográficos, de los climáticos y de los edáficos. Es necesario entender y conocer la influencia que ejercen los factores abióticos sobre la distribución de la vegetación.

El conocimiento y la comprensión de la evolución dinámica de los ecosistemas terrestres en respuesta a los factores naturales y antropogénicos resulta de gran importancia para su conservación y explotación. En particular, el seguimiento de la dinámica de la vegetación a escala regional es una tarea básica desde el punto de vista de la gestión y planificación en el campo de los recursos naturales y en especial los hídricos.

Se han desarrollado diversas técnicas para estudiar cualitativa y cuantitativamente el estado de la vegetación a partir de medidas espectrales obtenidas por satélites.

Con el fin de reducir el número de dimensiones propias de las medidas multispectrales a una sola dimensión, se han definido los índices de vegetación. Los índices de vegetación son combinaciones de bandas espectrales, cuya función es realzar la

contribución de la vegetación en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como suelo, iluminación, atmósfera, etc.

Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más pigmentos, implicados en las reacciones fotoquímicas y fotosintéticas, capaces de absorber la radiación. Dos bandas del espectro, la azul (430 nm) y la roja (600 nm) se encuentran en el rango de la energía absorbida por las plantas. En contraste, la banda del infrarrojo cercano (750-1100 nm) no es absorbida por éstas. La mayor absorción del rojo y azul, junto con la fuerte reflexión del infrarrojo cercano es el comportamiento espectral característico de toda vegetación, y ha sido usado durante mucho tiempo como forma de identificación de las superficies con y sin vegetación.

4.1.3 Los índices de vegetación

Como se dijo anteriormente, alrededor de los 700 nm las plantas muestran un fuerte pico de absorción causado por los pigmentos fotosintéticos, hecho que contrasta con una fuerte reflexión de las longitudes de onda del infrarrojo cercano. En contraste, los suelos desnudos se caracterizan por un incremento suavemente monotónico a medida que aumenta la longitud de onda, y los cuerpos de agua se comportan de manera inversa, con absorciones importantes en todas las longitudes de onda (exceptuadas las longitudes de onda correspondientes al azul, en el rango de 450-550 nm).

Teniendo en cuenta las características citadas, es posible definir un índice que estime la “densidad de biomasa verde” o “densidad de clorofila” basándose en datos radiométricos, relacionando las bandas roja e infrarroja de los sensores capaces de captarlas, con la fórmula mencionada en el Capítulo 1.

Este índice resulta en valores entre -1 y 1 , en relación directa con la cobertura vegetal verde presente en cada píxel. Sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos, generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas con suelo desnudo y rocas (Tucker, 1979 ; Tucker y Sellers, 1986).

Diversos autores han intentado transformar los valores de NDVI para ajustarlos a condiciones locales de suelo con baja cobertura, inundados, etc. Pero se ha demostrado experimentalmente que si los índices son escalados dentro del mismo rango, tienen características espaciales y estadísticas similares, y aportan la misma información para la detección de cambios temporales (Lyon et al., 1998) por lo que se decidió utilizar el NDVI como indicador de los cambios temporales por ser el más amplia y antiguamente usado en la literatura.

4. 2 Materiales y métodos

Se utilizaron imágenes almacenadas en el servicio Geológico de los EEUU (USGS 1992-93) tomadas por los satélites NOAA-AVHRR (Radiómetro de resolución avanzada de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Espacio de EEUU). Una de las bandas almacenadas, corresponde al NDVI calculado como representativo de intervalos de 10 días.

Las imágenes poseen las siguientes características:

4.2.1 Características Generales de las imágenes NOAA-AVHRR

- Resolución Espacial: 1 Km (nominal dependiendo del ángulo de vista del satélite), remuestreadas a 1 Km^2 .

- Resolución espectral: 5 canales (rojo y cuatro infrarrojos del IR cercano, medio y térmico).
- Órbita cuasi- polar.
- Frecuencia: 2 tomas por día (con distinta orientación).

4.2.2 Características de las imágenes almacenadas en el USGS (Eidenshink y Faundeen, 1994)

- Aplicación de algoritmos de búsqueda de máximos entre imágenes de 10 ó 30 días consecutivos para la eliminación de la cobertura de nubes.
- Cálculo de NDVI a partir de los datos corregidos a reflectancia y almacenamiento en un canal separado (Eidenshink y Faundeen, 1994).
- Proyección Goode Homolosine (Goode, 1925; Steinward, 1994).
- Corrección radiométrica y geométrica que soporta estudios multitemporales.
- Entrega de los datos via ftp comprimido y con valores byte binarios (cuentas digitales). Los verdaderos valores de NDVI se pueden corregir aplicando ecuaciones lineares. En este trabajo no se realizó este paso porque no interesa aplicar ningún significado físico al valor calculado.

4.2.3 Tratamiento de los datos:

Para las imágenes se eligió arbitrariamente la primera decena de días de cada mes calendario. Las imágenes con el NDVI calculado fueron registradas y corregidas geométricamente usando puntos de control conocidos en coordenadas de Gauss-Kruger e ingresadas a un SIG. La variación temporal del NDVI fue analizada calculando los promedios del mismo agrupando los datos en intervalos de dos variables de alta carga

individual para la definición de zonas homogéneas, como los Argiudoles y Natracuoles (Capítulo 3).

Las diferencias entre cambios temporales del NDVI de cada zona fueron evaluadas mediante su ajuste a curvas polinómicas (Derrien et al., 1992) y sus diferencias significativas para los pares de medias (test de U de Mann-Whitney). Los escores factoriales de componentes principales producto del análisis de regionalización fueron usados como variables independientes en un análisis de regresión lineal múltiple por pasos contra los valores de NDVI.

4.3 Resultados y discusión

En las Figuras 4.2 a y b se observa la variación temporal del NDVI calculada agrupando los datos según el porcentaje de suelos Argiudoles y de Natracuoles, respectivamente. Tanto visual como estadísticamente, para la mayoría de los meses no existen diferencias significativas en los valores del índice entre los distintos porcentajes de suelos (Tabla 4.1). Este hecho lleva a suponer que la subdivisión del espacio (ver Capítulo 3) mediante las variables individuales no puede ser usada como un elemento del paisaje que explique la variación temporal de la cobertura vegetal de las comunidades que soportan, al menos a la escala de percepción utilizada.

Los promedios calculados son similares ($p > 0.05$) para estos suelos en todos sus rangos de cobertura areal, lo que indicaría que existen otras variables implicadas en la definición del NDVI y su variación anual, o que la combinación de otras variables de alta carga en la definición de zonas agroecológicas puede jugar un papel importante.

Lic. Marcelo Luciano Gandini

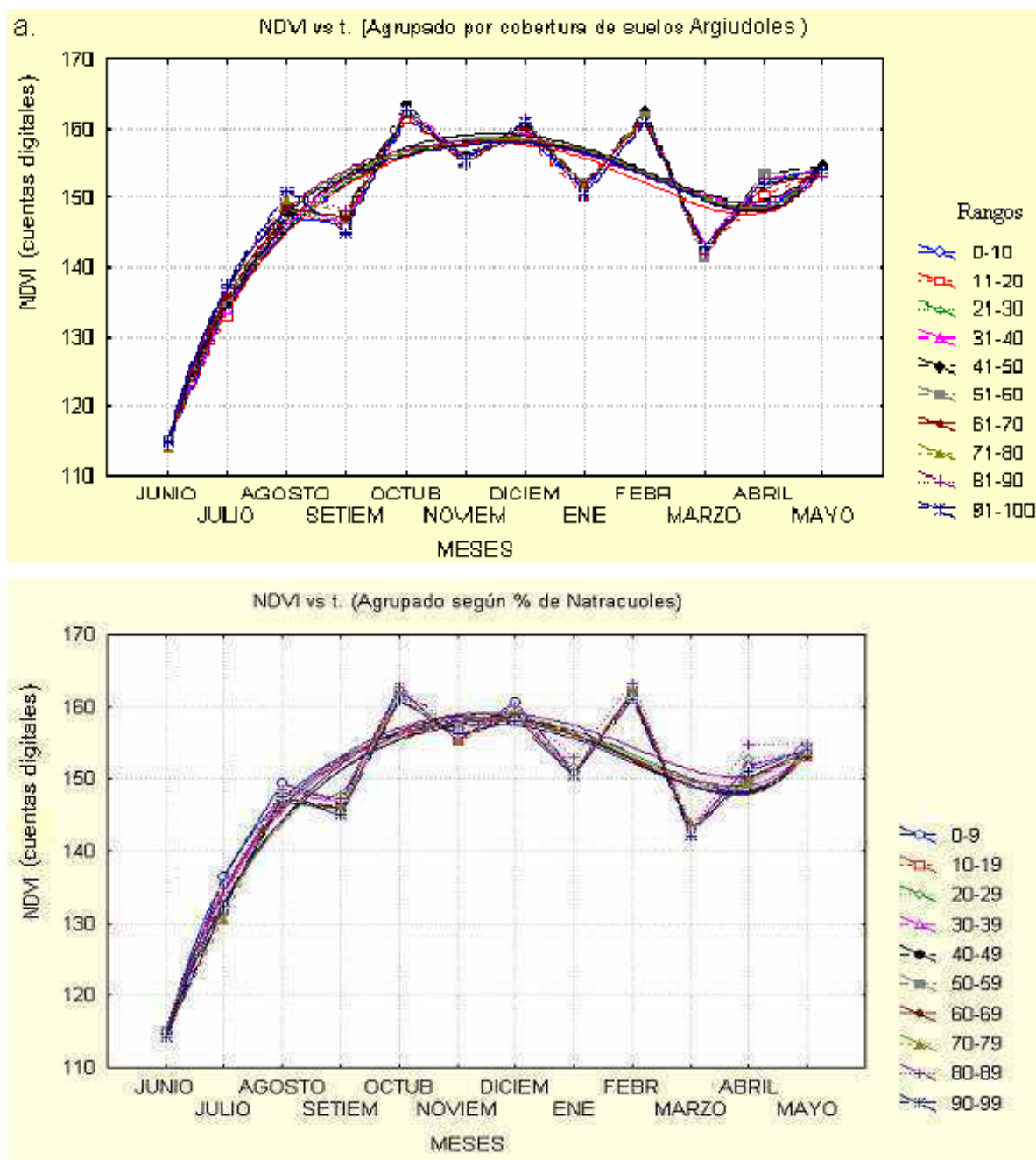


Figura 4.2: Variación en el tiempo del NDVI para diferentes rangos de porcentaje de suelos Argiudoles (a) y Natracuoles (b). Las curvas continuas corresponden al ajuste de polinomios de grado 5 (coeficiente significativo hasta grado 2)

Un análisis similar del NDVI en función del tiempo, pero agrupando según las zonas definidas en el Capítulo 3, se presenta en la Figura 4.3. Las zonas homogéneas tienen un comportamiento diferencial entre sí (Tabla 4.1). La tendencia general es a aumentar desde el mes de junio, coincidiendo con el aumento de radiación solar en el hemisferio sur, con máximos en los meses de octubre y febrero, correspondiendo al crecimiento de las especies primavero-estivales y estivo-otoñales respectivamente, tanto de los campos naturales como de los cultivos anuales que se siembran normalmente en la zona (ver capítulo 2).

Luego de una caída del NDVI en el mes de marzo (mes de lluvias) debido a la presencia de agua en superficie, se observa un aumento del índice en las zonas 1, 2, 5 y 6, las que tienen un uso Ganadero o Mixto. Esto lleva a suponer que luego del período de lluvias (febrero-marzo) existe un rebrote de vegetación luego del estrés hídrico y del pastoreo del verano. La caída abrupta del índice en todas las zonas entre los meses de mayo y junio se podría deber a la aparición de heladas, que provocan una disminución sustancial de la biomasa verde de las especies hemicriptófitas y al reposo invernal de las especies del pastizal, sumado al pastoreo continuo. Debido a la resolución temporal de este análisis es imposible encontrar una relación entre la fecha de las primeras heladas y la caída del NDVI.

La zona 4 presenta un incremento en abril, pero sensiblemente menor que el de las otras zonas, con un pico en el mes de marzo. Esta zona posee un uso ganadero-agrícola (ver Capítulo 3) y su particular comportamiento puede deberse a la respuesta de comunidades naturales con predominancia de especies estivo-otoñales tardías, o una mayor predominancia de cultivo de verdeos de invierno. La zona 6 (una de las dos de mayor uso agrícola) presenta los valores mínimos para la época de invierno, coincidiendo con el momento de mínima cobertura de los cultivos anuales, y los valores máximos en verano, relacionado con la alta superficie bajo explotación agrícola. Una interpretación similar

puede hacerse con la zona 3, pero en este caso es una zona mixta agrícola-ganadera, donde probablemente las pasturas cultivadas estén definiendo tal comportamiento.

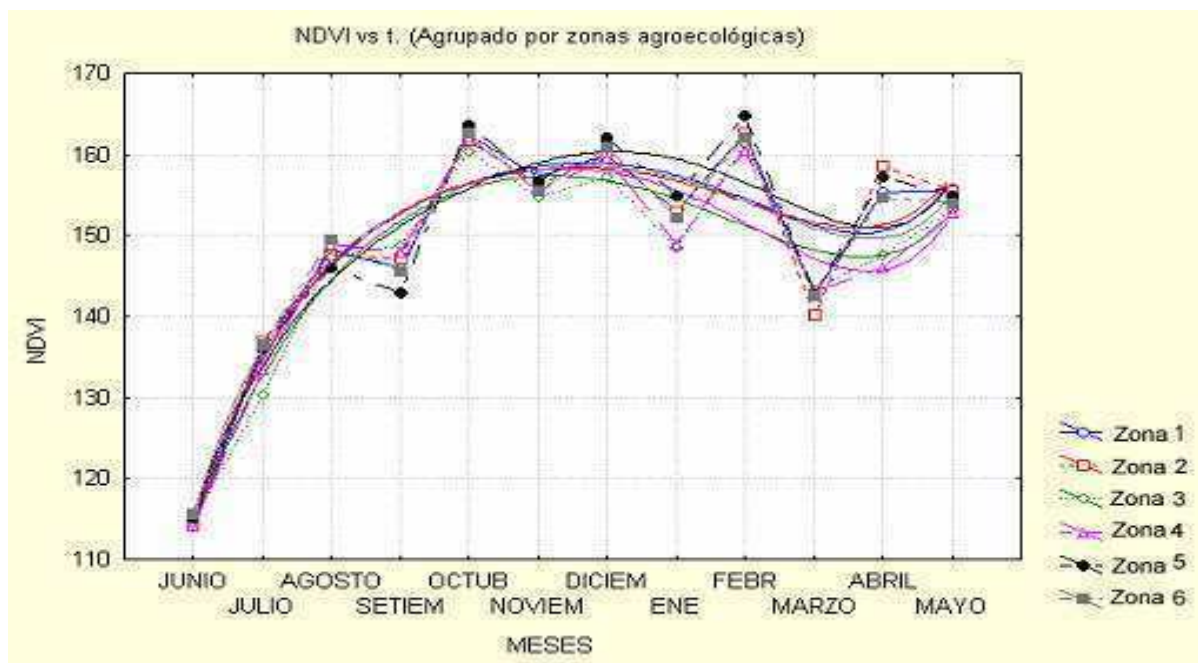


Figura 4.3: Variación del NDVI en función del tiempo para zonas agroecológicas. Las curvas continuas corresponden al ajuste de polinomios de grado 5 (coeficiente significativo hasta grado 2)

En la Tabla 4.1 se muestra el resultado del test de U (Mann-Whitney) para pares de zonas agroecológicas. Los resultados indican que en la mayor parte de meses las diferencias entre zonas son significativas, salvo en el par zona 1 - zona 2 y que la zona 6 (la de mayor uso agrícola) es la que presenta las mayores diferencias con las demás. Este hecho se debe principalmente a las variaciones del NDVI propias de las labores de los cultivos (arado, siembra y momentos de cobertura máxima) tanto de explotaciones de cultivos de invierno como de verano.

Lic. Marcelo Luciano Gandini

Tabla 4.1: Significación de las diferencias de medias usando test de U (Mann Whitney) para el NDVI agrupado según las zonas definidas en la Figura 3.17. Los números indican los meses (1-12) en que NO existieron diferencias significativas entre los pares de zonas ($p>0.05$), mientras que con DS se consigna los casos en que en todos los meses hubo diferencias significativas.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
1	*****	6-7-10-1-2-5	3-6	10-12-3	7-11-5	9-10-4
2		*****	6-8	9-10-12	6-11-5	7
3			*****	9-2-3-5	9-3	DS
4				*****	DS	10-11
5					*****	DS

Tabla 4.2: Ídem tabla 4.1 pero para el NDVI agrupado según cobertura de suelos Argiudoles. Los números indican los meses (1-12) en que existieron diferencias significativas entre los pares de zonas ($p>0.05$), con NDS se indica que no hubo diferencias significativas en ningún mes analizado.

