

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES**



**MAGISTER SCIENTIAE  
EN MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS  
2020**

**LOCALIZACIÓN HISTÓRICA/POTENCIAL DE HUMEDALES EN LA CUENCA  
SERRANA DEL RÍO SAUCE CHICO Y SU IMPORTANCIA EN LA PROVISIÓN DE  
SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAGISTER EN MANEJO INTEGRAL DE  
CUENCAS HIDROGRAFICAS

Alumna:

**GUZMÁN GUARACA ADRIANA CATALINA  
ING. BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL**

Directora: Dra. Fernanda Julia Gaspari

Co Director: MS. María Gabriela Mazzucchelli

Fecha:

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento infinito a mi familia por su apoyo y soporte a pesar de la distancia.

A mi directora de tesis la Doctora Fernanda Gaspari, por su ayuda, paciencia y predisposición para ser una guía durante este tiempo.

A todas las personas que he conocido durante mi estadía en Argentina, ya que de una u otra forma han sido parte de este proceso.

## RESUMEN

La cuenca alta del Río Sauces Chico (CARSCH) es muy importante como zona de recarga principal ya que debido a su configuración natural genera altos volúmenes de escurrimiento. Números estudios muestran que en todo el sistema serrano cada vez existe mayor variabilidad climática, que se suma al cambio de uso de suelo principalmente sobre los relictos de vegetación natural. Estas condiciones han provocado la aparición de crecientes inundaciones y sequías prolongadas.

A través del presente trabajo se trata de demostrar la importancia de la presencia de humedales en el paisaje como una estrategia de conservación, especialmente en la CARSCH, siendo una zona de recarga. Debido a que estas áreas contribuyen a aumentar el almacenamiento de escorrentía en las tierras altas y reducir los flujos máximos. El objetivo de este estudio fue delimitar las zonas potenciales de humedal, evaluar su tendencia y desempeño en la generación de servicios ecosistémicos (SE).

Para la identificación de las zonas potenciales de humedal se partió de un análisis a nivel de cuenca lo cual permitió establecer la conectividad que existía en el paisaje. Se integró aspectos climáticos, morfológicos, edafológicos. Los resultados de este análisis a escala de cuenca permitieron evaluar la situación temporal y espacial de la misma. De igual forma con esta base se delimitó los espacios potenciales de humedal, al superponerla con información resultante de la aplicación de modelos topográficos. Finalmente, la tendencia y desempeño en la provisión de SE, principalmente de regulación, se determinó en toda la cuenca con énfasis en zonas de humedal. En la realización de todo este proceso fue importante el aporte de información proveniente de imágenes satelitales e índices espectrales que derivan de ellas como NDVI (índice de vegetación normalizada), NDVI-I (índice de vegetación normalizada integral), NDVIcv (coeficiente de variación de índice de vegetación normalizada), NDWI (índice de agua normalizado), ET (evapotranspiración) e IPSE (índice de provisión de servicios ecosistémicos).

Las zonas de humedales potenciales identificados, ocupaban aproximadamente 76 km<sup>2</sup>. En los 30 años de estudio estas zonas han experimentado cambios en su cobertura natural por un avance de actividades agropecuarias y áreas semi urbanizadas. Los cambios principalmente se detectan entre 1989 y 2005. Las áreas más afectadas son vaguadas, llanuras de inundación y los valles longitudinales que acumulan el escurrimiento proveniente de las sierras. Gracias a la aplicación de índices espectrales se encontró que los humedales en años secos y húmedos presentan mayor producción de biomasa, menor estacionalidad, acumulación de humedad y consecuentemente el nivel de provisión de SE medidos a través del IPSE son los más altos dentro de la cuenca.

Con esta información se considera que las zonas potenciales de humedal contribuyen notablemente a la regulación hidrológica y de carbono por la estrecha relación que existe entre estos SE y la producción de biomasa. A pesar del incremento en la estacionalidad de ciertas áreas de humedal debido al cambio de uso de suelo, los humedales demostraron ser una solución sólida para los procesos de degradación que presenta la CARSCH, principalmente por escurrimiento superficial.

## **Tabla de contenido**

1. GENERALIDADES .....	1
1.1.Introducción .....	1
1.2.Antecedentes .....	1
1.3.Justificación .....	2
1.4.Objetivos .....	3
1.4.1. General.....	3
1.4.2. Específicos .....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1.Cuenca Hidrográfica .....	4
2.2.Humedales.....	4
2.3.Funciones y servicios ecosistémicos de los humedales .....	7
3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAUCE CHICO.....	8
3.1.Ubicación geográfica .....	8
3.2.Clima.....	9
3.3.Geología.....	10
3.4.Geomorfología .....	11
3.5.Hidrología .....	13
3.6.Suelos.....	14
3.7.Vegetación .....	15
3.8.Fauna.....	20
3.9.Uso de suelo.....	20
4. MATERIALES Y MÉTODOLOGÍA.....	24
4.1.Caracterización legal e institucional del área de estudio. ....	24
4.2.Caracterización morfométrica.....	24
4.2.1. Parámetros de forma .....	24
4.2.2. Parámetros de relieve .....	26
4.2.3. Parámetros de drenaje .....	27
4.3.Caracterización climática.....	31
4.3.1. Precipitación y temperatura .....	32
4.3.2. Balance hidrológico medio mensual.....	33
4.4.Suelos.....	35
4.5.Cobertura y uso de suelo.....	38
4.6.Escurrimiento superficial .....	38
4.7.Pérdida de suelo por erosión hídrica superficial .....	40

4.7.1. Clasificación de pérdida de suelo. ....	42
4.8. Área histórica / potencial de humedales. ....	42
4.8.1. Identificación y delimitación. ....	42
a) Índice topográfico de humedad (TWI). ....	43
b) Índice de Humedad Topográfica de Precipitación (PTWI). ....	43
c) Orientación de ladera. ....	44
4.8.2. Análisis histórico para determinar cambios en la superficie de ocupación de humedal. 44	
4.8.3. Servicios ecosistémicos (SE) de regulación hídrica de las áreas de humedal .....	44
4.8.3.1. Índices espectrales .....	44
a) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). ....	45
b) Índice diferencial de agua normalizado (NDWI).....	45
c) Evapotranspiración .....	45
d) IPSE (índice de provisión de servicios Ecosistémicos). ....	46
5. RESULTADOS.....	47
5.1. Caracterización legal e institucional vinculado al uso y gestión del agua y humedales. ...	47
5.1.1. Internacional .....	47
5.1.2. Nacional .....	47
5.1.3. Provincial .....	48
5.2. Caracterización morfométrica.....	50
5.2.1. Parámetros de forma. ....	50
5.2.2. Parámetros de relieve.....	50
5.2.3. Parámetros de drenaje .....	53
5.3. Caracterización climática.....	56
5.3.1. Precipitación y temperatura .....	56
5.3.2. Balance hidrológico mensual .....	65
5.4. Suelos.....	69
5.5. Cobertura y uso de suelo.....	72
5.6. Esguerrimiento superficial .....	79
5.7. Pérdida de suelo por erosión hídrica superficial .....	87
5.7.1. Clasificación de pérdida de suelo. ....	90
5.8. Área histórica/ potencial de humedales .....	94
5.8.1. Identificación y delimitación. ....	94
a) Índice topográfico de humedad (TWI) .....	94
b) Índice de Humedad Topográfica de Precipitación (PTWI) .....	95