%	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
0-20	**	10,12	7,12	6,7,8,9,12	6,7,8,9,12
21-40		**	NDS	6,7,8	6,7,8,9,12,1
41-60			**	6,8	6,7,8,1
61-80				**	NDS

Los valores por píxel del NDVI a lo largo de un año fueron analizados según regresiones múltiples por pasos. Como variables independientes se ingresaron los escores factoriales de los tres primeros factores del ACP (Capítulo 3), el porcentaje areal de cobertura de suelos Argiudoles y de Natracuoles. En la Tabla 4.3 se observa que en los meses analizados, la cobertura de ninguno los dos suelos ingresa al modelo de regresión, siendo el factor 2 el de mayor importancia en la definición del NDVI, y el 3 aparece solamente en el mes de junio.

Los resultados indican que el conjunto de variables consideradas en un modelo lineal de componentes principales se asocia fuertemente con el comportamiento del NDVI durante el período analizado, no ocurriendo lo mismo con dos de las variables individuales de mayor peso en la definición de zonas, cuya variación no alcanza para explicar este comportamiento.

Se observa del análisis anterior que las áreas agrupadas en zonas homogéneas del Capítulo 3, además de compartir características estructurales similares, como el tipo de suelos, las pendientes, anegabilidad, etc., presentan una dinámica particular explicada parcialmente por el uso de la tierra. Por otro lado, la explicación del comportamiento en NDVI de las zonas, sugiere una relación con el Uso/Cobertura de la Tierra, por lo que deberá explorarse ésta más adelante. Esta combinación de variables sugiere como apropiado el uso del término “zonas agroecológicamente homogéneas” para la regionalización realizada.

Tabla 4.3: Regresión múltiple por pasos entre cobertura de suelos, y componentes usados para la definición de zonas agroecológicas versus NDVI mensual. Los meses se indican con las tres primeras letras. C.R: coeficiente de regresión; Prob.: Probabilidad. VAR:Variable (variables usadas: F1,F2,F3: Ejes de componentes principales, %Argiudoles y %Natracuoles)

	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
C.R.	,62	,46	,26	,2	,2	,00	,53	,69	,41	,00	,71	,31
Prob.	<,05	<,05	<,05	<,05	<,05	>,05	<,05	<,05	<,05	>,05	<,05	<,05
VAR	F3,F2	F2,F1	F1	F2	F2		F1,F2	F2	F2		F2	F2

4.4 Conclusiones

La subdivisión del espacio de estudio en zonas agroecológicas homogéneas, lleva a encontrar diferencias en la dinámica temporal del NDVI, que pudo ser interpretada como regida por las variables utilizadas para separar en ambientes, además de recurrirse a diferentes actividades antrópicas para completar una interpretación. Por otro lado, la subdivisión del espacio utilizando criterios únicamente edáficos, no logra poner en evidencia ningún comportamiento similar.

5. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE VARIABLES DE IMPORTANCIA AGROECOLÓGICA Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI.

5.1 Introducción

Ya fue analizada la relación entre algunas variables individuales y el índice de vegetación, usando datos del satélite NOAA-AVHRR (Capítulo 4). Un conjunto de datos independientes de NDVI debería repetir las tendencias observadas. El fin del presente capítulo es desarrollar una metodología objetiva para la identificación, a nivel regional, de las relaciones entre variables básicas o "independientes" y otras "dependientes" generadas por percepción remota, generalizando las observaciones realizadas en el Capítulo 4. En este caso, las variables que definen las regiones de la cuenca del arroyo Del Azul, son consideradas "independientes" y el índice verde (NDVI) y el Uso/cobertura de la tierra como dependientes. Mediante la utilización de datos de NDVI provenientes del satélite SPOT Vegetation, tomados para la misma zona, con la misma resolución pero en años diferentes, debería repetirse una asociación entre el NDVI y las zonas definidas, ya que es un hecho que existe estrecha relación entre la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas a nivel regional (Baker, 1992; Noss, 1996). Una descripción de las correlaciones entre los mismos es un aporte a la definición de regiones naturales.

El NDVI se mostró que responde diferencialmente según la región considerada (Capítulo 4); por otro lado, se conoce que otras variables son también importantes en la

definición del proceso de precipitación-escorrentía. Tal es el caso del Uso/Cobertura de la Tierra, concepto definido principalmente para la clasificación de la superficie terrestre mediante percepción remota (Anderson et al., 1976).

Para lograr el objetivo propuesto, se propone la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) ensamblado a una base de datos y un paquete estadístico capaz de realizar análisis multivariado, específicamente análisis de correlaciones canónicas.

La oferta actual de software para análisis de imágenes de sensores remotos y SIGs no incluye la totalidad de las opciones que existen de análisis multivariado, restringiéndose únicamente al análisis de componentes principales y algunos tipos de cluster. Es así como, aún siendo factibles análisis como el de factores con distintos tipos de rotaciones, el análisis discriminante o las correlaciones canónicas, puede interpretarse que la ausencia de trabajos que exploren las capacidades de estos análisis usando bases de datos SIG o imágenes de satélite, esté relacionada principalmente al uso “empaquetado” de los software y la carencia de estas herramientas en los paquetes. El avance en este sentido, estaría favorecido por un trabajo más interdisciplinario.

Las correlaciones canónicas constituyen una generalización de las correlaciones simples y múltiples. Las correlaciones simples estiman la relación existente entre dos variables, la variable independiente X y la dependiente Y. Las correlaciones múltiples estiman la relación entre un conjunto de variables independientes y una sola variable dependiente Y. Las correlaciones canónicas estiman la correlación existente entre un conjunto de variables independientes y otro conjunto de variables dependientes. Las correlaciones canónicas indican entonces, en base a modelos lineales, cómo es la estructura de correlación entre los grupos de variables que explican la mayor parte de la variabilidad.

Desde el punto de vista metodológico el uso de las correlaciones canónicas exige varias reflexiones: la primera acerca del número de variables que componen el grupo X y el grupo Y. Si son muchas, posiblemente en cada grupo puede suceder que haya altas correlaciones entre las variables, lo cual es igual a decir que se están incluyendo variables redundantes. Si son muy pocas, se corre el riesgo de no incluir aquellas variables que realmente tienen mayor fuerza explicativa.

La segunda reflexión es que el comportamiento ideal de las variables se encuentra cuando existe una muy baja correlación dentro de cada grupo, tanto en el de las X como en el de las Y, y máxima entre los dos grupos. Esto implica una elección afinada de aquellas variables, por una parte, más relevantes y significativas tanto en el grupo de las X como en el grupo de las Y, a la vez que independientes entre sí dentro de cada grupo, es decir, aquellas que midan cuestiones distintas y aparentemente inconexas aunque naturalmente referidas al tema que se esté investigando. Por este motivo es necesario un acercamiento exploratorio durante el proceso de elección de variables para su ingreso a la matriz final de datos.

La metodología propuesta fue aplicada satisfactoriamente en un caso anterior para la misma zona con imágenes del satélite NOAA-AVHRR. La relación encontrada entre el NDVI y las zonas agroecológicas homogéneas, espera ser confirmada mediante la utilización de otra fuente de datos independientes como el NDVI calculado con la misma resolución para la misma zona pero para otro año, a partir de imágenes del sensor Vegetation a bordo del satélite SPOT (Unión Europea).

5.2 Metodología

Se contó con la base de datos utilizada en el Capítulo 3 para la regionalización de la cuenca, una estimación de Uso/Cobertura de la Tierra realizada con imágenes SAC-C, y datos de NDVI provenientes del sensor VEGETATION a bordo del satélite SPOT 4 para el período junio 2002-febrero 2004 (59 escenas correspondientes a composiciones de 10 días realizadas por el centro de distribución de las imágenes SPOT (VITO) de Bélgica.

5.2.1 Estimación de Uso/Cobertura de la Tierra:

Se dispuso de ocho ventanas de imágenes SAC-C de la cuenca del arroyo Del Azul para el período entre abril de 2001 a mayo de 2002. El tratamiento previo de las mismas consistió en el proceso que se describe a continuación (Rivas et al., en prensa):

Para la estimación del uso de la tierra se usaron las imágenes de septiembre y diciembre de 2001. A las restantes imágenes se les aplicó el mismo procesamiento, que se describe, para dejarlas disponibles para su uso en el análisis del Capítulo 7.

Para la transformación en reflectividad de las imágenes SAC-C se obtuvo la Reflectancia (**R**) a nivel de superficie a partir de una imagen Landsat 7 Thematic Mapper Plus (L7 ETM+). Con esta información (equivalente a la realización de medidas sobre el terreno) se realizó un ajuste lineal entre la cuenta digital (**CD**) y la **R**. Finalmente, se transformaron los valores de **CD** de cada banda del sensor MMRS a **R** en porcentaje (**R%**). En primer lugar se transformaron las **CD** de cada banda de las imágenes L7 ETM+ a radiancia a partir de los coeficientes de calibrado correspondientes, suministrados en el

archivo de encabezado de la imagen. La ecuación lineal aplicada para obtener la radiancia es:

$$L_{0(\lambda)} = a_0(\lambda) + a_1(\lambda) \cdot CD(\lambda) \quad (1)$$

$L_{0(\lambda)}$: radiancia que registra el satélite en la longitud de onda considerada

$a_0(\lambda)$ y $a_1(\lambda)$: coeficientes de calibrado propios del sensor.

CD: valor de cuenta digital.

Posteriormente se transformaron los valores de radiancia ($L_{0(\lambda)}$) en reflectividad ($R_{a\lambda}$) a nivel del sensor (resistividad aparente). Para la transformación se aplicó la siguiente expresión (Fleming, 2001):

$$R_{a\lambda} = \frac{\pi \cdot d \cdot L_{0(\lambda)}}{E_{0\lambda} \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

Donde:

$R_{a\lambda}$: reflectividad en la longitud de onda considerada (adimensional $0 \leq R_{a\lambda} \leq 1$).

d: distancia tierra sol, en unidades astronómicas.

$E_{0\lambda}$: irradiancia extraterrestre.

θ : Ángulo cenital.

En segundo lugar se realizó la corrección atmosférica aplicando el modelo denominado de corrección del histograma por valores mínimos (Chávez, 1988). Para ello se sustrajeron los valores mínimos de áreas de fuerte absorción (por ejemplo, agua) presentes

en la banda 1 (la más afectada por los efectos de absorción) al resto de las bandas. Este método fue utilizado por la ventaja de requerir sólo información contenida en la propia imagen, ya que no se dispone de perfiles atmosféricos para la zona. Una vez calculados los valores de $R(\%)$ en L7 ETM+ a nivel de superficie, se realizó un ajuste lineal para SAC-C. Para ello, se seleccionaron superficies invariantes (Caselles y López García, 1989) en las imágenes SAC MMRS y L7 ETM+, y se calcularon los coeficientes de ajuste para cada una de las bandas del sensor MMRS. Posteriormente, con dichos coeficientes se transformaron en $R(\%)$ las CD de cada banda del sensor MMRS.

Por otro lado, y debido a que se trabajó en la zona de superposición de imágenes de diferentes path (224, 225 y 226), lo que implica un error geométrico considerable, se realizó una corrección geométrica, usando la aproximación del vecino más cercano para los valores de píxeles, y registración previa al uso de las mismas, con errores menores a 1 píxel en todos los casos.

El uso de la tierra fue estimado combinando clasificación visual y automática, usando una clasificación amplia similar a la usada en las tablas de curva número (SCS, USDA, 1973). Se consideraron seis usos diferentes: urbano, cuerpos de agua libres, arboledas y montes, pastizales (naturales y pasturas), cultivos de invierno y de verano.

5.2.2 Tratamiento de imágenes Vegetation

El índice NDVI para los distintos meses incluidos en este análisis se obtuvo de imágenes Vegetation disponibles en el sitio VITO (<http://free.vgt.vito.be/>). Las mismas fueron georreferenciadas, y recortadas para obtener el NDVI correspondiente al rectángulo que incluye la cuenca del arroyo Del Azul (Figura 5.1).

Las imágenes Vegetation a partir de las cuales se calculó el NDVI, tienen las siguientes características (Boles et al., 2004):

Bandas espectrales:

- azul (B0; $k = 430-470$ nm), se utiliza sobre todo para la corrección atmosférica.
- rojo (B2; $k = 610-680$ nm),
- infrarrojo (B3; $k = 780-890$ nm),
- infrarrojo de onda corta (B4: SWIR; $k = 1580-1750$ nm), es sensible al contenido de agua del suelo y de la vegetación y puede mejorar la discriminación de la vegetación y de otros tipos de la cubierta de tierra

Otras características:

- Amplitud de vista de 2250 kilómetros.
- Cobertura diaria del globo en resolución espacial 1 Km.

Las bandas 0, 2, 3, y 4 son equivalentes a las bandas 1, 3, 4, y 5 del Landsat (TM), respectivamente, según Boles et al. (2004) y por lo tanto también equivalentes a las bandas correspondientes del SAC-C.

Procesamiento de las imágenes (tomado del sitio de SPOT). <http://www.spot-vegetation.com/vegetationprogramme/index.htm>:

Las imágenes crudas son corregidas atmosféricamente por todos los efectos relevantes para las longitudes de onda y escala en cuestión. Se corrige por vapor de agua, ozono, aerosoles, etc., y los píxeles con nubes son marcados y enmascarados.

La corrección geométrica se hace en forma sistemática con puntos de control en Latitud-Longitud.

Las imágenes distribuidas son compuestas de diez días (tres para cada mes): días 1-10, 11-20, y 21 al final de cada mes. Los datos VGT-S10 son generados seleccionando los píxeles que tienen los valores del máximo NDVI dentro de estos períodos de diez días. Este acercamiento ayuda a reducir al mínimo el efecto de la cubierta de nubes y la variabilidad en profundidad óptica atmosférica.

En la Figura 5.1 se muestra un ejemplo donde puede verse el recorte realizado para la cuenca del arroyo Del Azul, con dos zonas de colores oscuros donde se ubican las ciudades de Azul y Cacharí (dentro de la cuenca en estudio). La interpretación de los otros colores puede hacerse usando la teoría del color (Capítulo 3).

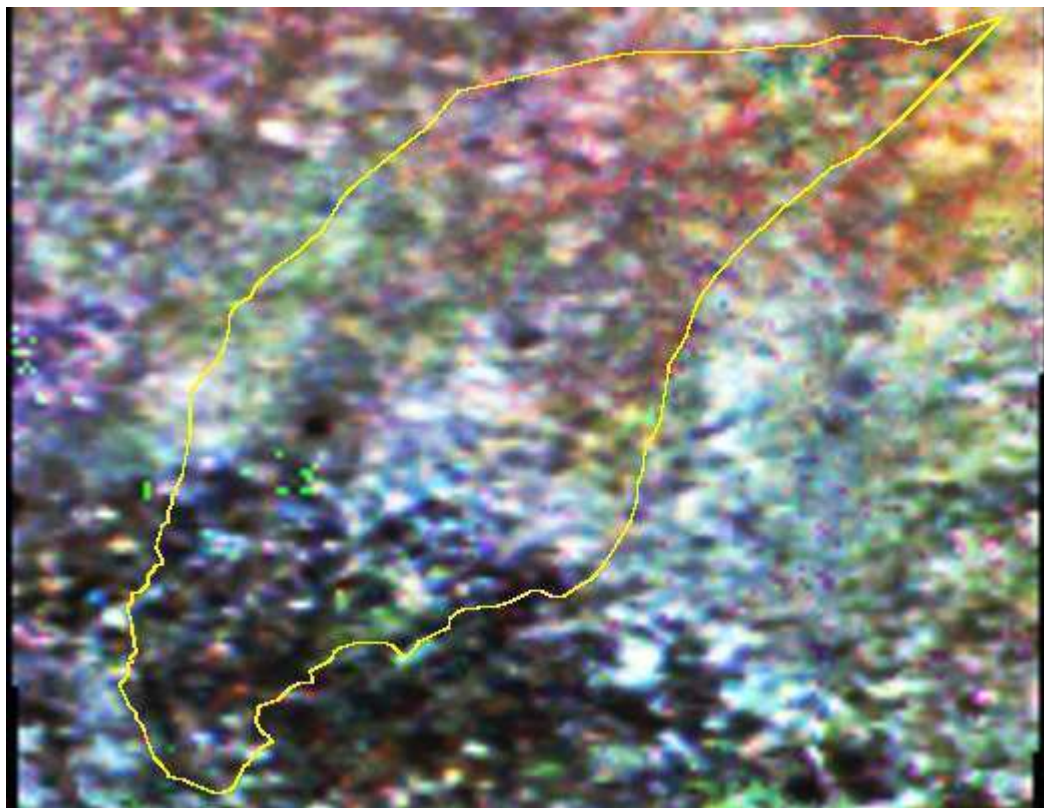


Figura 5.1: Imagen compuesta Red, Green, Blue (RGB) de NDVI de la primera semana de los meses de junio (Rojo), julio (Verde) y agosto (Azul) de 2002, con un vector de la cuenca del arroyo Del Azul en amarillo, superpuesto. Se observan píxeles en color verde puro, indicando la presencia de contaminación del dato por nubes. Estos píxeles fueron excluidos del análisis. Los colores deben ser interpretados en base a la teoría del color.

5.2.3 Tratamiento estadístico de los datos

Los datos fueron manipulados con IDRISI y ENVI y analizados por Correlaciones canónicas previa estandarización de las variables con SYSTAT 11.0. El uso de la tierra fue tratado como una variable categórica (no continua) en el análisis. La hipótesis estadística de las correlaciones canónicas fue que las combinaciones lineares de las variables dependientes estaban correlacionadas con las combinaciones lineares de las variables independientes.

Los píxeles contaminados por nubes fueron descartados en el análisis de correlaciones canónicas, y luego reemplazados por el promedio e ingresados nuevamente para el cálculo de los escores factoriales, con el objetivo de contar con imágenes producto del análisis.

Se realizó primero un análisis exploratorio, con el fin de identificar aquellas variables que cumplieran con los siguientes requisitos:

- Baja correlación en su grupo.
- Alta carga (loading) en los análisis preliminares de Correlaciones Canónicas.

En el análisis final se decidió utilizar una rotación Varimax para los tres primeros ejes, con el objeto de potenciar la representatividad de las variables de mayor carga en los ejes canónicos y obtener resultados similares a los de Componentes Principales (Capítulo 3).

Los escores factoriales obtenidos en el análisis final, fueron tratados como nuevas variables, y compuestos en el GIS mediante una rutina de composición de imágenes para ser analizados en conjunto. Los datos fuera de la cuenca en estudio fueron tratados como de peso 0.

5.3 Resultados

Se realizaron dos análisis preliminares y se descartaron las siguientes variables en base a los criterios definidos:

Independientes: Fisiografía, Natracualf mólicos, Argiudoles, Uso de la Tierra y Orientación.

Dependientes: De las 59 imágenes disponibles inicialmente para el período utilizado, se decidió ingresar al análisis final una imagen de cada una de las tres disponibles para los meses de junio a diciembre de 2002, debido a las altas correlaciones y la redundancia observadas. Este hecho se supone que se debe a que, al tratarse de imágenes consecutivas en el tiempo, existe una mayor probabilidad de correlación. Si bien esta correlación es interesante y será usada para explicar los resultados, las correlaciones entre fechas demasiado cercanas, pueden “oscurecer” las relaciones buscadas. Por construcción, estas imágenes consecutivas en el tiempo podrían contener píxeles con valores de NDVI muy similares.

Las variables finalmente utilizadas en el análisis fueron las siguientes:

Independientes (grupo Y): Natracuoles, Argiudoles, Natracualf típicos, Natracuoles mólicos, Complejos indiferenciados, Hapludoles líticos, Argialboles, Pendientes y Lluvias.

Dependientes (grupo X): NDVI (primera decena de días de cada mes) de los meses de junio 2002 a enero de 2003.

La correlación total fue muy significativa ($r^2=0.748$; $p<10^{-4}$), aunque menor que la obtenida utilizando todas las variables disponibles ($r^2=0.981$; $p<10^{-5}$). Esta evidencia es suficiente y con alta significancia estadística para el rechazo de la hipótesis nula, por lo que no se rechaza la hipótesis de trabajo expuesta anteriormente.

La predictibilidad de cada una de las variables dependientes en base al conjunto de las independientes fue altamente significativa para todas ellas ($p < 10^{-4}$). Estos resultados apoyan la idea que el conjunto de variables utilizado para la regionalización estaría definiendo el comportamiento observado del NDVI (Capítulo 4).

Existe correlación significativa entre las variables canónicas, resultantes de las combinaciones lineales que proporcionan la máxima explicación de la variabilidad presente (Tabla 5.1). Los ejes canónicos por su parte están contruidos con la totalidad de las variables dependientes e independientes usadas en el análisis. Esta afirmación es válida para los ejes hasta el 5 inclusive, pues las correlaciones canónicas fueron significativas hasta el factor 5; ($p < 0.05$; test de Bartlett para correlaciones residuales; se muestran hasta el tercer eje en la Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Carga de las variables sobre sus correspondientes ejes canónicos (VC: Eje canónico). En negrita las variables independientes y en la última fila el valor de correlación obtenido y la redundancia de cada grupo de variables. No se consignan las cargas cuyo módulo sea menor a 0.25.

Variable	VC1	VC2	VC3
Natracuoles	0,859	--	--
Argiudoles	-0,734	--	0,429
Natracualf típicos	--	--	-0,811
Natracualf mólicos	--	0,415	-0,431
Complejos	--	0,584	--
Hapludoles líticos	-0,535	--	--
Argialboles	--	-0,429	-0,264
Pendientes	-0,555	--	--
Lluvias	--	-0,820	0,381
<i>Varianza explicada X</i>	22,674	18,453	13,883
<i>Redundancia X</i>	0,110	0,035	0,023

Lic. Marcelo Luciano Gandini

NDVI 6/02	-0,802	--	-0,402
NDVI 7/02	--	0,641	--
NDVI 8/02	--	0,536	--
NDVI 9/02	--	0,700	--
NDVI 10/02	-0,954	--	--
NDVI 11/02	-0,295	-0,571	--
NDVI 12/02	0,283	-0,603	0,613
NDVI 01/03	-0,365	-0,812	0,253
Varianza explicada Y	41,593	27,378	15,067
Redundancia Y	0,139	0,032	0,038
Correlación Canónica	0,737	0,469	0,405

En la Tabla 5.2 se presentan las correlaciones calculadas entre las variables usadas en el análisis dentro de cada grupo, y en la 5.3 entre los grupos X e Y. En general se observa una baja correlación entre las variables independientes (Tabla 5.2a), mientras que el NDVI presenta altos valores de correlación entre algunos meses consecutivos (Tabla 5.2b). Esto último es lógico que ocurra considerando la escala de tiempo utilizada, con respecto al ciclo de los cultivos y vegetación natural. Excluyendo el efecto de los meses consecutivos, las correlaciones entre variables dependientes e independientes son más fuertes (Tabla 5.3). Por ejemplo, observar las correlaciones entre NDVI de junio y Natracuoles y Argiudoles, y NDVI de octubre con Argiudoles y Natracualfes típicos. Las redundancias, si bien son mayores para el grupo de variables dependientes, son del mismo orden (Tabla 5.1).

Es interesante destacar las altas correlaciones (todas positivas) entre los meses de julio, agosto y septiembre: en estos meses debería haber una alta influencia del Uso de la Tierra en toda la cuenca. La explicación (basada en el uso) de este comportamiento es que

en aquellas zonas donde se ha arado el terreno, el mismo no presentaría respuesta de la vegetación hasta septiembre, y aquellas zonas donde existía alguna cobertura vegetal en julio, la conservan al menos hasta septiembre. Otro conjunto interesante de altas correlaciones es el que ocurre entre octubre-noviembre (positiva) y el grupo anterior (negativa). Para este caso, la explicación sería que los cultivos de invierno (trigo principalmente) alcanzan su máxima cobertura e índice de área foliar (Cañibano et al., 2004) en noviembre, contrastando con el suelo desnudo del invierno.

Un análisis similar se puede realizar para los cultivos de verano: las parcelas de cultivos de verano aumentan su cobertura vegetal durante los meses de noviembre, diciembre y enero, habiendo tenido muy baja cobertura en los meses de julio, agosto y septiembre, momento de preparación para la siembra. Por esta razón se observan correlaciones negativas entre estos grupos de meses y positivas dentro de los mismos (Tabla 5.2).

Tabla 5.2a: Correlaciones entre las variables de un mismo grupo. Variables independientes. Se destacan los mayores valores para una mejor visualización.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.Natracuoles	1								
2.Argiudoles	-0,604	1							
3.Natrac_ típicos	-0,228	-0,347	1						
4.Natrac_ mólicos	-0,227	-0,031	-0,157	1					
5.Complejos	-0,145	-0,076	-0,175	-0,101	1				
6.Haplud_ líticos	-0,235	0,162	-0,155	-0,078	-0,037	1			
7.Argialboles	-0,116	-0,083	-0,083	-0,054	0,106	-0,040	1		
8.Pendientes	-0,05	0,244	-0,152	-0,059	-0,053	0,478	-0,050	1	
9.Lluvias	0,193	0,198	-0,171	-0,012	0,325	-0,127	0,193	-0,226	1

Lic. Marcelo Luciano Gandini

Tabla 5.2b: Correlaciones entre las variables de un mismo grupo. Variables dependientes. Se destacan los mayores valores para una mejor visualización.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1. NDVI 6-02	1							
2. NDVI 7-02	0,205	1						
3. NDVI 8-02	0,160	0,845	1					
4. NDVI 9-02	0,108	0,715	0,785	1				
5. NDVI 10-02	0,728	-0,009	0,017	0,150	1			
6. NDVI 11-02	0,281	-0,398	-0,441	-0,347	0,490	1		
7. NDVI 12-02	-0,316	-0,255	-0,257	-0,370	-0,186	0,488	1	
8. NDVI 1-03	0,261	-0,305	-0,213	-0,355	0,337	0,483	0,563	1

Tabla 5.3: Correlaciones entre las variables del grupo X (columna izquierda) e Y (fila superior) . Se destacan los mayores valores para una mejor visualización

	NDVI 6-02	NDVI 7-02	NDVI 8-02	NDVI 9-02	NDVI 10-02	NDVI 11-02	NDVI 12-02	NDVI 1-03
1. Natracuoles	0,432	0,055	0,04	0,083	0,41	0,033	-0,347	0,044
2. Argiudoles	-0,491	0,065	0,037	0,014	-0,573	-0,195	0,18	-0,254
3. Natrac_ típicos	0,216	-0,091	-0,069	-0,05	0,375	0,251	0,159	0,325
4. Natrac_ mólicos	-0,16	0,167	0,184	0,146	-0,164	-0,192	-0,073	-0,306
5. Complejos	0,056	-0,064	-0,036	-0,126	-0,063	0,081	0,096	0,184
6. Haplud_ líticos	-0,325	-0,08	-0,099	-0,012	-0,256	-0,046	0,12	-0,091
7. Argialboles	0,1	-0,224	-0,175	-0,226	0,1	0,171	0,1	0,186
8. Pendientes	-0,36	-0,047	-0,111	-0,091	-0,329	-0,149	0,118	-0,129
9. Lluvias	0,026	-0,129	-0,057	-0,209	-0,149	0,074	0,025	0,068

Estos resultados llevaron a efectuar el análisis usando una rotación Varimax hasta los primeros 3 factores; de esta manera se consiguieron ejes similares a los obtenidos en el ACP (Capítulo 3).

La diferencia entre un análisis de factores con rotación Varimax y un análisis de componentes principales, radica en que para el primero la rotación puede realizarse para un subconjunto de ejes (en este caso se eligen los primeros 3), y en el segundo se realiza para todos. Por otro lado, el término de error se construye de manera diferente (Harman, 1976).

La Figura 5.2 muestra el resultado de la composición en una imagen RGB de los tres primeros escores factoriales del análisis. En la Figura 5.2a se observa la composición de los ejes canónicos definidos solamente por las variables independientes. Las zonas homogéneas observadas (entre 6 y 8) coinciden en general con las obtenidas en el Capítulo 3, aunque en este caso fueron descartadas algunas variables de las usadas en aquél.

En la Figura 5.2b se observa la composición de los tres primeros ejes de escores factoriales de las variables dependientes. Una visión general del mismo, y comparando con la Figura 5.2a, apoya el valor de correlación obtenido, principalmente en la zona norte de la cuenca. En la zona sur, que como ya se dijo es principalmente agrícola, se observa un mosaicado con un patrón típico de las variaciones espaciales producto del uso agrícola de la misma, revelando el mismo, la naturaleza dinámica de las variables a esta escala. Esta diferencia visual lleva a proponer que, de realizarse un análisis por zonas, la mayor correlación debería observarse en las zonas con uso no agrícola, por una cuestión de escala de tiempo y espacio. De esta manera, se puede evaluar visualmente que existe una correlación significativa entre las variables independientes utilizadas, y la variabilidad espacial del NDVI de las zonas de pastizales naturales, bajo uso ganadero. Esta asociación permite suponer que la condición de la vegetación natural está definida por las variables utilizadas en la regionalización, que indirectamente se relacionan con factores de stress, como la presencia de sales o sodio en el perfil del suelo, o la anegabilidad.

Las variaciones en el NDVI son muy marcadas dentro del ciclo de los cultivos. En el caso de la zona sur de la cuenca del arroyo Del Azul, se practican cultivos tanto de invierno como de verano, y se siembran pasturas y verdeos en diferentes épocas del año. Esta característica de uso de la tierra provoca que existan tres momentos del año con altos valores de NDVI, ocurriendo estos mismos separados en el espacio.

Tal particularmente variable comportamiento, sumado al uso diferencial de la tierra, provocaron que, por un lado se rechazara la variable “Uso de la Tierra” dentro de este análisis, pero por otro lado, se la considerara como una variable que, tal vez a otra escala de análisis, estaría condicionando la respuesta del NDVI.

En cuanto a la carga de los valores de NDVI en el primer eje, aparecen con mayores valores negativos los dos meses en que el suelo de la zona sur de la cuenca está desnudo, por lo que se supone un índice verde mínimo. Esto coincide con el mes de julio, cuando se siembra la mayor parte del trigo de ciclo intermedio y corto, y con octubre, mes de siembra de los cultivos de verano (soja, maíz, papa, etc.). Por su parte, la carga negativa de la variable Argiudoles está indicando que estos valores se alcanzan en este subgrupo de suelos, contrariamente a lo que ocurre en los Natracuoles. La interpretación en este caso es que los cultivos de la cuenca están asentados principalmente sobre los suelos Argiudoles, hecho que concuerda con su aptitud máxima de uso agrícola y con los resultados obtenidos en el Capítulo 3.

El segundo eje canónico estaría separando por comportamiento los usos de la tierra agrícolas y ganaderos, con altas cargas positivas en dos suelos de baja representatividad areal en la cuenca, como los complejos indiferenciados y los Natracualf mólicos. Estos últimos están restringidos a la zona centro-este de la cuenca en explotaciones típicamente mixtas agrícola-ganaderas. Las cargas negativas se concentran en otro suelo de baja

cobertura y las lluvias que, con alta carga, estarían definiendo los valores de NDVI de noviembre, diciembre y enero (también con alta carga negativa).

El tercer eje parece tener un comportamiento opuesto al segundo en valores de carga, lo que llevaría a interpretarlo de manera inversa a aquél, pero con el aporte de una alta carga de Natracualf (negativa) y Argiudoles (positiva) afectando los NDVI de junio (negativa) diciembre y enero (positiva). La interpretación de este eje no es tan clara, pero puede arriesgarse una relación también con el uso mixto de la zona centro-Oeste, donde los usos ganaderos se asientan principalmente en los suelos Natracualf y los agrícolas en los Argiudoles.

En la Tabla 5.4 se observan los valores de correlación total y los residuales según se van extrayendo los ejes canónicos. Se observa una gran absorción de la correlación por el primer eje, acompañado en parte por los dos siguientes. Aún existiendo correlaciones significativas con los ejes siguientes, los tres primeros ejes sirven para explicar la principal estructura de correlación entre las matrices utilizadas. Por otro lado, las varianzas explicadas de cada combinación lineal son mayores a 1 (explican más que cada variable individualmente), en tres ejes para el grupo Y, y en cuatro ejes para el grupo X (datos no mostrados). Por este motivo la discusión involucra los resultados basados en los tres primeros ejes canónicos.

Tabla 5.4: Autovalores de los ejes canónicos y parámetros de significación

Correlación Canónica	Autovalor extraído	Chi-Cuadrado	Grados de Libertad	Probabilidad
Total	--	2159,268	72	0,000
0.737	1	933,756	56	0,000
0.469	2	545,373	42	0,000
0.405	3	265,227	30	0,000

Lic. Marcelo Luciano Gandini

0.258	4	157,817	20	0,000
0.242	5	63,442	12	0,000
0.180	6	12,127	6	0,059
	7	4,793	2	0,091

Los scores factoriales correspondientes a cada sitio de la matriz inicial fueron combinados en una imagen compuesta RGB, donde cada color del falso color compuesto indica la predominancia de cada uno de los tres ejes canónicos, en una zona del espacio. Zonas con predominancia de píxel color azul indican un alto score en el primer eje. La misma interpretación debe hacerse con los colores verdes/segundo eje y para rojo/tercer eje (Figura 5.2 a (dependientes) y b (independientes)).

Cabe destacar la visible similitud entre las imágenes compuestas provenientes de dos análisis diferentes: PCA (Capítulo 3) y scores factoriales de variables independientes de CCA (este capítulo). Si bien el conjunto de variables no es el mismo, se mantuvieron en el análisis aquellas que aportaban mayor varianza en el PCA, obteniéndose un resultado visual similar, e incluso de mayor contraste espacial que el obtenido en el Capítulo 3.