c) Orientación de ladera .....	96
5.8.2. Análisis histórico para determinar cambios áreas de humedal. ....	100
5.8.3. Servicios ecosistémicos de regulación hídrica de las áreas de humedal.....	102
5.8.3.1. Índices espectrales .....	102
a) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). ....	103
b) Índice diferencial de agua normalizado (NDWI).....	106
c) Evapotranspiración (ET).....	110
d) Índice de provisión de servicios Ecosistémico (IPSE). ....	111
6. CONCLUSIONES .....	113
7. BIBLIOGRAFÍA .....	116
8. ANEXOS .....	125
8.1. Numero de curva.....	125
8.2. Ecuación Universal de pérdida de suelo U.S.L.E. ....	129
8.2.1. Parámetros requeridos.....	129
8.2.2. Resultados del factor K. ....	130
8.3. Índices espectrales. ....	131

## **Índice de gráficas**

Gráfica 1. Curva hipsométrica de la CARSCH. ....	52
Gráfica 2. Curva hipsométrica adimensional de la CARSCH. ....	53
Gráfica 3. Modelo de regresión lineal entre datos observados y satelitales de precipitación (1989-1992) de la estación Gran Chaco.....	57
Gráfica 4. Modelo de regresión lineal entre datos observados y satelitales de temperatura. ..	58
Gráfica 5. Histograma de frecuencia. Periodo 1988 – 2017.....	60
Gráfica 6. Continuación: Diagramas ombrométricos, con barras azules: precipitación media mensual; línea amarilla: temperatura media mensual.....	64
Gráfica 7. Balance hidrológico. ....	68
Gráfica 8. Cambio de superficie de ocupación de NC en la CARSCH en los años estudiados. ....	82
Gráfica 9. Cambio de superficie de ocupación del riesgo de erosión hídrica en la CARSCH.	85
Gráfica 10. Factor C para la CARSCH. ....	89
Gráfica 11. Cuantificación porcentual de la pérdida de suelo para el periodo 1988-2017.....	93
Gráfica 12. Cuantificación del cambio de uso de suelo para el periodo 1988-2017. ....	100
Gráfica 13. Precipitación anual y desviación estándar para el periodo 1988-2017.....	102

## Índice de figuras

Figura 1. Partes de una cuenca hidrográfica. ....	4
Figura 2. Ecosistemas. Los humedales como parte del paisaje. ....	5
Figura 3. Las relaciones entre hidrología, ambiente fisicoquímico y biota en humedales. ....	6
Figura 4: Ubicación del área de estudio.....	8
Figura 5. Atlas bio-climático de la República de Argentina.....	9
Figura 6. Localización de los sistemas serranos australes en la Prov. de Buenos Aires. ....	10
Figura 7. Principales formaciones geológicas del Sistema Ventania .....	11
Figura 8. Principales basamentos expuestos del Sistema Ventania. ....	12
Figura 9. Mapa Isofreático de CARSCH. ....	13
Figura 10. Principales tributarios del Río Sauce Chico. ....	14
Figura 11. Mapa edafológico (Escala 1:50000).....	15
Figura 12. Ambientes terrestres y ubicación de algunas comunidades vegetales de Sierra de la Ventana. ....	16
Figura 13. Uso de suelo en la CARSCH: 2000 – 2009 – 2017.....	23
Figura 14. Tiempos característicos en un hidrograma. ....	29
Figura 15. Localización de las estaciones meteorológicas. ....	32
Figura 16. Balance hídrico en el suelo.....	33
Figura 17. Zonificación de la capacidad de productividad agrícola y área en estudio. ....	36
Figura 18. Modelo U.S.L.E.....	40
Figura 19. Distribución de la pendiente en la CARSCH. ....	51
Figura 20. Orden de cauces de la CARSCH. ....	55
Figura 21: Isoyetas media anual. Periodo 1988 – 2017. ....	59
Figura 22. Mapa edafológico .....	69
Figura 23. Vista aérea de Villa Serrana La Gruta .....	72
Figura 24. Mapa de uso/cobertura de suelos del año 1989. ....	78
Figura 25. Mapa de uso/cobertura de suelos del año 2005. ....	78
Figura 26. Mapa de uso/cobertura de suelos del año 2017. ....	79
Figura 27. Grupos hidrológicos en la CARSCH.....	80
Figura 28. Zonificación del número de curva en la CARSCH para el año 1989.....	81
Figura 29. Zonificación del número de curva en la CARSCH para el año 2005.....	81
Figura 30. Zonificación del número de curva en la CARSCH para el año 2017.....	82
Figura 31. Riesgo de erosión hídrica para el año 1989.....	86
Figura 32. Riesgo de erosión hídrica para el año 2005.....	86
Figura 33. Riesgo de erosión hídrica para el año 2017.....	87



Figura 34. Factor K ( $Mg.m^2.h/ha*J*cm$ ). para la CARSCH.....	88
Figura 35. Factor LS para la CARSCH. ....	89
Figura 36. Factor P para la CARSCH.....	90
Figura 37. Pérdida de suelo para el año 1989. ....	91
Figura 38. Pérdida de suelo para el año 2005 .....	92
Figura 39. Pérdida de suelo para el año 2017 .....	93
Figura 40. Procesos de degradación en la CARSCH; a) erosión en cárcava b) medidas de conservación. ....	94
Figura 41. Índice topográfico de humedad (TWI) en la CARSCH. ....	95
Figura 42. Índice de Humedad Topográfica de Precipitación (PTWI) en la CARSCH. ....	96
Figura 43. Mapa de orientación de laderas. ....	97
Figura 44. Localización potencial de zonas de humedal según perfiles topográficos (m/m). ..	99
Figura 45. Localización potencial de zonas de humedal. ....	101
Figura 46. Variabilidad de NDVI-I en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos. ....	104
Figura 47. Variabilidad del NDVIcv en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos. ....	106
Figura 48. Variabilidad del NDWI en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos. ....	107
Figura 49. Desviación estándar de NDWI en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos.....	109
Figura 50. Variabilidad de evapotranspiración (ET) en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos. ....	110
Figura 51. Variabilidad de IPSE en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos.....	112