Lic. Marcelo Luciano Gandini

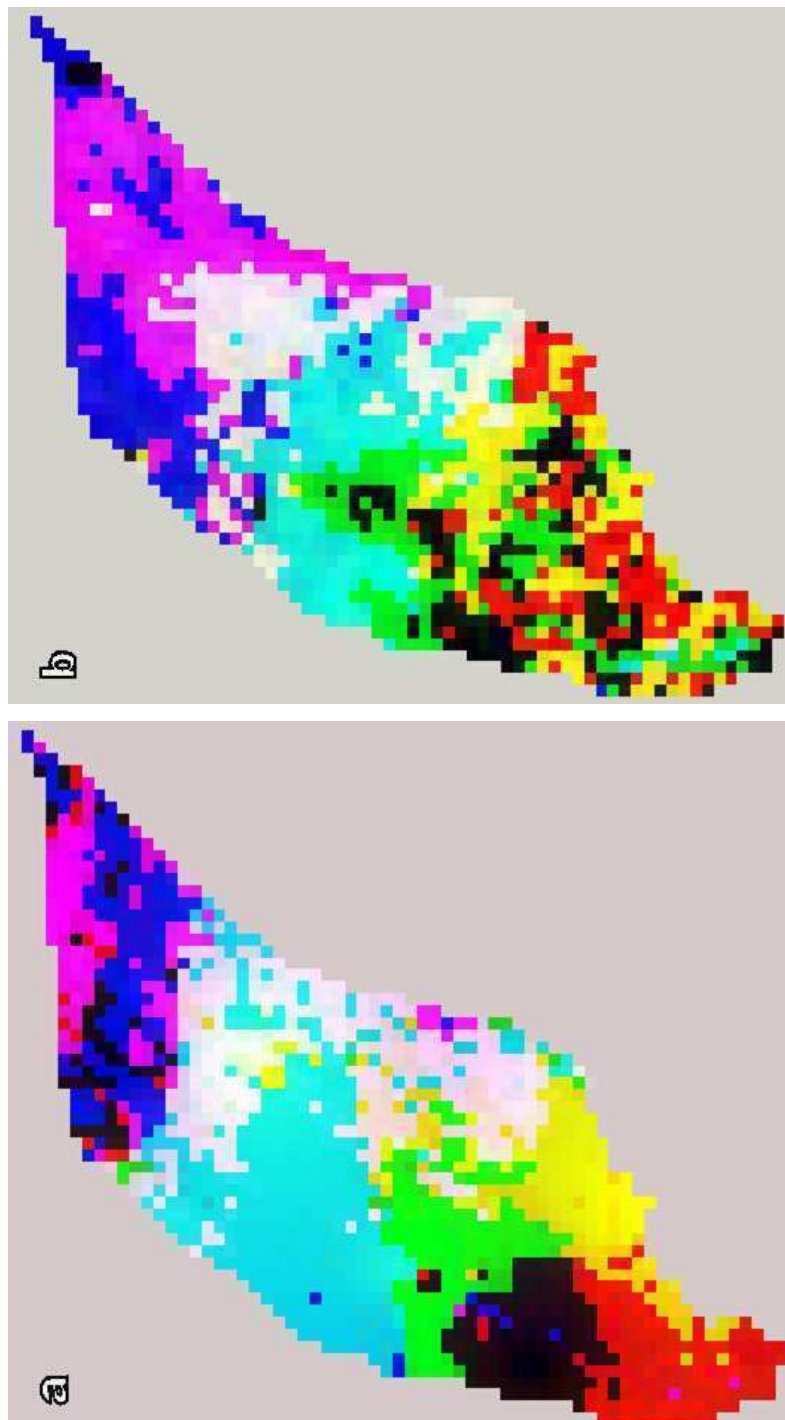


Figura 5 a y b.
Imágenes compuestas obtenidas con los escores factoriales de mayor carga en el análisis.
a. Indenendientes b. Denendientes

5.4 Discusión y conclusiones

La utilización del análisis de correlaciones canónicas provee una aproximación interesante a la interpretación de mapas generados por percepción remota. En este caso, la variación temporal de una variable usada ampliamente para describir la dinámica de los ecosistemas como el NDVI, se correlaciona con las variables ambientales que definieron la división de la cuenca en zonas homogéneas.

En particular, la serie de tiempo de NDVI utilizada como matriz de variables dependientes, se muestra una variabilidad vinculada estrechamente con las principales variables que definen las zonas homogéneas de la cuenca del arroyo Del Azul, principalmente condicionada por los suelos -entre ellos los de mayor representatividad areal como Natracuoles y Argiudoles- las pendientes, y las lluvias. Las restantes variables, si bien aportan a la correlación, lo hacen en menor medida y no afectan mayormente la significación de la correlación canónica, por lo que algunas fueron excluidas.

La rotación Varimax, unida a la “depuración” de variables produce un “realce” de las variables de mayor peso en la definición de los ejes. Esto puede observarse en la Tabla 5.1. Las variables de mayor carga son los Natracuoles, Argiudoles, y el NDVI de junio y octubre para el primer eje, que separa los sitios de uso predominantemente agrícola del resto. En el segundo eje las variables Lluvias y tres de los suelos (que ocupan escaso porcentaje de la superficie de la cuenca), junto con los NDVI de enero y septiembre son las que tienen más carga, y este eje separaría los ambientes de la cuenca media y baja, caracterizados por un uso predominantemente ganadero, y con diferentes características edáficas. Estos dos ejes en conjunto, inducen a separar visualmente trazando límites entre zonas al norte y al sur

de la cuenca. El tercer eje se define por los Natracualf típicos y por el NDVI de diciembre y enero y diferencian zonas en un sentido Este-Oeste, o sea en forma perpendicular a los ejes anteriores.

La variación en los NDVI durante el ciclo estudiado puede considerarse afectada por la productividad de los agroecosistemas involucrados (Tucker y Sellers, 1986). Por lo tanto, puede proponerse que en este análisis se está realizando una evaluación preliminar de cuáles son las variables independientes que aportan a definir la productividad en esta cuenca.

El papel del SIG en esta metodología es la ordenación espacial de los resultados en un mapa que es combinación de los factores que explican la mayor parte de la variabilidad original (Gandini y Entraigas, 1996). La elaboración de una "Imagen Compuesta" con los tres factores de mayor varianza explicada para cada grupo de variables es un sustrato apropiado para el análisis regional, ya sea mediante una interpretación visual directa o por agrupamiento de los nuevos valores de las EAU en clusters, de acuerdo con los objetivos de la regionalización.

La utilización este conjunto de recursos estadísticos y computacionales, si bien requiere de un manejo ajustado del uso de las variables y la interpretación de resultados, presenta la ventaja de sintetizar en pocas variables un sistema complejo. La representación gráfica que se obtiene, resume en un mapa la variabilidad espacial no obviamente perceptible a partir del análisis de las variables individuales. Este hecho, es evidentemente una ventaja relevante, del método paramétrico de regionalización.

La metodología utilizada junto a la inclusión en el conjunto de variables de aquellas de importancia agro-ecológica ofrece la oportunidad de contar con una regionalización dinámica, que puede ser ajustada a posteriori de acuerdo a las tendencias en el Uso de la

Tierra y/o cambios en las variables climáticas, o servir como base para la creación de planes maestros. Además, el uso de variables provenientes de sensores remotos ofrece un recurso invaluable para la detección de los cambios ecológicos como los producidos por variaciones en el uso de la tierra (Cherrill et al., 1994).

Por otro lado, el uso de un GIS es una herramienta indispensable cuando además de la descripción interesa el modelado y manejo de las complejas relaciones presentes en los Agroecosistemas.

En conclusión, en este estudio se presenta una combinación de herramientas útil para la evaluación y caracterización de zonas que poseen abundante información disponible pero no sistematizada y escasamente procesada.

6. APLICACIÓN DE LA BASE DE DATOS DE REGIONALIZACIÓN: ESTIMACIÓN DE LA CURVA NÚMERO SCS PARA LA CUENCA DEL ARROYO DEL AZUL.

6.1 Aspectos generales

El método de curva número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos de Norteamérica (USA) es un procedimiento simple, eficaz y ampliamente usado en la determinación de la cantidad esperada de agua de lluvia escurrida superficialmente en un área particular.

Su uso, sin embargo, requiere de un conocimiento detallado de varias propiedades importantes del suelo: la permeabilidad, el uso de la tierra y las condiciones antecedentes de agua del suelo, las que pueden no estar fácilmente disponibles.

La gran cantidad de información espacialmente detallada, derivada del procesamiento de imágenes satelitales, ofrece nuevas oportunidades para la estimación de la CN. Particularmente en esta estimación intervienen como parámetros el Uso de la Tierra y la Cobertura Vegetal. Este capítulo analiza el uso de variables provenientes de la interpretación de datos obtenidos por sensores remotos (NDVI, combinado con Usos de la Tierra) y de datos de características hidrológicas del suelo para estimar los valores de CN dentro de un GIS.

La importancia de estimar la CN radica en proveer información detallada de la cantidad de agua escurrida luego de un evento discreto de precipitación. Esta estimación podrá luego ser usada como parte de un sistema de alarma para predecir inundaciones con varias horas de anticipación en la cuenca del arroyo Del Azul.

6.2 Introducción

El método modificado de la Curva Número del Servicio de Conservación de Suelos de USA (CN-SCS; USDA, 1973), es usado en la predicción de los cálculos de caudales de ríos y arroyos para estimar la proporción entre la cantidad de precipitación que escurre y la que se infiltra en el suelo. Los valores de curva número, según sus autores, varían según la condición y cantidad de la cobertura vegetal del suelo, realizándose además algunos ajustes de la cantidad estimada de agua en la superficie del suelo. El cálculo se realiza para un estado “medio” de humedad. Si las condiciones antecedentes se desvían de esta condición, se las corrige de la siguiente manera: Si la humedad del suelo está por debajo del 60% de la capacidad de campo (condición antecedente I), la curva número se ajusta a valores menores y si la humedad está por encima de la capacidad de campo (condición antecedente III) la curva número se cambian a valores mayores, según una tabla de ajuste (USDA, 1973). Los valores de CN varían entre 0 y 100, dependiendo de la proporción entre el agua escurrida e infiltrada. Valores bajos indican una alta infiltración y valores altos indican un alto escurrimiento.

El análisis de la cobertura terrestre mediante sensores remotos puede ayudar a estimar el tipo de Uso/Cobertura de la Tierra para la determinación de la CN, como se ha hecho desde hace tiempo (Ragan y Jackson, 1980; Tiwari et al., 1991) pero no ha

sido todavía usado para evaluar la condición de la cobertura vegetal presente en cada uno de ellos (Gandini y Usunoff, 2004).

En situaciones de emergencia, por ejemplo ante la amenaza de inundaciones en zonas urbanas, es sumamente útil tener una estimación previa de la distribución espacial del uso de la tierra y del estado de la cobertura vegetal, para ese momento del año, para calcular el escurrimiento de una cuenca de la forma más insesgada posible (Gandini y Usunoff, 2004).

Como se ha dicho en capítulos anteriores, el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), un índice proveniente de observación remota, puede ser interpretado como un estimador de la cobertura vegetal terrestre (Tucker y Sellers, 1986). Este índice se ha transformado en un estándar en aplicaciones de cocientes de bandas, teniendo una larga historia en aplicaciones de los sensores remotos, como en Ecología y Geografía para estudiar características de la vegetación incluyendo biomasa, tipos y condición (Melesse y Jordan, 2003; Griffith et al., 2002).

Por otro lado se han hecho varios intentos en la interpretación de series de tiempo de NDVI; por ejemplo se lo ha utilizado para estimar la productividad, el índice de área foliar, la absorción superficial de CO₂, etc. basándose en el incremento de la cobertura vegetal (Tucker y Sellers, 1986; Sellers et al., 1992; Lüdecke et al., 1996), y para clasificar en tipos de cobertura en una escala regional (Derrien et al., 1992). Sin embargo todavía no se ha hecho ningún esfuerzo para usar el NDVI u otros indicadores de la cobertura vegetal para clasificar la superficie terrestre en clases de cobertura de biomasa.

Las imágenes SAC-C ya han sido probadas para cálculos regionales de NDVI, y son consideradas adecuadas por su resolución espacial y temporal para análisis a la escala de trabajo utilizada (Gandini et al., 2002: tamaño de píxel de 175 m y una

frecuencia de revisita de 6 días promedio para la cuenca del arroyo Del Azul). En el marco del aprovechamiento sustentable de los ecosistemas de nivel regional, es de importancia conocer, como parte de un sistema de soporte de decisiones, cómo es el comportamiento de zonas agroecológicamente homogéneas en cuanto al proceso de precipitación escorrentía.

El objetivo de este capítulo es construir un método capaz de evaluar los rangos de valores de curva número probables para las distintas zonas agroecológicas de la cuenca del arroyo Del Azul. Estos valores pueden ser usados luego en planes de emergencia para calcular los escurrimientos potenciales de la cuenca y/o predecir rangos de áreas inundables en la ciudad de Azul, situada a la orilla y en la parte media del curso del citado arroyo.

6.3 Materiales y métodos

La resolución espacial de este trabajo se mantuvo en 175 metros, debido a que el pixel de la imagen SAC-C posee esa resolución y que las otras fuentes de datos provenían de capas vectoriales, pudiéndose ajustar su resolución en el momento de su transformación a raster,

Para la estimación de la CN se utilizaron datos de NDVI y Uso/Cobertura de la Tierra, calculados a partir de imágenes SAC-C, cuyo origen y forma de procesamiento se detalla en el Capítulo 5. El NDVI de cada imagen fue calculado usando las bandas 3 (rojo) y 4 (infrarrojo cercano) en ENVI 3.4 y reclasificado (reescalado) con el módulo RECLASS en tres clases de cobertura vegetal con el GIS IDRISI.

El Uso de la tierra se estimó realizando una clasificación mixta. Se tomaron verdades de campo en polígonos con geoposicionador (GPS) en los meses de septiembre y diciembre de 2001 en dos campañas que incluyeron alrededor de 100 polígonos cada una, en los cuales se identificaron Usos y Coberturas de la Tierra, discriminando entre tipos de cultivos y especies dominantes en cada uno. En primer término se realizó una clasificación no supervisada, reteniéndose el máximo número de clusters posible. Luego se ingresaron los polígonos de campo sobre la imagen clasificada, discriminándose en tipos de uso o cobertura, si existían diferencias en la clasificación no supervisada. Luego se realizó una clasificación supervisada, usando el método de máxima verosimilitud.

Los suelos de la cuenca fueron reclasificados en grupos hidrológicos. Para esto los mapas de suelos digitalizados (Capítulo 3) fueron reelaborados de acuerdo con las definiciones del manual de USDA (USDA, 1973) resultando en un nuevo mapas temático de grupos hidrológicos de suelos (Figura 6.1). Se encontraron en la cuenca tres de los 4 grupos hidrológicos de suelos. Los suelos encontrados, corresponden a los grupos A, B, y C, correspondiendo estas clases a suelos sin ninguna restricción para la infiltración del agua (Suelos del grupo A) hasta con restricciones de arcilla o tosca a profundidades cercanas a la superficie (Suelos del grupo C).

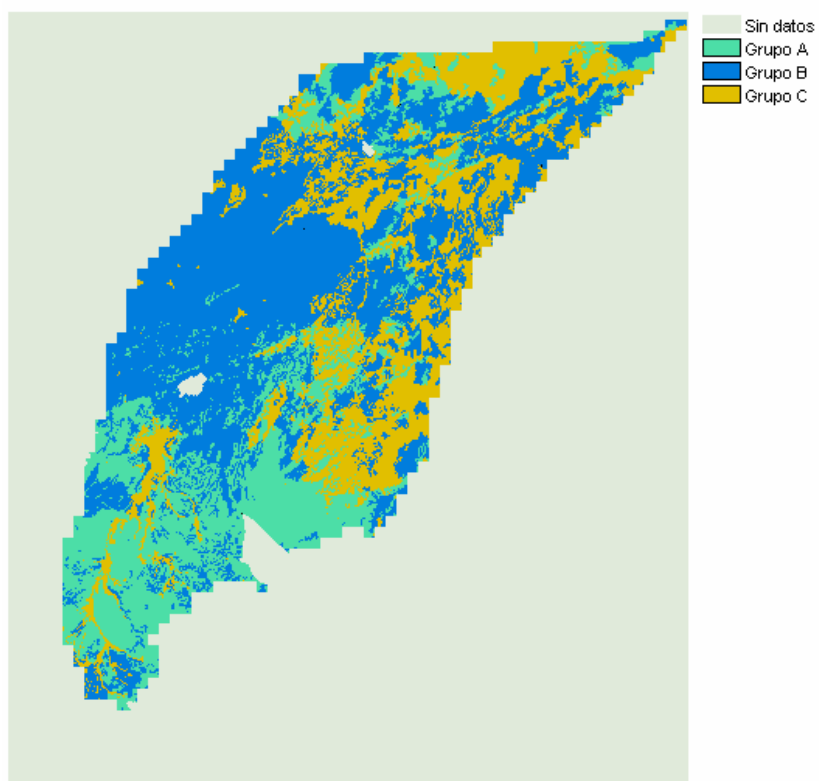


Figura 6.1: Grupos hidrológicos a partir de la interpretación de su definición (USDA, 1973). Las zonas en blanco corresponden a la ciudad de Azul y la Base Naval Azopardo y no poseen datos.

Grupo A: Sin restricciones a la infiltración

Grupo B: Alguna restricción (p.ej horizonte poco permeable)

Grupo C: Mayores restricciones (p. ej. horizonte impermeable; tosca)

Las estimaciones de Curva Número fueron realizadas usando operaciones matemáticas asignando números primos a las distintas combinaciones (Ferrer et al., 1995) en un ambiente GIS, utilizando mapas temáticos de suelos, Uso/Cobertura de la Tierra, y NDVI convertido a un valor de “condición de cobertura”: (pobre, intermedio, bueno). Las referencias de Curva Número extremos para la cuenca fueron tomadas de Gandini et al. (2000).

6.4 Resultados y discusión

Los valores promedio por Uso/Cobertura de la Tierra del NDVI variaron en el período de estudio con picos estacionales cercanos a la primavera y verano temprano para todas las clases (Figura 6.2), excepto para la Urbana. Se puede observar también una respuesta más temprana para las Arboledas y Montes a principios de verano. La diferencia en los valores de NDVI en el tiempo entre los diferentes tipos de Uso/Cobertura justifica la estimación de los valores de CN discriminando entre los mismos.

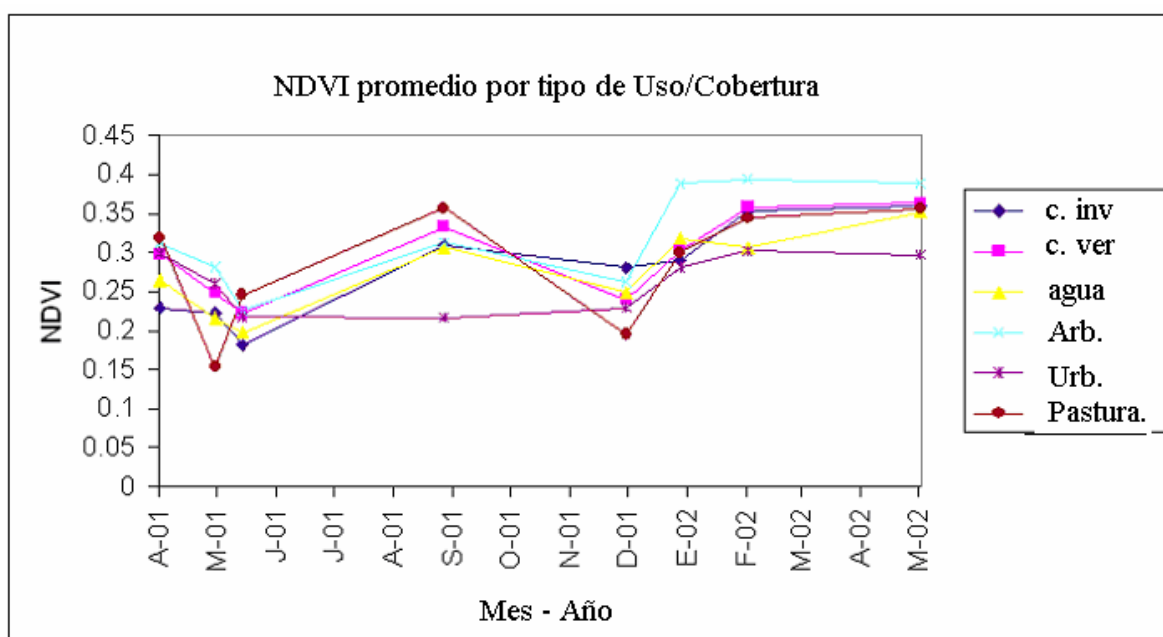


Figura 6.2: Variación de los valores promedio del NDVI para los distintos Usos/Coberturas de la Tierra analizados entre abril 2001 y mayo 2002.

Como puede verse en el mapa de Uso/Cobertura de la Tierra en la Figura 6.3, la actividad agropecuaria (Cultivos de invierno y de verano) está concentrada en el

tercio sur de la cuenca en estudio, mientras que en el resto predomina la ganadera. Los porcentajes y áreas de las seis clases están presentados en la Tabla 6.1.

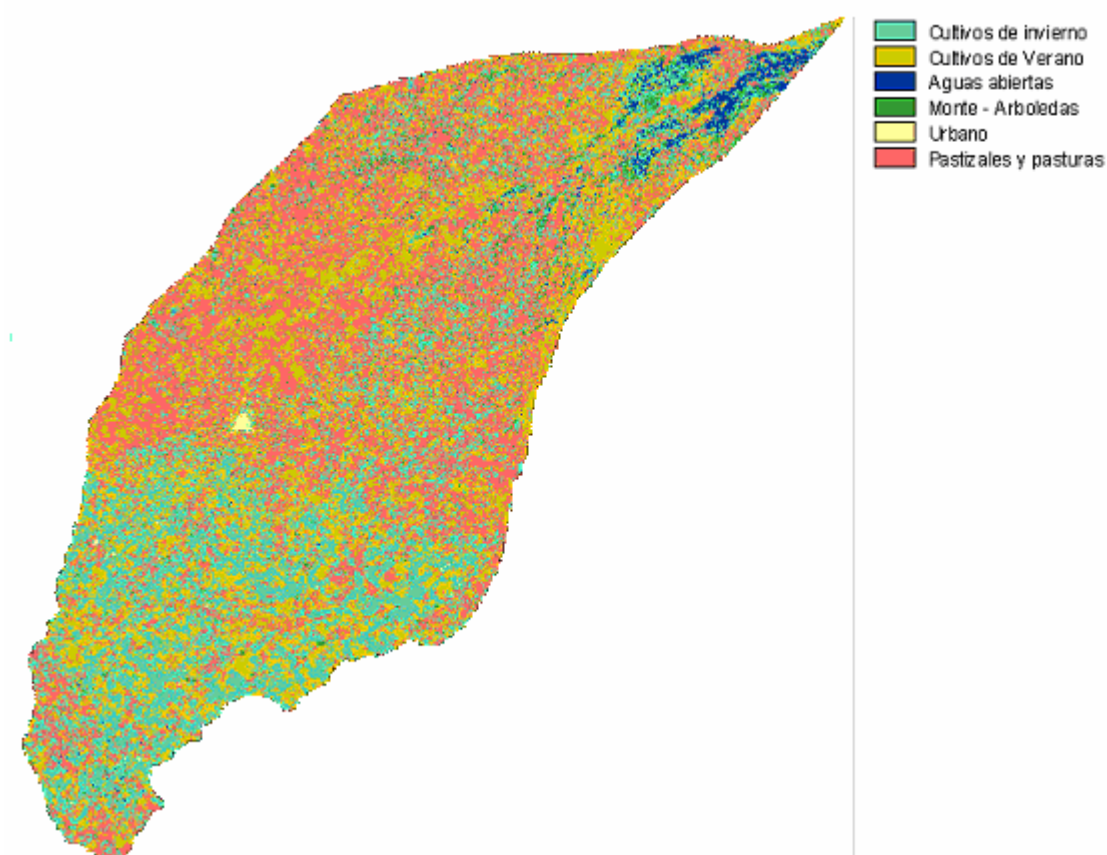


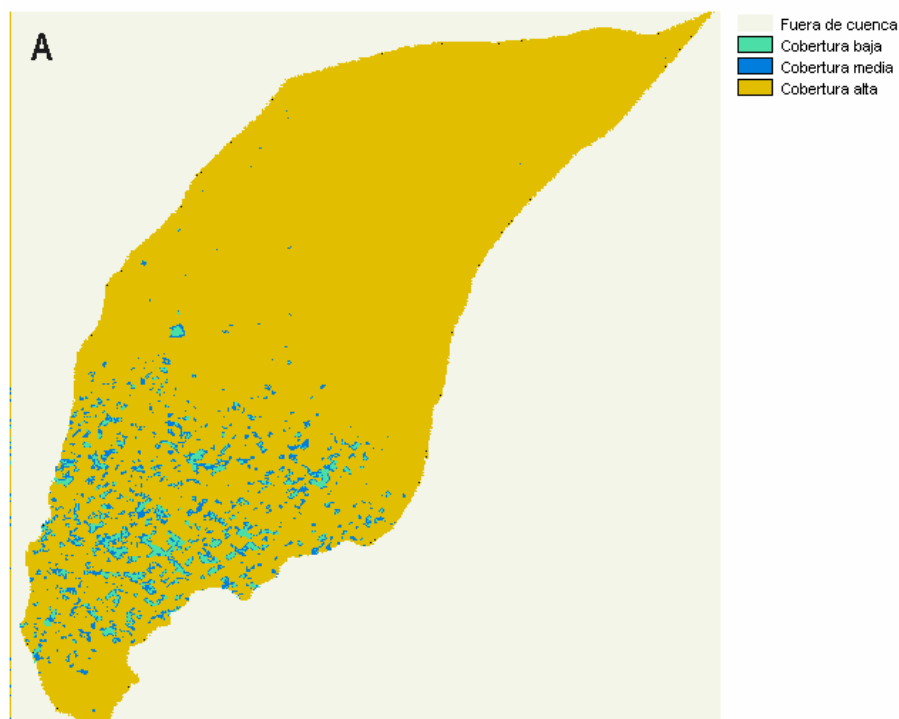
Figura 6.3: Uso/Cobertura de la Tierra de la cuenca del Arroyo Del Azul para el período 2001-2002. La clasificación se realizó según seis categorías: urbano (amarillo); cultivos de invierno (cian); cultivos de verano (ocre); pastizales y pasturas (rojo); Arboledas y Montes (verde oscuro) y cuerpos de agua (azul).

A fines del verano hasta mediados del otoño, la agricultura puede dejar el suelo descubierto en las zonas donde se la practica (Figura 6.3), coincidiendo justamente con la época de lluvias, entre el 20 de febrero y el 20 de mayo aproximadamente. Estos dos hechos en conjunto, contribuyen a que aumente el escurrimiento superficial de la cuenca, originando ocasionales inundaciones en la

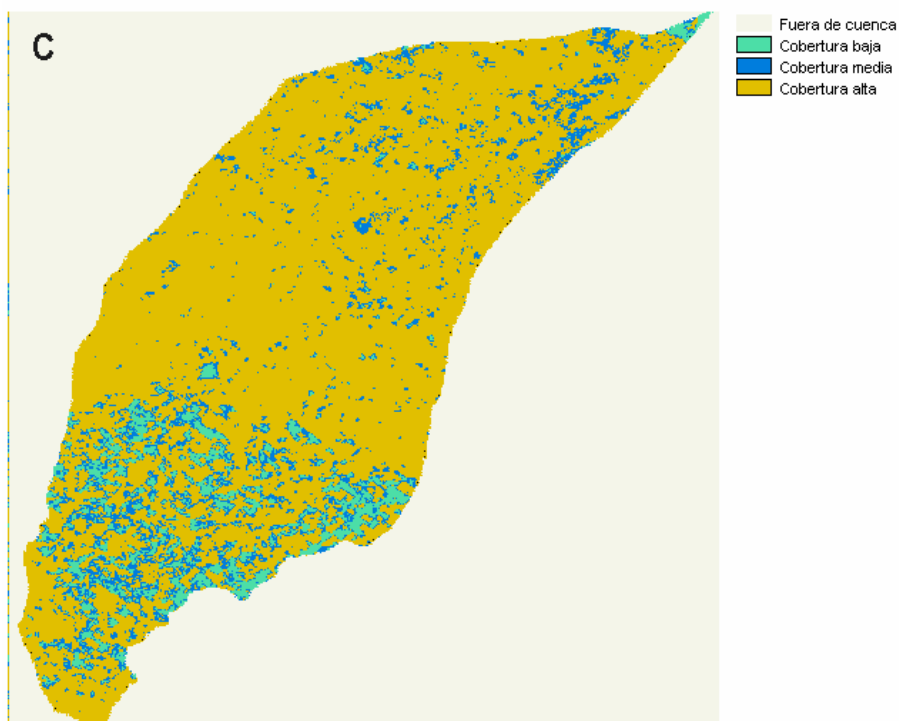
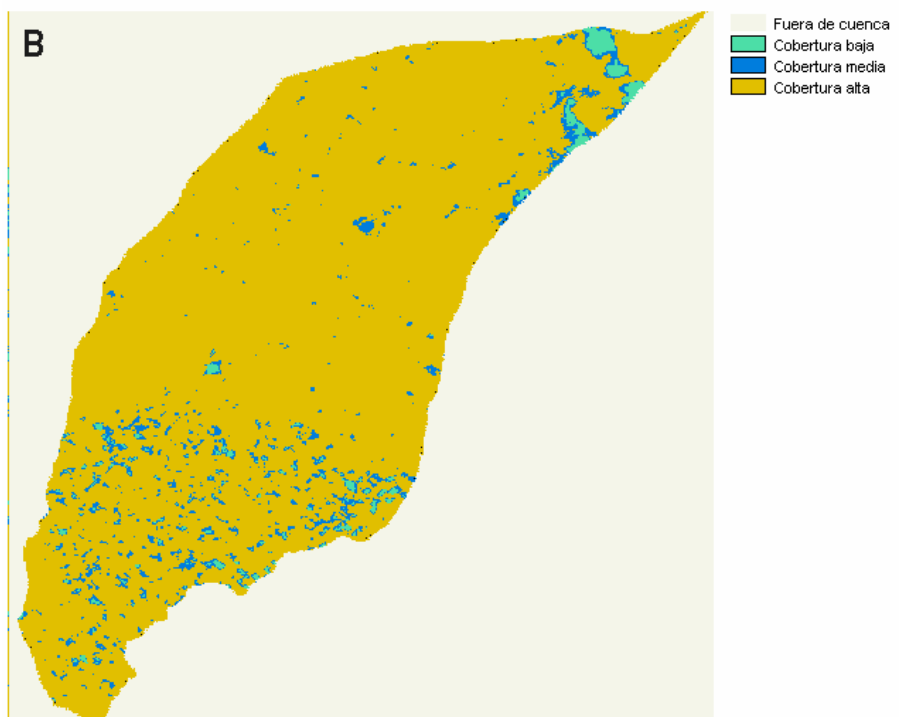
ciudad de Azul (Varni et al., 2004). La Figura 6.4 muestra los valores de NDVI convertidos a condición de cobertura, e ilustra la afirmación realizada anteriormente.

Tabla 6.1: Cobertura porcentual y área cubierta por los distintos Usos/Coberturas de la Tierra y valores extremos de Curva Número (CN), tomados de las tablas del Servicio de Conservación de Suelos de USA.

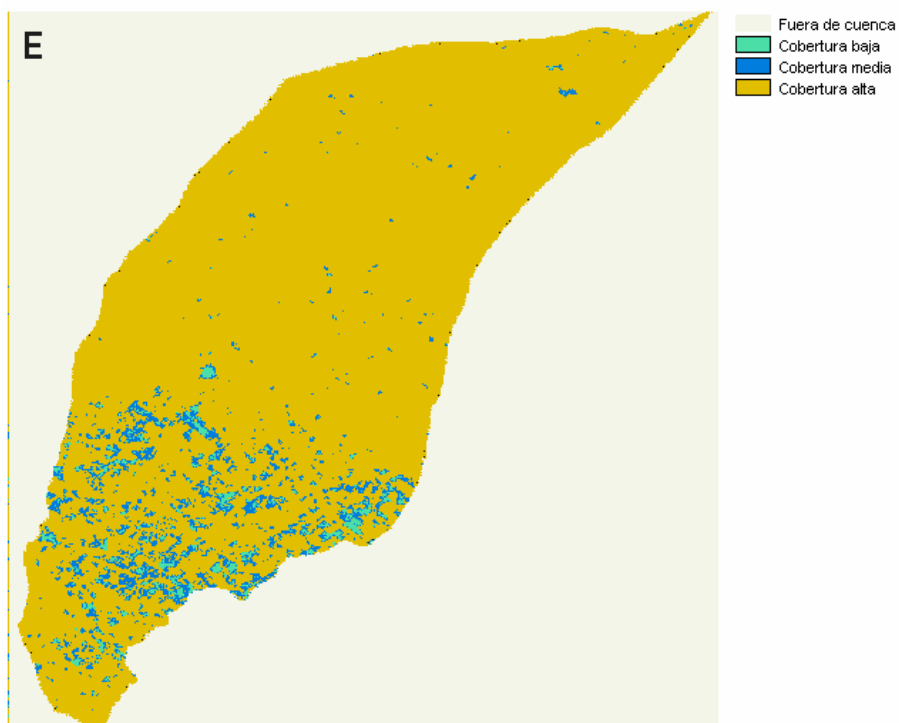
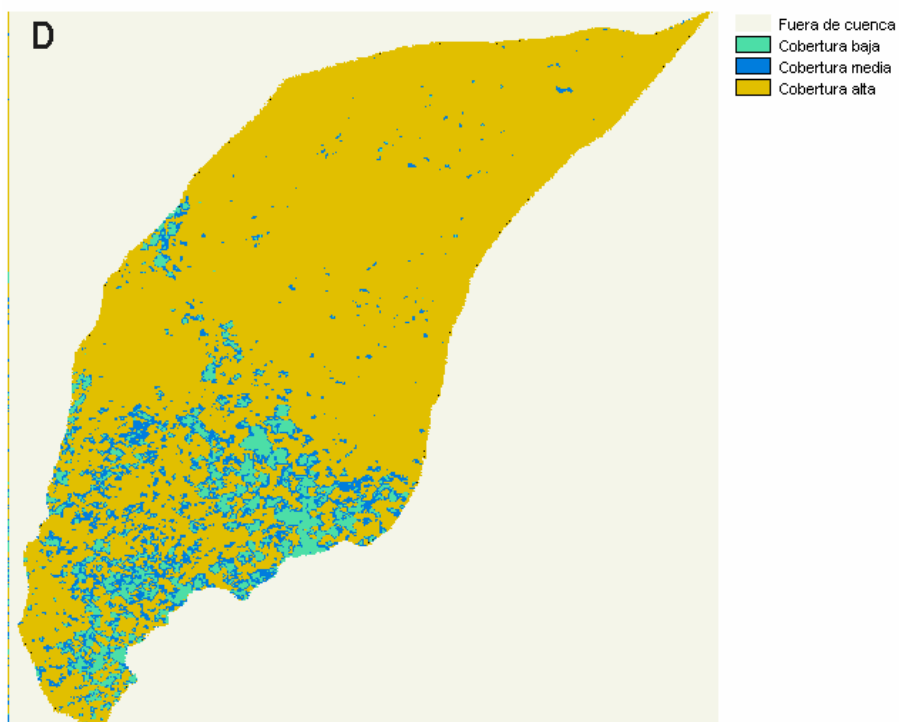
Uso/Cobertura de la Tierra.	Cultivos Invierno	Cultivos Verano	Agua	Arboledas	Urbano	Pastizales
Cobertura porcentual.	27,2443	27,5340	1,4519	2,3931	0,2036	41,1731
Área (ha)	204516,8125	206691,1875	10899,4375	17964,625	1528,1875	309076,6875
Rango de CN	65 - 82	72 - 81	100	45 - 77	74 - 92	68 - 79