## **Índice de fotografías**

Fotografía 1. Cierre de la cuenca alta del Río Sauce Chico. Foto tomada el día 08/04/2019.	14
Fotografía 2. Ambientes terrestres de la CARSCH (08/04/2019).	16
Fotografía 3. <i>Plantago bismarckii</i> .	17
Fotografía 4. a) <i>Festuca pampeana</i> ; b) <i>Festuca ventanícola</i> .	18
Fotografía 5. <i>Stipa ambigua</i> (11/04/2019).	19
Fotografía 6. Vegetación higrófila en el Arroyo Sauce Chico (08/04/2019).	19
Fotografía 7. Principales usos de suelo en la CARSCH (08/04/2019).	21
Fotografía 8. Villa Serrana la Gruta.	73
Fotografía 9. Clase pastizal natural con roca	73
Fotografía 10. Forestaciones ubicadas en las márgenes del arroyo Sauce Chico.	74
Fotografía 11. Forestación utilizada como monte de abrigo para ganadería	74
Fotografía 12. En el fondo se observa ganado vacuno y delante cultivos de maíz.	75
Fotografía 13. Distintos sistemas agrícolas	75
Fotografía 14. Ambientes peri serrano y valle ocupado por pajonal y pastizal serrano.	76
Fotografía 15. Diversidad de especies presentes en el pastizal serrano.	76
Fotografía 16. Vegetación de ribera del río Sauce Chico.	77

# **LOCALIZACIÓN HISTÓRICA/POTENCIAL DE HUMEDALES EN LA CUENCA SERRANA DEL RÍO SAUCE CHICO Y SU IMPORTANCIA EN LA PROVISIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.**

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

“Humedal es un ambiente en el cual la presencia temporaria o permanente de agua superficial o subsuperficial causa flujos biogeoquímicos propios y diferentes a los ambientes terrestres y acuáticos. Rasgos distintivos son la presencia de biota adaptada a estas condiciones, comúnmente plantas hidrófitas, y/o suelos hídricos o sustratos con rasgos de hidromorfismo” (Benzaquén et al., 2017, p 22).

A nivel mundial se considera que 12.100.000 km<sup>2</sup> de superficie está cubierta por ecosistemas de humedal, siendo el 54% de inundación permanente y el 46% de inundación estacional. señala que entre 1970 y 2015 los humedales naturales disminuyeron en aproximadamente un 35%, en contraste a los humedales artificiales, como arrozales y reservorios, que se han duplicado sin compensar la pérdida natural (Ramsar Convention on Wetlands, 2018).

En Argentina, el 21,5 % del territorio correspondiente a 600.000 km<sup>2</sup>, está cubierto por humedales naturales, pero varios se encuentran bajo presión antrópica por su conversión a tierras agropecuarias, procesos de desertificación y degradación de suelos, deforestaciones, introducción especies exóticas invasoras y emprendimientos urbanísticos (Benzaquén et al., 2017). Habitualmente, se considera a este tipo de ecosistemas como terrenos baldíos o zonas que hay que drenar, rellenar o darle otro tipo de uso, sin considerar los múltiples SE que generan como ser: reposición de aguas subterráneas, amortiguación de inundaciones abastecimiento de agua, estabilización de costas, retención y exportación de sedimentos y nutrientes, depuración de aguas y provisión de hábitats para diferentes especies entre otros (RAMSAR, 2015).

### **1.2. ANTECEDENTES**

En los últimos años, a nivel mundial, el estudio del funcionamiento de los ecosistemas de humedal ha tomado auge, debido a los servicios ecosistémicos que proporcionan, en especial relacionado a la disponibilidad de agua que es un componente importante dentro del estudio de la dinámica hídrica en cuencas hidrográficas.

A escala nacional, las variaciones climáticas que se han presentado en todo el territorio son cada vez más fuertes e inciden en la dinámica hídrica y estado erosivo de varias cuencas hídricas. Por esta razón se ha puesto atención en los ecosistemas de humedal como una medida de adaptación y mitigación de estos impactos. Tal es así que desde el año 2017, Argentina cuenta con el libro “Regiones de Humedales de la Argentina”, como resultado de un proyecto impulsado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable junto con Wetlands International, Universidad de San Martín y Universidad de Buenos Aires (Benzaquén et al., 2017). Dicho proyecto es considerado como el primer nivel del Inventario Nacional de Humedales, a escala regional 1:250.000, que debido a la resolución de la información base, deja de lado a los humedales de pequeñas dimensiones.

En la provincia de Buenos Aires en junio de 2019, se dio a conocer el primer informe sobre el Inventario de Humedales de la Provincia que identifica y delimita 18 sistemas de paisajes de

humedales bonaerenses. Dentro de los sistemas de paisajes de humedal identificados en el inventario se muestra los sistemas de paisajes serranos de Ventania, que han dado origen al principal sistema hidrológico superficial del suroeste bonaerense. Gaspari & Bruno (2003), Angeles & Gil (2006), Gaspari (2007), Andrade, Laporta, & Iezzi (2009), Campo, et al., (2016) coinciden que varios ríos que conforman este sistema hidrológico experimentan una disminución paulatina del caudal principal. Escenario atribuido a la falta de lluvias e incremento en la demanda de agua para agricultura e industria.

Ante la importancia hidrológica de los sistemas serranos bonaerenses varios trabajos de investigación han tenido como objeto de estudio principalmente al cordón serrano de Ventania. Gran parte de estas investigaciones se centran en su dinámica fluvial a través de información hidrográfica y morfológica a nivel de cuenca y subcuenca en los Ríos Sauce Grande, Napostá y Sauce Corto, que son la principal fuente de agua dulce de la región y tienen relevancia agroecosistémica. El objetivo principal de estos estudios fue generar herramientas de gestión y ordenamiento de cuencas para disminuir los efectos de crecidas e inundaciones en poblaciones adyacentes (Gaspari & Bruno, 2003; Hauri, 2006; Delgado, 2009; Gil, 2009; Gil, Ybarra & Volonté, 2016; Campo, Casado & Campo, 2019).

En lo concerniente a la cuenca del Río Sauce Chico se destacan las investigaciones de comportamiento hidrológico realizadas a nivel de cuenca, como ser los trabajos de Torrero (2009); Fundación de la Universidad Nacional del Sur (2011); Fernández, Sequeira, Espósito & Paoloni (2015); Espósito, Zalba, Ribet, Blanco & Amiotti (2016); Navarro & Cano (2017), y a nivel de detalle, con el análisis de microcuencas, específicamente el arroyo Ventana, trabajados por Martínez, Gil, Carbone & Simeón (2016). Todos estos estudios han permitido establecer la dinámica fluvial del Río Sauce Chico y manifestaciones de la degradación existentes.

Referente a la identificación de sistemas de humedal no se conocen de trabajos que relacionen y evalúen su importancia debido a la provisión de SE de regulación hidrológica de los humedales localizados en la CARSCH. Los procesos de erosión hídrica presentes en el área y potenciados por cambio de uso del suelo sin planificación, especialmente en áreas de mayor pendiente, provoca que en periodos cortos de lluvias intensas exista un incremento repentino del caudal con presencia de sedimentos, generando inundaciones y anegamientos en áreas de baja pendiente, como algunos eventos reportados por medios de comunicación local.