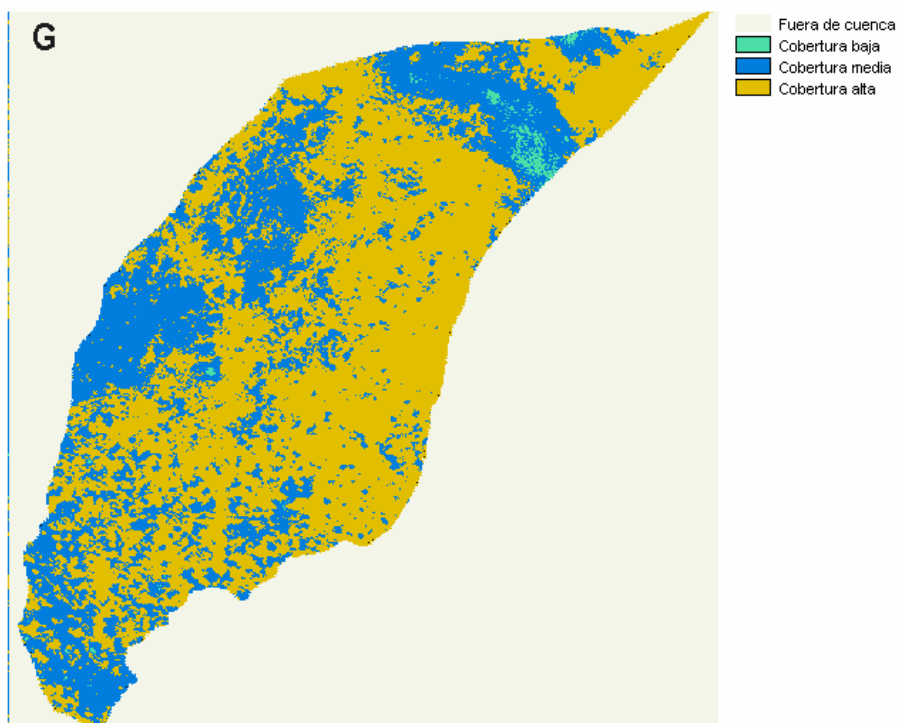
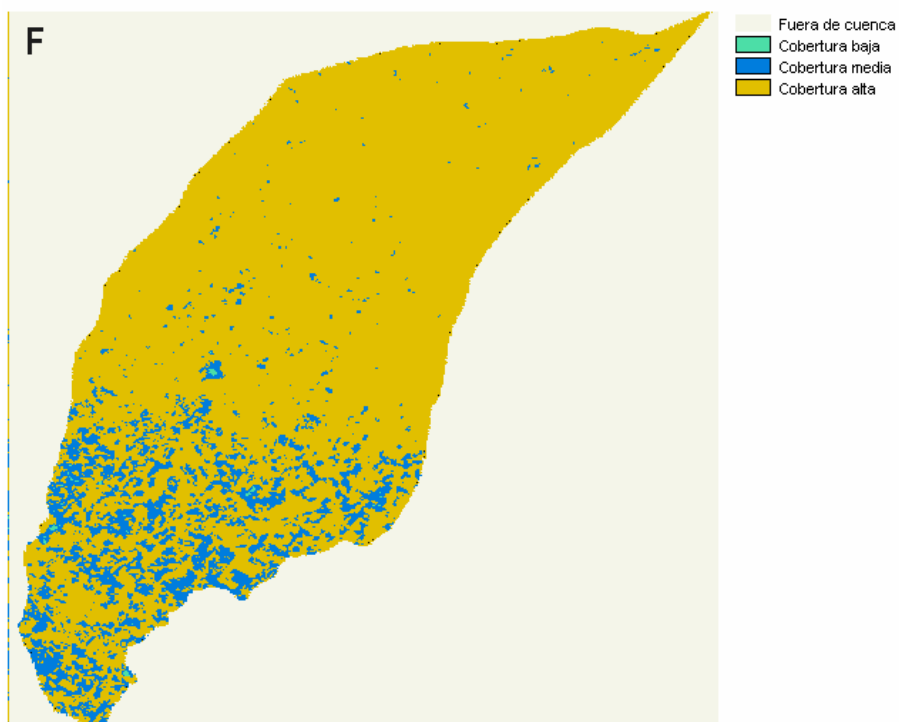
Lic. Marcelo Luciano Gandini



Lic. Marcelo Luciano Gandini



Lic. Marcelo Luciano Gandini



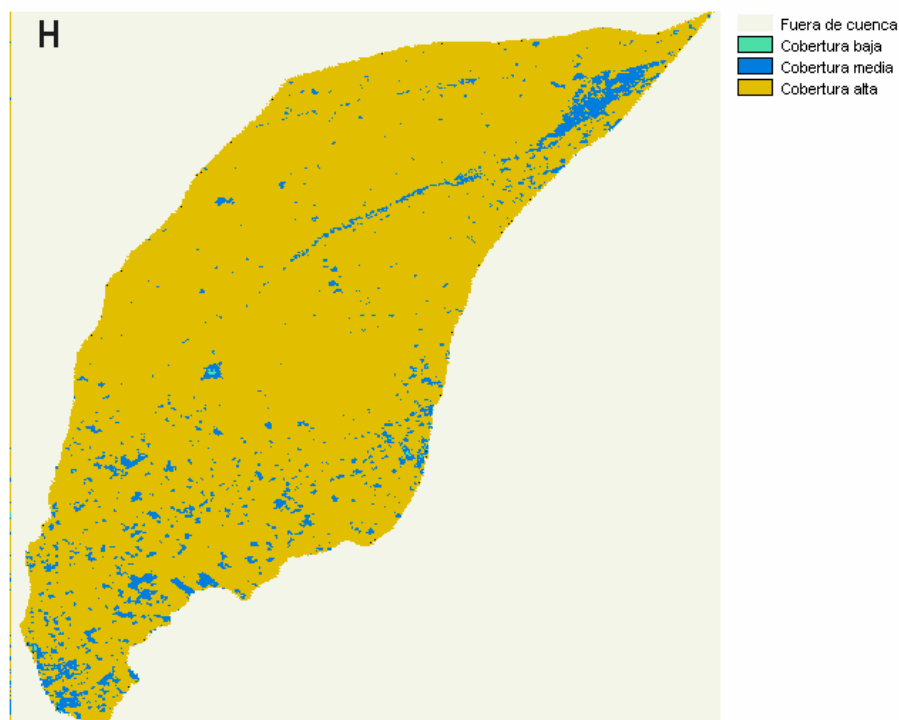


Fig 6.4 NDVI para el período de estudio, convertidos a condición de cobertura. a) abril 2001 b) mayo 2001 c) junio 2001 d) septiembre 2001 e) diciembre 2001 f) enero 2002 g) febrero 2002 h) mayo 2002. Referencias: 1(verde)= cobertura Baja - Pobre; 2 (azul)= cobertura media - intermedia; 3 (amarillo)= cobertura alta – buena.

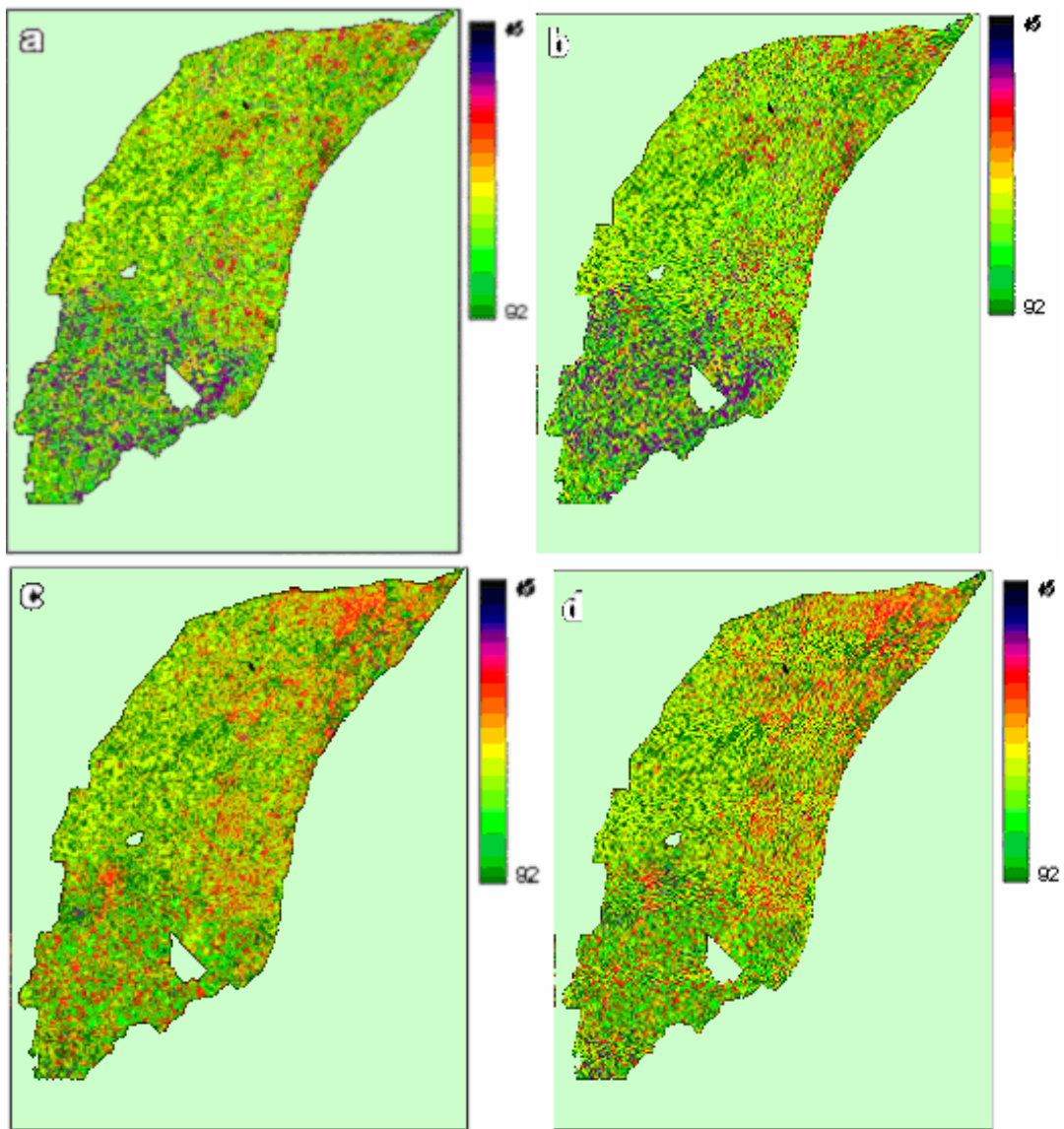
La zona agrícola revela una alta variabilidad espacial, característica propia de esta actividad, hecho ya discutido en el Capítulo 5, con la aparición simultánea de superficie arada o de baja cobertura vegetal y superficie con alta cobertura vegetal (Figuras 6.4 c y 6.4 d). En febrero de 2002 (Figura 6.4 g) se observa una dominancia de valores medios en toda la cuenca. Este hecho es coincidente con un período inusualmente seco (Confalone, 2002 com. Per.) con recuperación en mayo de 2002 (Figura 6.4h) debido a eventos de lluvias en otoño.

La definición teórica de Curva Número permitió estimarla dentro de la lógica de un SIG, y a aplicar superposiciones de mapas temáticos, obteniéndose ocho mapas

de curva número (uno para cada mes estudiado; Figura 6.5). Los valores calculados de CN variaron entre 92 (uso Urbano) y 45 (Arboledas y Montes, condición buena), esto es fruto de la combinación de las variables Uso de la Tierra/Cobertura, NDVI y grupos hidrológicos de suelos. Y es por eso que los valores más extremos de NDVI no se corresponden exactamente con los de CN. Sin embargo, las variaciones mensuales en el NDVI se reflejan claramente en la CN de cada tipo de Uso/Cobertura de la Tierra. Entre éstos, el que presentó mayor variabilidad (amplitud en los valores de CN) fue el de Arboledas y Montes, debido a que existen en la cuenca formaciones caducifolias, aunque éstos representan un bajo porcentaje de la superficie estudiada y su impacto en el proceso de precipitación/escorrentía es despreciable (Tabla 6.1) En segundo lugar le siguen los cultivos de invierno, en tercero los pastizales y pasturas, y por último los cultivos de verano. Las características de estos tres Usos/Coberturas de la Tierra ya han sido comentadas, debiéndose aclarar que la relativamente baja variabilidad de los cultivos de verano (Tabla 6.1) esté relacionada con la prevalencia del cultivo de soja de 2^{da} implantación.

En los mapas, la zona sur puede visualizarse como un mosaico de valores cambiantes de CN debido a las diferencias en el uso de la tierra y al tamaño de la unidad de explotación. Por el contrario, los pastizales muestran un aspecto espacial más continuo, fruto del uso no destructivo de la cobertura vegetal y un mayor tamaño de parcelas. La CN para febrero de 2002 (Figura 6.5g) refleja los bajos valores de cobertura observados (Figura 6.4g).

Lic. Marcelo Luciano Gandini



Lic. Marcelo Luciano Gandini

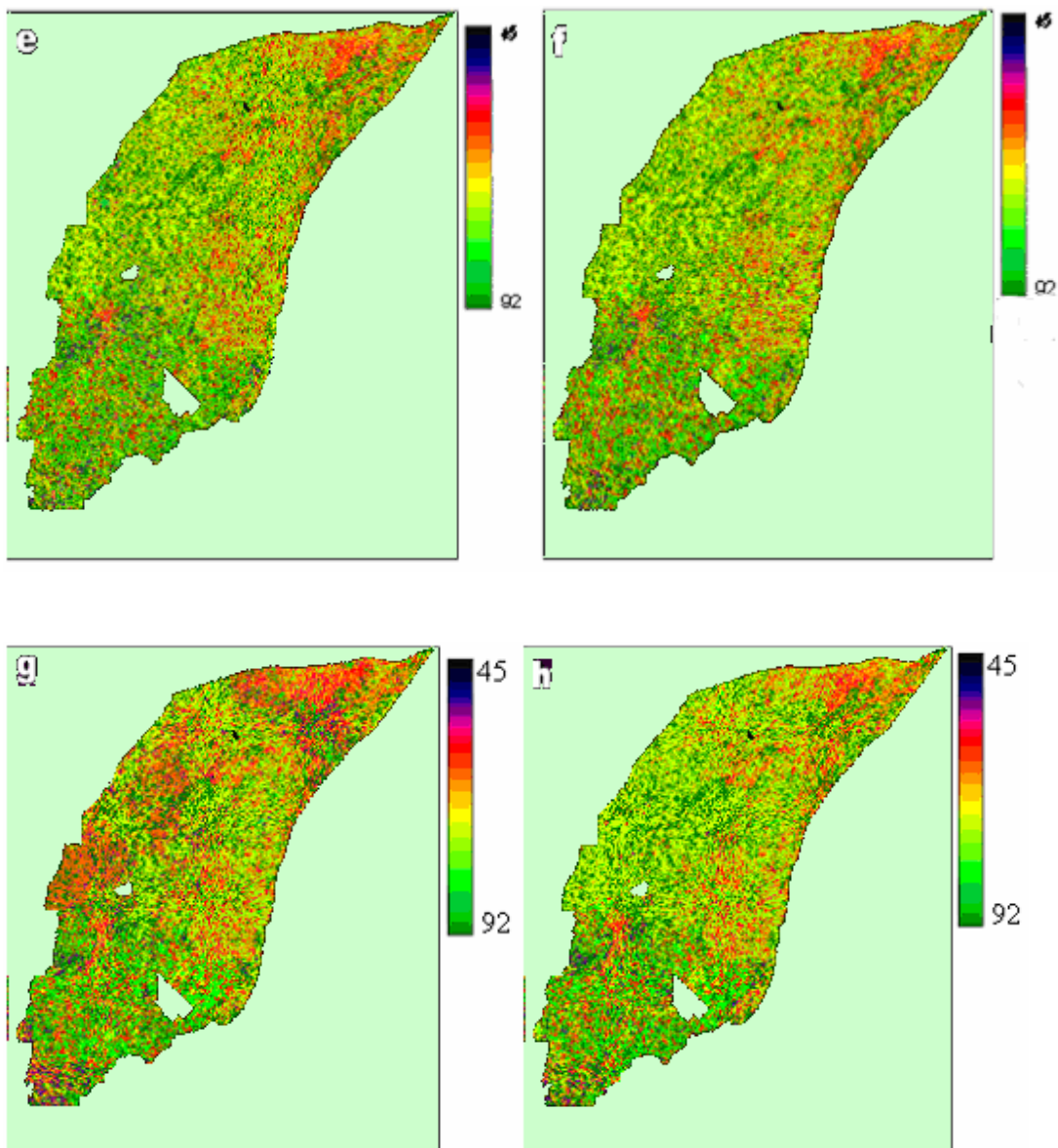


Figura 6.4. Valores de Curva Número asignados por operaciones matemáticas en GIS para la cuenca del arroyo Del Azul para ocho meses: abril 2001 (a); mayo 2001 (b); junio 2001 (c); septiembre 2001 (d); diciembre 2001 (e); enero 2002 (f); febrero 2002 (g) y mayo 2002 (h)

Un análisis visual de la variación temporal y espacial de los valores de la CN, muestra el efecto de los parámetros utilizados en su definición: se observa en la CN una variación temporal que sigue los valores de NDVI, hecho determinado por la

relación linear utilizada. Por otro lado, los grupos de suelos hidrológicos establecen una restricción para definir los límites entre los cuales variará el valor de CN para un determinado píxel. La observación conjunta de las Figuras 6.1 y 6.4 (c hasta g) muestra el efecto de la definición de grupos hidrológicos, entre los cuales el B conlleva a menores valores de CN (colores rojos en la Figura 6.4) que el A en la misma zona, con los mismos Usos de la tierra.