Es importante mencionar, los trabajos de Babbar-Sebens, Barr, Tedesco, & Anderson (2013) y Walters & Babbar-Sebens (2016) que tienen por objetivo localizar áreas de humedal y zonas potenciales, para evaluar su contribución en la reducción de los efectos de eventos climáticos extremos en cuencas hidrográficas de los Estados Unidos de Norteamérica, mediante el uso de técnicas de teledetección combinada con información de suelo y climatológica, todo ello, para la aplicación de modelos hidrológicos.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

La cuenca serrana del Río Saucos Chico es muy importante como zona de recarga principal, debido a altos volúmenes de escurrimiento que se generan. Al presentar abundante roca aflorante en zonas de pendiente escarpada, intensas lluvias de corta duración, generan escorrentía que pueden formar grandes avenidas. Algunos de estos eventos producen inundaciones de corta duración, pero de gran intensidad, provocando daños a la propiedad pública y privada, como lo sucedido en los años 1963, 1973, 1978, 1980, 1981, 1982, 1993, 2002 y el más reciente en el año 2014 (Torrero, 2009; FUNS, 2011; TBB, 27/02/13; LNP, 31/10/14).

Autores como Albouy & Bonorino (1997), Gaspari (2007), Torrero (2009), FUNS (2011) manifiestan que en la zona serrana de Ventania es recurrente la existencia de importantes excesos hídricos, seguidos por déficits de larga duración. Estas anomalías en parte se deben a una distribución espacial y temporal del clima que oscila años tras año. Sumado a este contexto, la pérdida de vegetación natural por el avance de actividades de origen antrópico, como agricultura y ganadería, muchas veces de una forma no sostenible que aceleran los procesos de erosión hídrica y eólica en el área, e intensifican los efectos de la sequía e inundación.

Por este motivo se plantea en el presente trabajo de tesis que la presencia de humedales temporales en la zona serrana de Ventania genera una importante área de amortiguamiento ante los efectos hídricos originados por eventos climáticos. Para determinar la relación y potencialidad de los humedales con la dinámica hídrica se incluyó el empleo de técnicas de mapeo y análisis espacial de conectividad en el paisaje, mediante metodologías basadas en sistemas de información geográfica (SIG), que permitan identificar y priorizar potencialmente sitios sostenibles de restauración de humedales a escala de cuenca (Palmeri & Trepel, 2002; White & Fennessy, 2005).

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. General**

Evaluar la localización histórica/potencial de humedales de la cuenca serrana del Río Sauce Chico y su importancia en la provisión de servicios ecosistémicos de regulación relacionado al control de la erosión hídrica superficial.

### **1.4.2. Específicos**

- Localizar e identificar áreas histórico/potencial de humedales.
- Determinar el estado ambiental y tendencia de ocupación en superficie de los humedales.
- Evaluar los servicios ecosistémicos de regulación relacionados al control de la erosión hídrica superficial que proporcionan las zonas de humedales identificadas.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. CUENCA HIDROGRÁFICA

Según Basterrechea, Dourojeanni, García, Novara & Rodríguez (1996); Mármol (2008); Gaspari, Rodríguez, Senisterra, Delgado & Besteiro (2013), una cuenca hidrográfica es una unidad de paisaje delimitada por las divisorias de agua, que discurre sus aguas a través de un sistema de drenaje superficial hacia un único punto de descarga. La misma, incluye, además, aspectos biológicos, sociales, económicos y toda la estructura hidrogeológica subterránea que no siempre coincide con los límites de la cuenca superficial dependiendo de la geología subyacente.

Todas estas características conforman un sistema integrador del territorio para el análisis, planificación y manejo. El principal desafío es considerar a todos sus componentes y la forma en como ellos se relacionan, en particular los ecosistemas de humedal, que muchas veces su gestión se ve contrarrestada por acciones de manejo del agua en la cuenca.

Según sus características topográficas las cuencas se pueden dividir en tres áreas (Figura 1):

1. **Alta**, refiere a zonas de mayor pendiente, generalmente áreas montañosas o cabeceras de cerros que funcionan como áreas de recarga hídrica. Está limitada en la parte superior por la línea divisoria de aguas.
2. **Media o zona de transferencia**, se refiere a áreas de pendiente menos abrupta donde el río principal mantiene un cauce definido.
3. **Baja** corresponde a zonas de depósitos de sedimentos donde el río principal desemboca a ríos mayores o a zonas bajas, tales como estuarios o humedales.



Figura 1. Partes de una cuenca hidrográfica.

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2015).

### 2.2. HUMEDALES

La siguiente definición de humedales fue adoptada por Argentina para el Inventario Nacional de Humedales: “*Humedal es un ambiente en el cual la presencia temporaria o permanente de agua superficial o subsuperficial causa flujos biogeoquímicos propios y diferentes a los ambientes terrestres y acuáticos. Rasgos distintivos son la presencia de biota adaptada a estas condiciones, comúnmente plantas hidrófitas, y/o suelos hídricos o sustratos con rasgos de hidromorfismo*” (Benzaquén et al., 2017).

Como parte del paisaje, los humedales constituyen un nexo entre los ecosistemas terrestres y acuáticos. El principal factor que diferencia a este tipo de ecosistemas es la hidrología, que es la responsable de la temporalidad de los humedales. El tiempo de inundación o hidro periodo incide sobre biogeoquímica y productividad de los humedales, transformando al tipo de ecosistemas en biológicamente diversos, al presentar mayor productividad primaria y sean fuente o sumidero de nutrientes, como se muestra en la Figura 2.

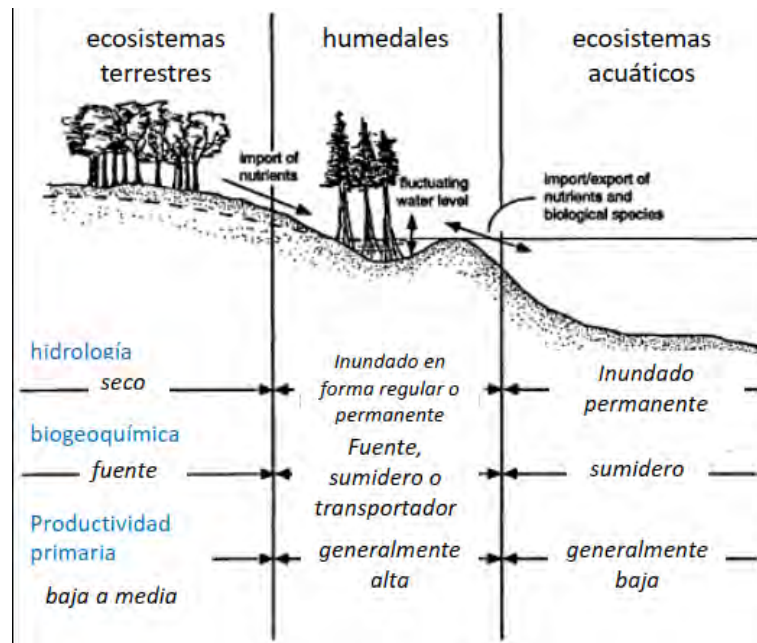


Figura 2. Ecosistemas. Los humedales como parte del paisaje.

Fuente: National Research Council (1995).

La interacción directa o de retroalimentación biológica entre el ambiente fisicoquímico, biota, clima y las características hidrogeomórficas (entorno geomórfico, fuente de agua e hidrodinámica) determinan la temporalidad de los humedales. El tiempo de saturación o permanencia de agua en estos ecosistemas, establece la existencia de humedales "secos" y humedales "húmedos". En la Figura 3 se presentan las relaciones entre hidrología, ambiente fisicoquímico y biota, en humedales.

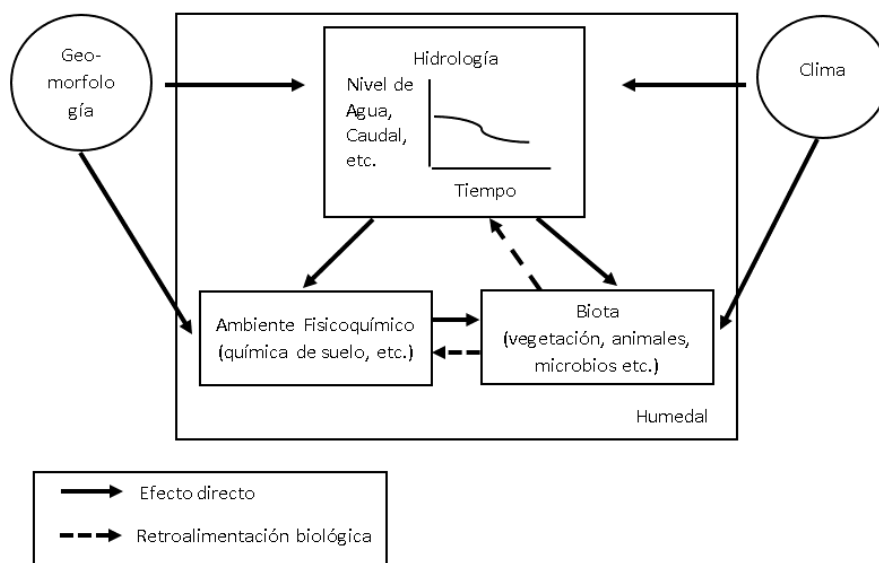


Figura 3. Las relaciones entre hidrología, ambiente fisicoquímico y biota en humedales.

Fuente: National Academy Press (1995).

Según el National Academy Press (1995), para identificar los ambientes de humedal y comprender su funcionamiento es importante tomar en cuenta los siguientes componentes funcionales:

1. Hidrología. El desarrollo y sostenibilidad de los humedales está dada por la frecuencia, duración y profundidad de la inundación o saturación conocido como hidro periodo. La saturación debe durar al menos 15 días durante la temporada de crecimiento de vegetación en la mayoría de los años, y la profundidad mínima de saturación corresponde a la capa superior de la mayoría de las raíces de las plantas, que es de aproximadamente 30 cm. Además, se reconoce que la profundidad de la capa freática es un indicador directo de la profundidad de saturación.
2. Suelo. Generalmente, los humedales se encuentran sobre suelos de baja infiltración. La presencia de material impermeable como roca o abundante cantidad de arcillas en o cerca de la superficie del terreno, bajo condiciones de saturación o inundación, crean condiciones anaerobias y los suelos adquieren características hidromórficas (falta de oxígeno y potencial redox muy bajo durante la saturación).
3. Componente biológico. Se refiere a la vegetación y fauna adaptada a la periodicidad de inundación o saturación del suelo. En el caso de la vegetación proporciona retroalimentación a la hidrología del ecosistema a través de la evapotranspiración y el aumento de la resistencia al flujo, alterando las propiedades del suelo como contenido orgánico, oxígeno disuelto, acumulación de materia orgánica por medio de sedimentos. Las tasas de descomposición en algunos tipos de humedales pueden hacer que las cuencas se llenen de material vegetal no descompuesto, alterando así las condiciones hidrológicas.



### 2.3. FUNCIONES Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS HUMEDALES

Las funciones ecológicas de los humedales son el resultado de una serie de procesos que dependen de su ubicación, tamaño, condiciones climáticas, cantidad y calidad del agua que ingresa, así como también del grado de alteración dentro y fuera del humedal. En general los humedales desarrollan funciones de las cuales la humanidad es la principal beneficiaria, dando origen a lo que se conoce como Servicios Ecosistémicos (SE). Entre los principales SE se identifican:

- a) **Soporte.** Refiere a los procesos ecológicos que constituyen la base para los demás SE, como, por ejemplo, en el ciclo del agua el humedal actúa como áreas de recarga o descarga de aguas subterráneas y su influencia en procesos atmosféricos; en ciclo de nutrientes y producción primaria porque almacena, retiene, fija y acumula bioelementos, así como algunos contaminantes presentes en el agua; formación de suelos a partir de la acumulación de sedimentos.
- b) **Regulación.** Estos son procesos que regulan las condiciones en las que se desarrolla como ser: regulación de la calidad del agua, que actúa como filtros naturales; regulación del clima, al fijar y almacenar CO<sub>2</sub> del aire; control de la erosión, que actúan como zonas de amortiguamiento disminuyendo la velocidad de escurrimiento del agua para evitar/disminuir las catástrofes naturales y conservar los suelos; en la polinización, al ser una gran fuente de biomasa; la inundación de humedales puede evitar daños por inundaciones en otros lugares, la desnitrificación puede mejorar la calidad del agua, el hábitat del humedal puede ayudar a mantener las poblaciones de aves acuáticas.
- c) **Provisión.** Se refiere a los productos obtenidos como resultado de las demás funciones que se llevan a cabo dentro de los humedales y que son consumidos y/o usados, como, por ejemplo, agua para consumo y actividades productivas, madera y leña, forrajes, vegetación comestible o medicinal.
- d) **Culturales.** Estos SE son valores o beneficios no materiales que se obtienen de la naturaleza a través del enriquecimiento personal o espiritual. Entre estos tenemos turismo, recreación, estéticos, etc.

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAUCE CHICO

La caracterización de la CARSCH se realizó a partir de una exhaustiva revisión y sistematización de información bibliográfica.

#### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La CARSCH, se ubica en la región pampeana en el suroeste de la Provincia de Buenos Aires. Se extiende por los partidos de Saavedra, Tornquist y Coronel Suarez. Como se muestra en la Figura 4, el área de estudio constituye la cabecera del río Sauce Chico, que nace en el sistema orográfico de Ventania, conformando la zona de recarga hídrica de la cuenca de 1 595 km<sup>2</sup> (Torrero, 2009), que desagua en el estuario de Bahía Blanca. El río Sauce Chico es el proveedor de agua de riego para el cinturón hortícola del partido de Bahía Blanca, aunque en época estival este recurso no resulta suficiente y debe recurrirse al abastecimiento por agua subterránea (Espósito et al., 2016).