No se observa en general un patrón espacial coincidente con la definición de zonas homogéneas realizada en capítulos anteriores, aunque un análisis visual indicará que existe una coincidencia entre valores bajos (rojos) de CN al norte de la cuenca, y los límites de la zona 1. Por otro lado, como ya se observara anteriormente, hay una clara división entre las zonas de uso más agrícola (4,5, y 6) y las ganaderas, en este caso, observándose una tendencia a valores más extremos de CN (altos en verano y bajos en invierno).

Del análisis de estos datos surge nuevamente que el Uso de la Tierra, aún siendo una variable que continuamente puede usarse para explicar el comportamiento dinámico de zonas de la superficie terrestre, en este caso, no puede acoplarse su variación a la variación espacial de los datos, ni de las zonas obtenidas.

7. DISCUSIÓN GENERAL

7.1 La base de datos:

Las fuentes de información para este trabajo fueron de naturaleza variada, incluyendo desde información satelital de agencias espaciales como la CONAE, NASA y ESA, hasta datos de relevamientos de campo como los de lluvias o uso de la tierra, pasando por mapas de otros investigadores, hasta mapas de organismos oficiales como el IGM e INTA.

El conjunto de datos obtenido abarca tres tipos de los utilizados mayormente en estudios ecológicos regionales:

- Datos climáticos y edáficos, típicos de un enfoque genético de regionalización.
- Datos cartográficos, como los mapas topográficos a partir de los cuales se calcularon las pendientes y orientación.
- Datos provenientes del análisis de datos de sensores remotos, como la Anegabilidad, el NDVI, Fisiografía y el Uso de la Tierra, apropiados para un enfoque paramétrico de regionalización.

La abundante información disponible se sistematizó en una base de datos georeferenciada dentro de un SIG. El formato elegido fue el de raster (grilla de datos, Burrough, 1986) ya que permite el análisis estadístico de las relaciones entre las variables elegidas.

Algunos de los datos obtenidos fueron reelaborados, como por ejemplo los topográficos con los que se obtuvo el modelo digital de terreno, mientras que otros fueron extraídos en base a datos de campo, como el Uso de la Tierra. Las variables utilizadas fueron tanto estáticas como dinámicas. La información contenida en la base de datos permite, entonces, realizar un análisis dinámico, ya que cuenta con alta resolución temporal que combinada con la espacial (píxeles de 2x2 km) la hace especialmente adecuada para el seguimiento de la cuenca del arroyo Del Azul con los fines propuestos.

Si bien algunas de las variables elegidas en un primer momento fueron descartadas en parte del análisis, permanecen en la base de datos, disponibles para otras aplicaciones, como por ejemplo estudio de plagas y enfermedades agrícolas, sociológicas, etc.

Una consecuencia práctica interesante del trabajo realizado es que se posee una base de datos completa preparada para analizar características métricas del paisaje, la que pueden ser utilizadas con distintos objetivos: desde el modelado de hábitat con objetivo de analizar la dispersión de especies (Zollner y Lima, 2005) hasta análisis de fragmentación (Berry, 1999), o identificación de cambios en el uso urbano, monitoreos ambientales, o planificación territorial (Bielsa et al., 2005).

7.2 Zonas homogéneas

El enfoque utilizado para la regionalización puede considerarse como paramétrico con base genético-paisajística. No puede dejarse de lado ninguno de los enfoques teóricos presentados en la introducción a esta tesis, pues de otra manera se pierde riqueza en el análisis, aunque, como se observa en el Capítulo 3 al nombrarse

las zonas, no se respetan las jerarquías definidas para un enfoque paisajístico.

La regionalización obtenida de la cuenca del arroyo Del Azul se considera como un primer paso en el diagnóstico y evaluación de los recursos naturales de la zona. Si bien existen estudios a otras escalas, la utilizada puede considerarse como un aporte a la necesidad de aplicar políticas de corrección, control o mejoramiento ante situaciones críticas del ambiente. La concreción de tales aplicaciones se ve favorecida por varios factores. Entre ellos se puede mencionar la alta coincidencia de los límites políticos del partido con la cuenca, ser la ciudad de Azul asentamiento de una Facultad de Agronomía y que la actividad económica principal del partido está relacionada con el uso de un recurso natural como el suelo.

La elección del ACP como herramienta para la regionalización se debió a que dicha técnica, ya propuesta en general por Gallopin (1982), aunque no ha sido explorada convenientemente hasta el momento con estos objetivos, se considera que tiene una actualidad y potencialidad muy interesantes debido al desarrollo de las técnicas computacionales y los SIG.

Esta técnica permite, por un lado, usar un reducido número de componentes que contienen la influencia de todas las variables originales, e identificar y desechar aquellas menos significativas y, por otro lado, posibilita el desarrollo de una regionalización objetiva y dinámica, pudiéndose realizar nuevos análisis a partir de nuevos objetivos o a la disponibilidad de nuevas variables. En este caso el número de componentes considerados fue de tres, ya que es una cantidad de variables fácil de considerar simultáneamente, factible de representar gráficamente usando la teoría del color, y además con un alto porcentaje de explicación de la varianza.

La metodología utilizada, junto a la inclusión en el conjunto de variables de aquellas de importancia agro-ecológica, ofreció la oportunidad de contar con una

regionalización que, aunque robusta, podrá ser ajustada *a posteriori* de acuerdo a las tendencias en el Uso de la Tierra y/o cambios en las variables climáticas, o servir como base para la creación de planes maestros de Uso de la Tierra (Van der Velden et al., 1994). Por otro lado, el uso de un SIG resultó indispensable ya que, además de la descripción, interesa que la regionalización sirva como base para el modelado y manejo de las complejas relaciones espaciales presentes en los agroecosistemas.

Esta regionalización es producto de una combinación de herramientas objetivas, que pueden actuar en concordancia con la teoría ecológica. Se delimitaron seis zonas homogéneas, un número de tamaño manejable en términos de planificación, que además no se corresponden con la zonificación por fisiografía realizadas por Piscitelli y Sfeir (1993), sin encontrarse una gran correlación o alta varianza explicada para esta variable. Vale decir que la información que aporta esta subdivisión de la cuenca está enriquecida, ya que incluye otro tipo de información no redundante y de mayor variabilidad espacial. En el caso de la subdivisión realizada en forma cualitativa con criterio hidrológico entre cuenca alta, media y baja, la coincidencia es mayor que en el caso anterior. En ambos se encuentran los límites entre zonas en forma perpendicular al cauce del arroyo Del Azul pero, obviamente la regionalización obtenida en este trabajo es menos subjetiva, y ofrece mayor grado de detalle.

Por lo expuesto anteriormente, surge que la regionalización obtenida es factible de ser aplicada en estudios hidrológicos, aunque la interpretación de los ejes de componentes haya sido principalmente Agronómica. Una comprobación indirecta de la correspondencia entre las zonas y sus características agronómicas debería reflejarse en el NDVI, por tanto este es el tema que se trata a continuación.

7.3: El índice verde NDVI y las zonas homogéneas

El verdor de la vegetación, estimado como el NDVI en imágenes NOAA-AVHRR, en esta zona no se corresponde con las variaciones espaciales en los principales subgrupos de suelos (Argiudoles y Natracuoles). Sin embargo, (sobre la hipótesis que diferentes zonas deben mostrar comportamientos diferentes) la variación observada del NDVI, y sus diferencias significativas entre zonas homogéneas, apoyan la subdivisión del área estudiada, confiriéndole un sentido agroecológico.

La utilización del análisis de correlaciones canónicas en el Capítulo 5 provee una aproximación interesante a la interpretación de mapas generados por percepción remota cuando se poseen datos de una regionalización previa. En este caso, la variación temporal de una variable, usada ampliamente para describir la dinámica de los ecosistemas, como el NDVI se correlaciona con las variables ambientales que definieron las zonas agroecológicas homogéneas.

En particular, la serie de tiempo de NDVI utilizada como matriz de variables dependientes, se ve relacionada con las principales variables que definen las zonas homogéneas de la cuenca del arroyo Del Azul, principalmente por los suelos aunque ya fue demostrado que cada uno de ellos por separado no posee una correlación significativa con el NDVI. Otras variables que aportan a reforzar la correlación son las pendientes y las lluvias. Las restantes variables, si bien aportan a la correlación, lo hacen en menor medida y no afectan mayormente la significación de la correlación canónica, por lo que algunas fueron excluidas.

En este caso, la gran cantidad de información proveniente de las imágenes SPOT Vegetation es redundante, y debe ser reducida con el objetivo de favorecer la interpretación, aún sacrificando parte de la correlación existente. Es necesario realizar

más adelante nuevos análisis que permitan optimizar esta decisión sobre la base de criterios objetivos. La rotación Varimax elegida provoca un “realce” de las variables de mayor peso en la definición de los ejes, por lo que, realizando nuevamente el análisis con ese objetivo, puede ser un buen punto de comienzo.

La variación del NDVI durante el ciclo estudiado se relaciona con la productividad de los agroecosistemas involucrados (Tucker y Sellers, 1986). Por lo tanto, se puede postular que en este análisis se está realizando una evaluación preliminar de cuáles son las variables independientes que aportan a definir la productividad primaria de esta cuenca a escala regional.

7.4 Una aplicación de los datos regionales:

Tanto la cobertura vegetal, como el tipo de suelo y el Uso de la Tierra, definen qué cantidad de agua se infiltra o escurre durante un evento de precipitación. La curva número (CN) es un indicador sintético del balance entre estos dos procesos, y puede ser definida conociendo las variables nombradas.

La metodología presentada aquí utiliza herramientas de uso generalizado como los GIS y los sensores remotos, en una aplicación novedosa como es el cálculo de algunos parámetros necesarios para el modelado hidrológico. En este caso, las imágenes SAC-C combinan una cobertura areal y temporal amplia, con una resolución media (175 m) que aparece como correcta para la definición de parámetros hidrológicos a nivel regional.

La curva número calculada de esta manera puede servir luego como parámetro de entrada para la mayoría de los modelos hidrológicos, contribuir al modelado de los

procesos del ciclo del agua a escala de ecosistemas (Melesse y Shih, 2002), y aportar a la creación de sistemas de soporte de decisiones con base ecológica (IHLLA, 2003). Las estimaciones realizadas ya fueron utilizadas para el ajuste de un modelo hidrológico a datos de inundaciones de los años 1992 y 1998, con excelentes resultados (resultados aún no publicados).

7.5 El Uso de la Tierra y las zonas homogéneas

Es llamativo que la variable Uso de la Tierra no se corresponda con la zonificación realizada. Una explicación posible a esto es que esta variable esté operando a una escala diferente a la de estudio.

Es probable que, al usarse como variable los suelos, que son el principal soporte de la producción agropecuaria, se esté incluyendo de alguna manera el Uso de la tierra cuando se habla de su capacidad de uso y restricciones. Por otro lado, el mismo Uso se relaciona con las principales variables que definen el proceso de precipitación-escorrentía cuando se definen los tipos hidrológicos de suelos o la cobertura vegetal.

De figuras del Capítulo 6 como la 6.1 y 6.3 surge que el límite espacial entre los dos grandes usos como el agrícola y el ganadero, coincide con cambios en el tipo hidrológico de suelos. Pero, como en el caso del límite entre las zonas 1 y 2, no existen diferencias espaciales en el Uso que acompañen a los cambios en los suelos.

Cabe realizar la siguiente aclaración: No es notable un límite abrupto en el uso de la tierra porque tampoco es notable el límite geográfico entre zonas con suelos Argiudoles o Natracuoles. En las zonas 1 y 2, si bien el Uso es principalmente ganadero, existen pequeñas lomas donde se sigue practicando la agricultura,

principalmente Maíz y Soja (Valicenti 2001). Por otra parte, la inclusión de Usos de la Tierra que no tienen superposición en el tiempo, como el cultivo de cereales de invierno y de verano, puede estar afectando la correlación de alguna manera.

7.6 Productos colaterales y nuevas metas

El uso de estas herramientas que requieren de una alta formación técnico-profesional desemboca, sin embargo en mapas que son fácilmente interpretables, facilitando de esta forma la transferencia de información y la comunicación interdisciplinaria con actores de otros escenarios (gubernamentales, productores agropecuarios, etc.). Es así que basándose en trabajos preliminares (Gandini y Entraigas, 1995), se han aportado datos a la Municipalidad de Azul a pedido expreso de ella (Dirección de Catastro y Comisión de Revalúo de tierras del partido de Azul, 1997).

Asimismo, la delimitación de la cuenca del Arroyo del Azul, es una base para el estudio de las variables que aportan al proceso de precipitación-escorrentía y ha sido usada en diversos trabajos científicos de índole ecológico (Orfila y Farina 2002, Requesens et al., 2004) e hidrológico (Usunoff 2003, Vazquez et al., 2005)

El trabajo realizado lleva a plantear algunas líneas de investigación hacia las cuales deberían dirigirse futuros esfuerzos:

- 1) Fusión de datos SAC-C y NOAA-AVHRR ó SPOT-Vegetation con el objetivo de validar los cálculos de NDVI realizados con los distintos sensores.

Lic. Marcelo Luciano Gandini

- 2) Análisis de Patrones: La métrica del paisaje puede ser una herramienta potente para encontrar la relación entre el Uso/Cobertura de la Tierra y las variables usadas en la regionalización.

- 3) Aplicaciones hidrológicas de la base de datos: Los modelos hidrológicos distribuidos, un grupo de modelos de simulación de inundaciones que trabaja “naturalmente” con bases de datos como la utilizada para esta tesis, son un excelente sustrato como nuevas fuentes de hipótesis a escala regional.

Dr. Eduardo Jorge Usunoff
Director de la tesis



Lic. Marcelo L. Gandini.
Tesisista



8. Bibliografía Citada

- Agraz J.L. 1990. Regionalización del curso inferior del río Bermejo. *Revista Corebe* 8: 39-52.
- Allen R.B. y J.B. Wilson. 1991. A method for determining indigenous vegetation from simple environmental factors, and its use for vegetation restoration. *Biological Conservation* 56:265-280.
- Anderson, J.F., E.E. Hardy, J.T. Roach y R.E. Witmer. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data, U.S. Geological Survey Professional Paper 964, U.S. Geological Survey, Washington, DC, 28 pp.
- Andersson L. y A. Sivertun. 1991. A GIS supported method for detecting the hydrological mosaic and the role of man as a hydrological factor. *Landscape Ecology* 5(2) 107-124.
- Bailey R.G. 1983. Delineation of ecosystem regions. *Environmental Management* 7 (4):365-373.
- Bailey R.G. 1976. Ecoregions of the United States, Map (scale 1:7500000). U. S. Department of Agriculture. Forest Service. Intermountain Region. Utah.
- Beran M.A., M. Brilly, A. Beckery y O. Bonacci (ed.). 1990. Regionalization in Hydrology. IAHS, publicación N° 191. 260 págs.
- Berry J.A. 1999. Use Metrics to Assess Forest Fragmentation. *Geoworld*.

<http://www.geoplance.com/gw/1999/0899/899bey.asp>

- Bielsa X., Ponsy R. y G.H. Bunce. 2005. Agricultural abandonment in the north eastern Iberian Peninsula: The use of basic Landscape Metrics to support Planning. *J of Env. Planning and Management* 48: 85-102
- Boles S. H., X. Xiao, J. Liub, Q. Zhang, S. Munkhtuya, S. Chen y D. Ojima. 2004. Land cover characterization of Temperate East Asia using multitemporal VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment* 90 (2004) 477–489.
- Burkart R., N. Bárbaro, R.O. Sánchez y D.A. Gómez. (1999) Eco–regiones de la Argentina. Administración de Parques Nacionales. Buenos Aires. Argentina. 43 pp.
- Burrough P.A. 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford University Press. 194 pp.
- Caselles V. y M.J. López García. 1989. An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. *International Journal of Remote Sensing* 10 (6): 1127-1134.
- Cañibano M.A., M. Gandini. y M. Sacido. 2004 Evaluación de la intensificación del uso de la tierra, en la cuenca del Arroyo Del Azul, Buenos Aires, Argentina. Actas del XI Simposio Latinoamericano de percepción remota. Santiago. Chile.