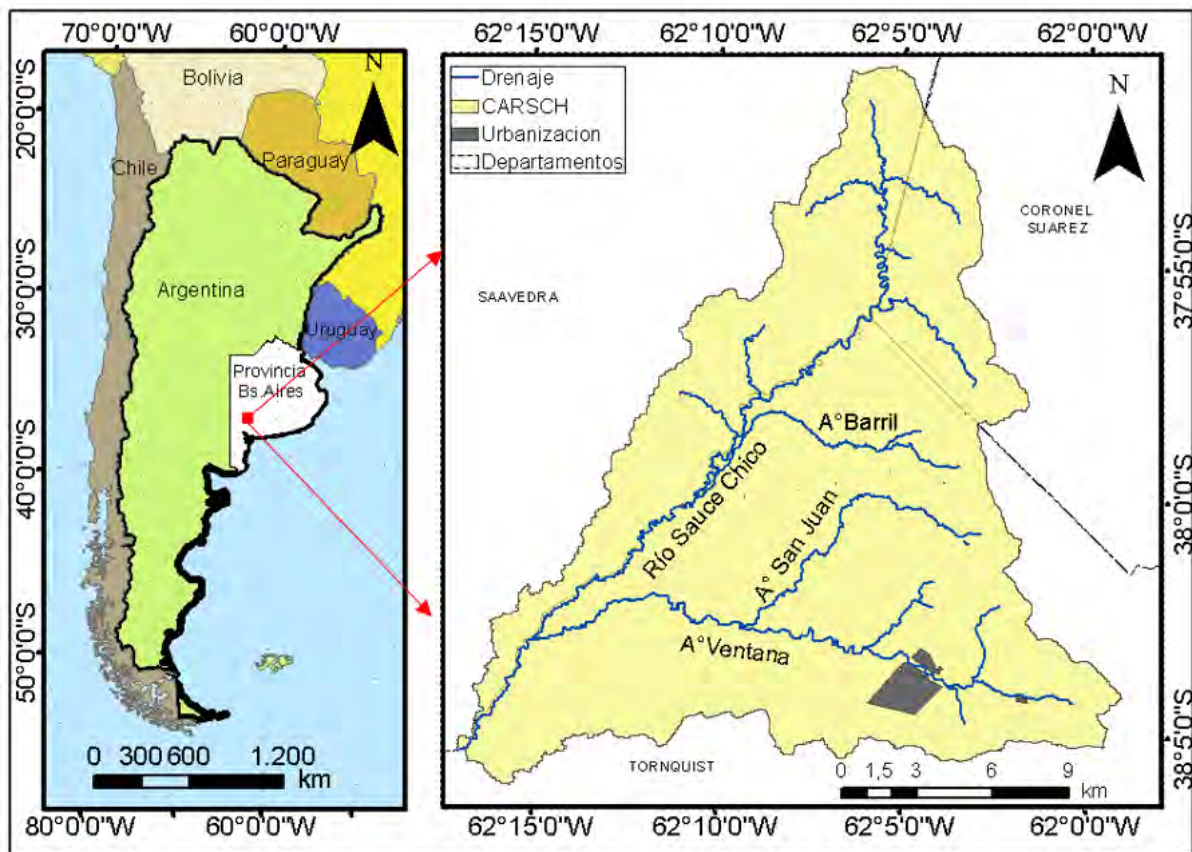


Figura 4: Ubicación del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

El curso principal de la CARSCH recibe el aporte de varios arroyos siendo los principales Gran Chaco, Barril, Ventana y San Juan que drenan los faldeos de los cordones serranos Curamalal, Bravard y Ventana ( Gaspari, 2007; Torrero, 2009; FUNSA, 2011).

### 3.2. CLIMA

De acuerdo con el Atlas Bio-climático de la República Argentina (Alconada, 2008), el clima del suroeste bonaerense es de transición al encontrarse dentro de la región bio-climática IVc, correspondiente a zona templada fría de transición, representado en la Figura 5, donde se identifica el área en estudio por medio de un rectángulo amarillo. Como consecuencia presenta una variabilidad pluvial interanual de la lluvia con valores sobre y por debajo del promedio (739,1 mm), con máximos de 1100 mm y mínimos de 300 mm (Díaz, Gaspari, & Georgieff, 2017).



Figura 5. Atlas bio-climático de la República de Argentina.  
Fuente: Alconada (2008).

Además, el suroeste bonaerense debido a su ubicación geográfica, recibe la influencia de diferentes masas de aire que forman vientos constantes durante todo el año, que en verano se tornan cálidos y secos con polvo en suspensión, mientras que invierno son rigurosos. Al sur del sistema serrano de Ventania predominan los vientos en el Noroeste y Oeste y hacia el Norte del sistema los vientos prevalecen en el Norte (Torrero, 2009).

La temperatura media anual es de 14,4 °C, con el valor mínimo de 8 °C en julio. En los meses de verano, entre diciembre y marzo, los valores son superiores a 20 °C con un máximo en enero de 21,5 °C (Martínez et al., 2016); situaciones de helada se registran en los meses de abril, septiembre y junio-agosto.

La presencia del sistema serrano de Ventania genera un cambio en la dinámica climática en los valles interserranos, constituyendo la mayor divisoria de aguas de la provincia, dando origen a cuencas exorreicas y endorreicas de régimen pluvial, como ser en los ríos Sauce Grande, Sauce Corto, Sauce Chico, Napostá Grande, Chasicó, Pigüé, entre otros. Estas cuencas tienden a

generar inundaciones debido a precipitaciones torrenciales en el área serrana, y sequías prolongadas e intensas que afectan tanto a sectores poblados como rurales dañando infraestructuras y produciendo pérdidas económicas y humanas (Gil, Gentili, Campo, Jelinski, & Crisafulli, 2016).

### 3.3. GEOLOGÍA

La Figura 6 distingue dos sistemas serranos en la provincia de Buenos Aires: Ventania conformado por un complejo cinturón de pliegue y empuje, desarrollado en el margen suroeste de Gondwana (Placas de Gondwana) debido a la colisión de las placas tectónicas Patagonia durante el Pérmico-temprano-medio (Ramos, Chemale, Naipauer, & Pazos, 2014).

El Sistema de Tandilia, que además de rocas sedimentarias, presenta basamento ígneo y metamórfico (Ramos et al., 2014; Tomezzoli & Cristallini, 2004).

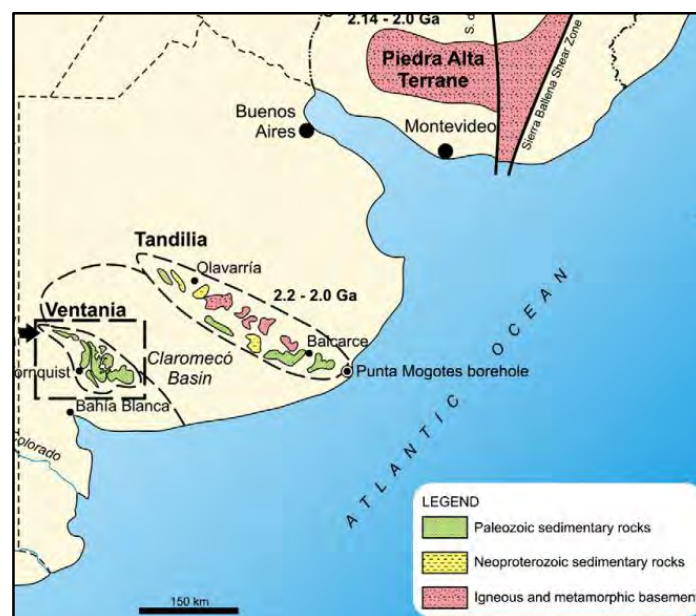


Figura 6. Localización de los sistemas serranos australes en la Prov. de Buenos Aires.