- Chavez P.S.. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24: 459-479.
- Chuvienco, E. 1996. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones RIALP, S.A.Madrid.
- Chuvienco, E. 1998. El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección* 10:39-48.
- Crowley J.M. 1967. *Biogeography*. *Canadian Geographers* 11:312-326.
- De Pablo C.L., J.P. Nicolás y F. Pineda. 1983. *Diseño de un Sistema de Información para la planificación ambiental*. Informe del Equipo Coordinador 1. Dirección General de Medio Ambiente, Ministerio De Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.
- Derrien M., B. Farki, H. Lègleau et A. Sairouni. 1992. Clasificación de la vègétation sur la France a l'aide de l'AVHRR de NOAA-11. *International Journal of Remote Sensing* 13:9 1787-1795.
- Eastman J.R.. 1997. *IDRISI - A grid based geographic analysis system*. Clark University, Graduate School of Geography, Worcester, Massachusetts 01610-1477, USA.
- Ehleringer, J.R. y C.B. Field. 1993 *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Academic Press.
- Eidenshink J.C y J.L. Faundeen. 1994. The 1-Km AVHRR global land data set: first

stages in implementation. *International Journal of Remote Sensing* 15, 3443-3462

Fairbanks D.H.K. y G.A. Benn. 2000. Identifying regional landscapes for conservation planning: a case study from KwaZulu-Natal, South Africa *Landscape and Urban Planning* 50 (2000) 237-257

Ferrer M., J. Rodríguez y T. Estrela. 1995. Generación automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica. *Ingeniería del Agua* 2 (4): 43-58.

Forman R.T.T. y M. Godron. 1986. *Landscape Ecology*. J. Wiley. New York.

Forman R.T.T.. 1995. *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press, Cambridge.

Gallant A.L., E F. Binnian, J.M. Omernik y M.B. Shasby. 1995. *Ecoregions of Alaska*. Professional Paper 1567, U.S. Geological Survey, Washington, D.C., USA.

Gallopín G.C.. 1982. Una metodología multivariable para la regionalización ambiental-I. *Bases Metodológicas. Ecología Argentina* N° 7: 161-76.

Gandini M.L., I.N. Entraigas, E.J. Usunoff y M.A. Cañibano. 1986. Relación entre variables de interés agropecuario en Azul, Argentina. *Investigaciones Geográficas Boletín. Número especial* 5. 35-42.

Gandini M.L. e I.N. Entraigas. 1997. Regionalización agroecológica del partido de

Lic. Marcelo Luciano Gandini

Azul. Publicación N°2 Programa Institucional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Azul. 17 pp.

Gandini M.L., I.N. Entraigas y E.J. Usunoff. 1997. Mapeo de regiones homogéneas usando análisis multivariado y SIG en el partido de Azul, Buenos Aires, Argentina. Actas del VII Simposio Latinoamericano de percepción remota. Mérida, Venezuela.

Gandini M.L. y E.J. Usunoff. 2004. SCS curve number estimation using remote sensing NDVI in a GIS environment. Journal of environmental hydrology Vol. 12, Paper 16, 9 pp.

Gazia N., I. Gomez, M. Cross y G.Gallopín. 1982. Una metodología multivariable para la regionalización ambiental. II- Aplicación a la Alta Cuenca del Río Bermejo. Ecología Argentina 7: 127-144.

Goode J.P. 1925. The Homolosine projection: a new device for portraying the Earth's surface entire. Association of American Geographers, Annals, 5:119-125

Griffith J.A., E.A. Martinko, J.L. Whistlery y K.P. Price. 2002. Interrelationship among landscapes, NDVI, and stream water Quality in the U.S. Central Plains. Ecological Applications 12(6): 1702-1718.

Hansson L. y P. Angelstam. 1991. Landscape ecology as a theoretical basis for nature conservation. Landscape Ecol. 5, 191-201.

Harman H.. 1976. Modern Factor Analysis. The Univ. Chicago Press, Chicago, 487 pp.

- Hawley M.E., T.J. Jackson y R. Mac Cuen. 1983. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds. *Journal of Hydrology* 62:179-200
- Host G.E., P.L. Polzer, K.J. Mladenoff, M.A. White y T.R. Crow. 1996. A quantitative approach to developing regional ecosystem classifications. *Ecological Applications* 6 (2): 608-618.
- Hughes R.M. y D.P. Larsen. 1988. Ecoregions: an approach to surface water protection. *Journal Water Pollution Control Federation* 486-493.
- Hydrologic Engineering Center. 1990. HEC-1 flood hydrograph package. User' s manual. U.S. Army Corps of Engineers, Davis.
- IGM. 1953, 1954 y 1955. Cartas topográficas, 1:50000. Publicaciones del Instituto Geográfico Militar.
- IHLLA. 2003. Sistema de soporte para la gestión eficiente de los recursos hídricos en la llanura bonaerense. Informe Final, Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), 267 pp.
- INTA. 1992. Cartas de Suelos, 1:50000. Publicaciones del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina.
- ITC. 1998. ILWIS 2.2. The Integrated Land and Water Information System: User' s Manual. Computer Dept, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.
- Köppen, W. 1918. Klassifikation der klimate nach temperatur, niederschlag, und

jahreslauf. Petermann's Mitteilungen. 64:193-203.

Kuchler A.W. 1970. Potential Natural and vegetation Map (scale 1:7500000) in National Atlas of the united States of America. US Geological Survey. Washington D.C. pp 89-91.

León R.J.C. 1976. Las comunidades herbáceas de la región de Castelli-Pila. Monografía N° 5 Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, 32 pp.

Linsley R.K., M.A. Kohler y J.L. Paulhus. 1982. Hydrology for engineers, 3^a Ed., McGraw Hill, Nueva York, 508 pp.

Lucas H.D.. 1983. Conceptos de los Sistemas de Información para la Administración. Madrid: McGraw Hill.

Lüdeke M.K.B., P.H. Ramge y G.H. Kohlmaier. 1996. The use of satellite NDVI data for the validation of global vegetation phenology models: Application of the Frankfurt biosphere model. Ecological modelling 91: 255-270.

Lynn H., C.L. Mohler, S.D DeGloria y C.E. McCulloch. 1995. Error assessment in decision tree models applied to vegetation analysis. Landscape Ecology 10:323-335.

Lyon J.G., D. Yuan R.S. y Lunettay C.D. Elvidge. 1998. A change detection experiment using vegetation indices. Photogrametric engineering & Remote sensing 64:2 143-150.

- Mabbut G.A.. 1968. Review of concepts of land classification. In Land Evaluation. G. A. Stewart ed.. Mc Millan. Melbourne.
- Malvárez I. 1993. Métodos de regionalización ambiental. En: Elementos de Política Ambiental. Goin, F. y R. Goñi, eds.. Honorable Cámara de Diputados de la Provincia de Buenos Aires, 465-468.
- Marsh S., J. Walsh, C. Lee, L. Beck y C. Hutchinson. 1993. Comparison of multitemporal NOAA-AVHRR and SPOT-XS satellite data for mapping land cover dynamics in the west african sahel. International Journal of Remote Sensing 13:2997-3016.
- Melesse A.M. y J.D. Jordan. 2003. Spatially distributed watershed mapping and modelling: thermal maps and vegetation indices to enhance land cover and surface microclimate mapping: part 1. Journal of Spatial Hydrology Vol.3, No.2 Fall 2003
- Melesse A.M. y F.S. Shih. 2002. Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS. Computers and Electronics in Agriculture 37:173-183.
- Moeller R.A.. 1991. Application of geographic information system to hydrologic modeling using HEC-1. En: Stafford, D.B. (Ed.), Civil Engineering Applications of Remote Sensing and Geographic Information Systems. ASCE, New York, NY, pp. 269 - 277.
- Montaña C. y E. Ezcurra. 1991. El análisis de Componentes Principales de tablas florísticas de presencia-ausencia como herramienta para análisis de gradientes

ambientales. Un estudio de caso en la quebrada de Vaquerías (Valle Hermoso, Córdoba). *Ecología Austral* 1: 56-69.

Moore D.M., B.G. Leesy y S.M. Davey. 1991. Profile: a new method for predicting vegetation distributions using decision tree analysis in a Geographic Information System. *Environmental Management* 15:59-71.

Muzik I. y S.J. Pomeroy. 1990. A geographic information system for prediction of design flood hydrographs. *Can. J. Civil Eng.* 17 (6): 965-973.

Nathan R.J. y T.A. McMahon. 1990. Identification of Homogeneous Regions for the purposes of Regionalisation. *Journal of Hydrology*, N° 121: 217-238.

Noss R.F.. 1983. A regional landscape approach to maintain diversity. *Bioscience* 11: 700-706.

Noss R.F.. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology* 4: 355-364.

Noss R.F. 1996. Ecosystems as conservation targets. *Trends in Ecology and Evolution* 11: 351-351.

Noy-Meir, I. 1971. Multivariate analysis of the semi-arid vegetation in southwestern Australia: nodal ordination by component analysis. *Proceedings of the Ecological Society of Australia* 6: 159-193.

Omernik J.M.. 1987. Ecoregions of the conterminous United States. *Annals Association of American Geographers* 77(1): 118-125.

- Omernik J.M. 1995. Ecoregions – a framework for environmental management. In Biological assessment and criteria – tools for water resource planning and decision making. Davis, W.S., y Simon, T.P., eds. Boca Raton, Florida. Lewis Publishers.
- Olivera F. y D. Maidment. 1999. Geographic Information Systems (GIS)-based spatially distributed model for runoff routing. *Water Resour. Res.* 35 (4): 1155-1164.
- Orfila E. y E. Farina. 2002. Leguminosas autóctonas y naturalizadas de las Sierras de Azul (Pcia. de Bs. As). Ed. Facultad de Agronomía – UNICEN. Vol.1: 75 pp. 2002.
- Palik B.J., P.C. Goebel, L.K. Kirkman y L. West. 2000. Using landscape hierarchies to guide restoration of disturbed ecosystems. *Ecological Applications.* 10: 189-202.
- Pilgrim D.H. y Cordery I. 1993. Flood runoff. Cap. 9 In: *Handbook of Hydrology.* D.R. Maidment ed. Mac Graw Hill Inc. New York, USA.
- Piscitelli M. y A. Sfeir. 1993. Descripción físico-geográfica del partido de Azul y de las principales limitantes para el uso y manejo de sus tierras. *Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.*
- Qui J., A. Huete, M. Moran, A. Chehbouni y R. Jackson. 1993. Interpretation of vegetation indices derived from multi-temporal spot images. *Remote Sensing of Environment* 8:127-150.

- Rafaelli S. y F. Pérez Ayala. 2000. Paisaje Erosivo: Dos Metodologías para su Caracterización. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba. Argentina.
- Ragan R.M. y A.J. Kossicki. 1991. A geographic information system to support statewide hydrologic modeling with SCS-TR-20. En: Stafford, D.B. (Ed.), Civil Engineering Applications of Remote Sensing and Geographic Information Systems. ASCE, New York, NY, pp. 250- 258.
- Ramsey R.D., A. Falconer y R. Jensen. 1995. The relationship between NOAA-AVHRR NDVI and Ecoregions in Utah. Remote Sensing of Environment 53: 188-198.
- Requesens E., M.J. Martinefsky y R. Scaramuzzino. 2004. Banco de semillas de malezas a lo largo de un gradiente microtopográfico en un suelo agrícola de Azul (Buenos Aires). Ecología Austral 14:141-147.
- Rowe J.S. y J. W. Sheard. 1981. Ecological land classification: a survey approach. Environmental Management 5: 451-464.
- Sala J.M., E. Kruse y R. Aguglino. 1987. Investigación hidrológica de la cuenca del arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires. Informe 37, C.I.C., 235 pp.
- Sasowsky K.C. y T.W. Gardner. 1991. Watershed configuration and geographic information system parameterization for SPUR model Hydrologic Simulations. Water Resources Research 27 (1): 7- 18.

- Schmidt H. y A. Karnieli. 2000. Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment. *Journal of Arid Environments* 45: 43–59.
- Sellers P.J.. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing* 6: 1335–1372
- Sellers P.J., J.A. Berry, G.J. Collatz, C.B. Field y F.G. Hall. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing Environ.* 42: 187-216
- Silveira L., F. Charbonnier y J.L. Genta. 2000. The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques* 45 (1): 3-12.
- Smith M.B. y M. Brilly. 1992. Automated grid element ordering for GIS-based overland flow modeling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58 (5): 579-585.
- Soil Conservation Service. 1972. *National Engineering Handbook, Section 4*. U.S. Department of Agriculture, Washington.
- Soil Taxonomy. 1975. *A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Soil Survey Staff. Soil Conservation Service. U.S. Dep. of Agric.

- Soriano A. 1975. Productividad primaria neta de sistemas herbáceos. Monografía N°5. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. La Plata. Buenos Aires.
- Steinwand D.R. 1994. Mapping raster imagery to the Interrupted Goode Homolosine projection. *International Journal of Remote Sensing* 15(17): 3463-3471.
- Stuebe M.M. y D.M. Johnson. 1990. Runoff volume estimation using GIS techniques. *Water Resources Bulletin* 26 (4): 611- 620.
- Tarpley J.D., S.R. Schneider y R.L. Money. 1984. Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite. *Journal of Climate Applied Meteorology* 23: 491–494.
- Tiwari K.N., P. Kumar, M. Sibastian y K. Paul. 1991. Hydrological Modelling for Runoff Determination: Remote Sensing Technique. *Journal of Water Resources Planning and Management* 7(3): 178-184.
- Tucker C.J.. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing Environ.*8: 127-150.
- Tucker C.J., J.R.G. Townshend y T.E. Goff. 1985. African Land-Cover Classification Using Satellite Data. *Science*. 227 (4685): 369-375.
- Tucker C.J. y C. Sellers. 1986. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1395-1416.
- UNLP. 1989. Estudio para el control de régimen del arroyo Azul. Informe final presentado a la Municipalidad de Azul, 2 Partes.

- Usunoff E. 2003. Planificación y gestión de los recursos hídricos al nivel de los municipios bonaerenses. Actas del III Congreso Argentino de Hidrogeología, Tomo I: 189-198.
- Valicenti R. 2001. Diversidad de ecosistemas asociados a lomas del paisaje Ariel. Tesis de Magister en Investigación Biológica Aplicada. Facultad de Agronomía de Azul. UNCPBA. 116 pp.
- Van der Velden M., J. Van Valckenborg, J. Van Orshoven, K. Smets, A. Grillet, L. Hubrechts, J. A. Deckers, D. Van den Broucke y J. Feyen. 1994. A support system for planning sustainable agricultural land use in Flanders. En: The future of the Land: Mobilising and integrating knowledge for land use options. Cap. 20. Ed. L. O. Fresco, L. Stroosnijder, J. Bouma y H. van Keulen. John Wiley and Sons Ltd.
- Varni, M., Entraigas, I. y Gandini, M. 2004. ¿Cuáles son los procesos hidrológicos preponderantes en llanuras? En: Peligrosidad Geológica en Argentina. Metodologías de Análisis y mapeo. Estudio de casos. Gonzáles, M. A. y Bejerman, N. J. (Eds.), ISBN 987-21766-0-4. Capítulo 3, pág. 221
- Vázquez P., I.N. Entraigas, M. Varni, M.L. Gandini. y E.J. Usunoff. 2003. Identificación de patrones de anegamiento en la cuenca del arroyo Del Azul mediante el uso de imágenes LANDSAT. Revista de la Asociación Española de Teledetección 19: 43-49.
- Vázquez P., I.N. Entraigas, M. Varni, M. Gandini y E. Usunoff. 2005. Inundaciones en zonas de llanura. Capítulo 3 de la Publicación Especial N° 4 “Peligrosidad

geológica en Argentina – Metodologías de análisis y mapeo. Casos de estudio” de la ASAGAI -Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente.

Vervoost F. B. 1967. La vegetación de la República Argentina. VII. Buenos Aires. Las comunidades vegetales de la Depresión del Salado (Prov. de Buenos Aires). Serie Fitogeográfica 7, INTA. 262 pp.

Vieux B.E.. 1991. Geographic information systems and non-point source water quality and quantity modeling. Hydrological Processes 5: 101-113.

Wiken E. 1986. Terrestrial ecozones of Canada: Ottawa Environment. Canada Ecological Land Classification Series no. 19.

Wright R.G., M.P. Murray y T. Merrill. 1998. Ecoregions as a level of ecological analysis. Biological Conservation 86: 207-213.

Wikipedia. 2005. Enciclopedia libre multilinguaje en línea. Sección Idioma Español. http://es.wikipedia.org/wiki/Teoría_del_color.

Wu J.. 1997. Soils, Groudwater and Land-use Relations for Finney county, Kansas: A GIS and remote sensing approach. Ph. D. Thesis Dissertation Kansas state University. En: Geographical and environmental modelling 2:2. 199.

Zollner P. y S.L. Lima. 2005 Behavioral tradeoffs when dispersing across a patchy landscape. Oikos 108: 219-230.