Fuente: Ramos et al. (2014).

El sistema de Ventania, como consecuencia de esta colisión, presenta 3 cadenas de serranías Curamalal, Ventana y Pillahuincó (Figura 7) formadas por secuencias sedimentarias paleozoicas fuertemente plegadas (Navarro & Cano, 2017; Ramos et al., 2014).

Como se muestra en la Figura 7, dentro del área de estudio se encuentran los siguientes grupos geológicos:

- El Grupo Curamalal, de origen ígneo representa el comienzo del registro sedimentario en la cuenca, contiene conglomerados con clastos de grano grueso en clastos soportados a tipos parcheados con soporte de matriz arenosa, con lechos de hasta 1,5 m de espesor y erosivos a bases afiladas en la parte inferior de la Formación La Lola. La ladera suroeste de la Sierra de Curamalal está constituida por rocas de origen ígneo, riolitas expuestas en diferentes sectores más al norte y algunos afloramientos

aislados de granitos expuestos en las canteras de Cerro Colorado y López Lecube más al oeste.

- En el Grupo Ventana, la unidad inferior (Formación Bravard) tiene algunos conglomerados finos con una composición cuarcítica de los clastos. La Formación Napostá suprayacente es bien conocida por su contenido icnológico

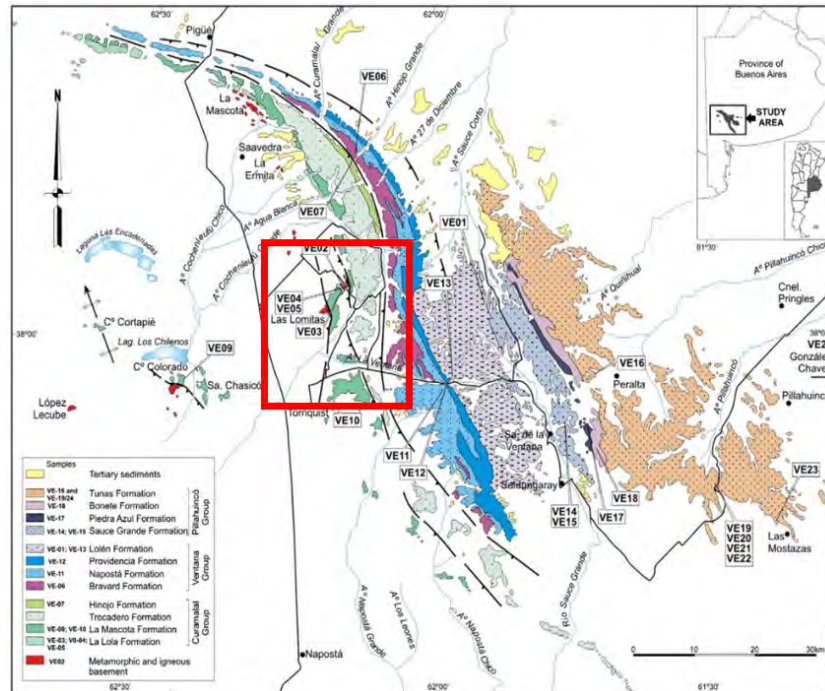


Figura 7. Principales formaciones geológicas del Sistema Ventania

Fuente: Ramos et al. (2014).

### 3.4. GEOMORFOLOGÍA

La provincia de Buenos Aires está constituida por 7 unidades geomorfológicas: sierras, mesetas, llanuras continentales, llanuras marinas, llanuras fluviales, delta y depresión lacunar (INTA, 1990). Las unidades geomorfológicas de sierras corresponden a los sistemas de Tandilia y Ventania en el centro y sur de la provincia.

En el presente estudio se analiza el sistema serrano de la CARSCH, por lo cual se hará énfasis en el sistema de Ventania, que presenta forma alargada y se extienden en sentido noreste – sudeste, distinguiéndose claramente los cordones serranos de Puán, Curamalal, Bravard, Ventana y Pillañuincó (Albouy & Bonorino, 1997; Gaspari, 2007).

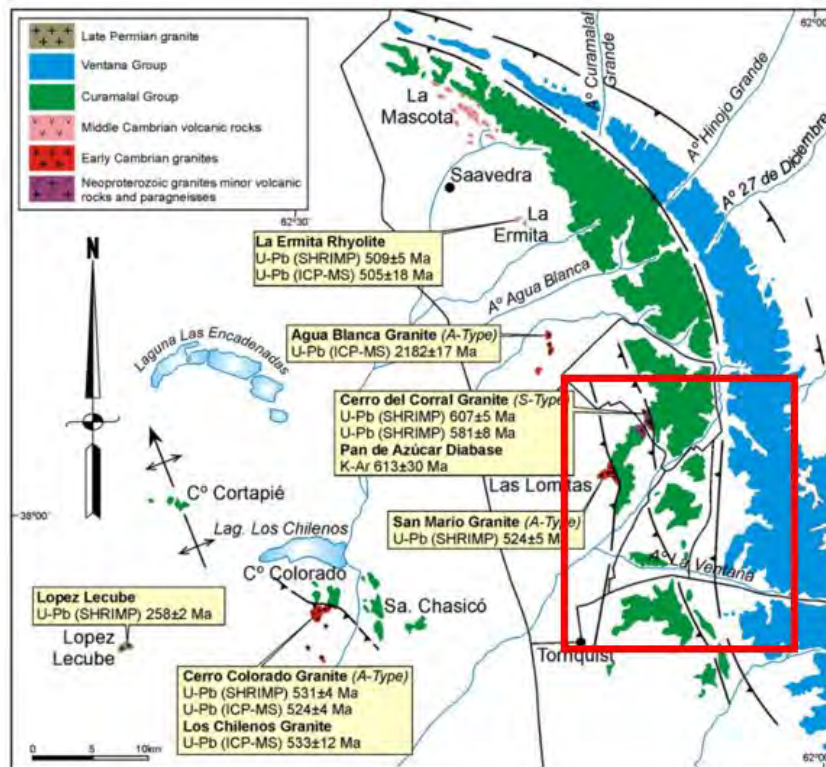


Figura 8. Principales basamentos expuestos del Sistema Ventania.

Fuente: Ramos et al. (2014)

Como muestra la Figura 8, la CARSCH drena los faldeos de los cordones serranos suroriental Curamalal y noroccidental Ventania; que al presentar gradientes de pendiente mayores al 20% con presencia de afloramientos rocosos sobre los 400-450 m.s.n.m. conforman la divisoria de aguas superficial y subterránea. A su vez los cordones serranos se subdividen en dos subunidades que son:

- **Relieve escarpado** formado por basamentos o rocas aflorantes cuarcíticas paleozoicas fuertemente plegadas expuestas o apenas cubiertas por un delgado manto de loess, correspondiente a las zonas más altas de las sierras.
- **Relieve ondulado** con loess de hasta 2 metros de espesor formando los flancos o pedemontes que se apoyan sobre una costra calcárea de gran dureza y extensión conocida como tosca. Cerca de los afloramientos se miden altos gradientes topográficos superiores al 5%, de igual forma mayor pendiente hidráulica del acuífero. A medida que se aleja del pie de sierra, el relieve se suaviza y las pendientes oscilan entre 1 y 5%, en tanto que la superficie freática muestra igual tendencia, pero en forma más suave. Entre los cerros y serranías que conforman el sistema de Ventania existe un relieve plano y plano-cóncavo, en sus laderas presentan valles en “V” (INTA, 1990, Albouy & Bonorino, 1997; Gaspari, 2007, Torrero, 2009).
- La cubierta sedimentaria intermontana está constituida por depósitos de origen fluvial, eólico y coluvial, hidrobiológicamente muy permeables (Albouy & Bonorino, 1997). Los piedemontes sirven de conexión entre las sierras y la llanura que tiene un límite difuso de gradiente topográfico, constituye una zona típica de infiltración del agua de lluvia (González, 1984, Albouy & Bonorino, 1997).

### 3.5. HIDROLOGÍA

La CARSCH se extiende desde los cordones Curamalal, Bravard y Ventania que conforman la divisoria de aguas hacia el punto de cierre, que coincide con la ubicación de la estación de aforo Paso Bower, habilitada desde enero de 1939 (Torrero, 2009).

Las estructura geológica favorece a la formación de un drenaje dendrítico bien definido, que se alimenta exclusivamente de agua de lluvia, por lo que su flujo está condicionado por la sequía o el exceso pluvial (Campo, Rosell, Benedetti, & Gil, 2012; Rodriguez, Armendáriz, & Capítulo, 2017). El régimen de flujo es torrencial y en algunos sectores hiporreicos (FUNS, 2011; Rodriguez et al., 2017), donde el sentido de la dirección de flujo superficial y subterráneo son similares, como lo muestran las curvas isofreáticas de la Figura 9. Al tratarse de una zona de captación, son los procesos de ladera y progresión del talweg los que controlan la morfogénesis y junto con la vegetación natural, el clima y la antropización de los interfluvios controlan la dinámica fluvial (Martínez et al., 2016).

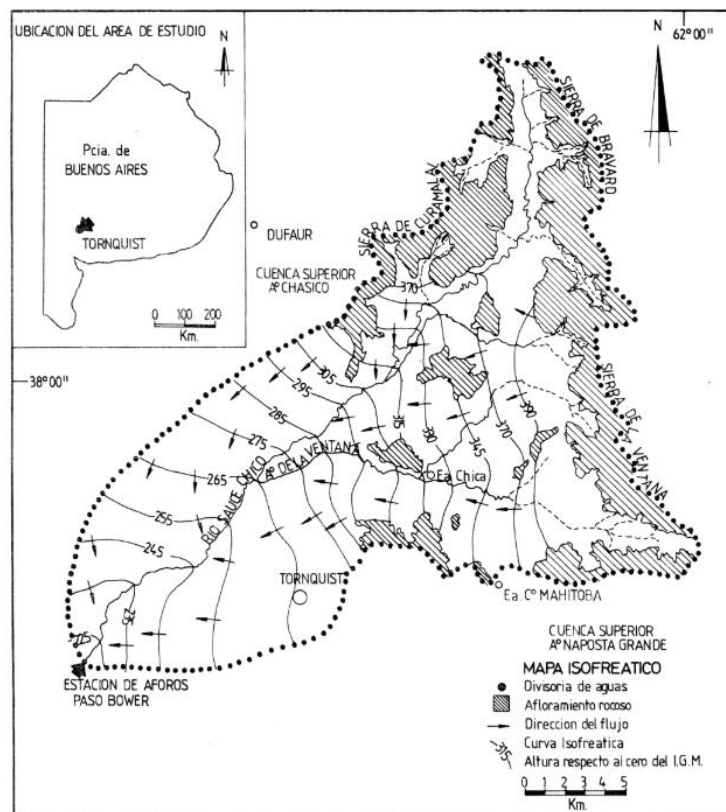


Figura 9. Mapa Isofreático de CARSCH.

Fuente: Albouy & Bonorino (1997).

Como se muestra en la Figura 10, el río principal Sauce Chico se extiende de norte a sur y se forma por la confluencia de cuatro arroyos principales el A° Sauce Chico, A°. Barril, A°. San Juan y A° Ventana. Estos arroyos tributarios tienen sus nacientes en los valles de los interfluvios que sirven como colectores del escurrimiento generado en las elevaciones de los cordones serranos. Los cursos de agua que se desarrollan son de cauce no erosivo intermitente que desaparecen por infiltración en el pie de la sierra.

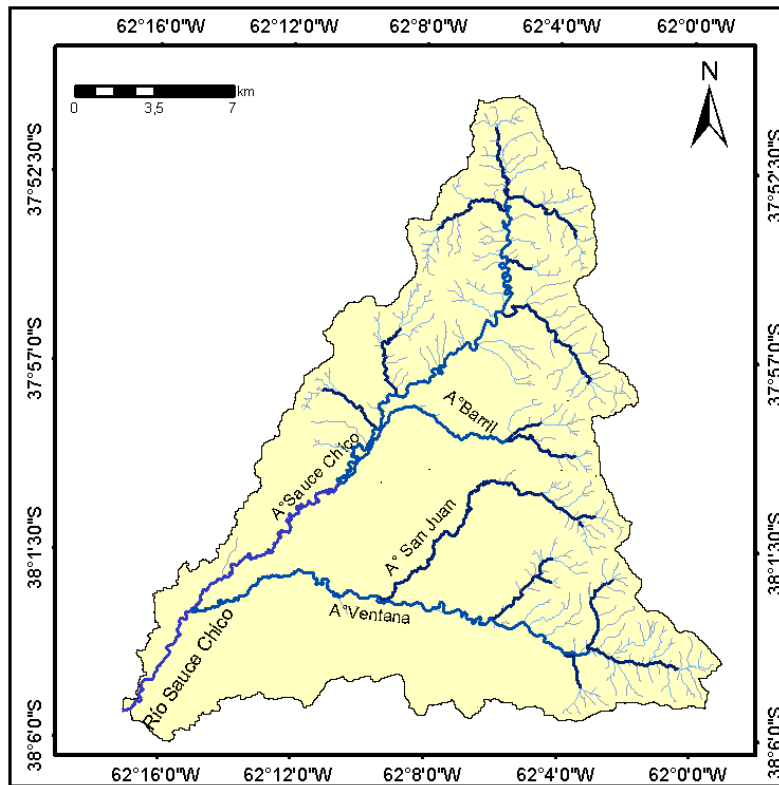


Figura 10. Principales tributarios del Río Sauce Chico.



Fotografía 1. Cierre de la cuenca alta del Río Sauce Chico. Foto tomada el día 08/04/2019.

### 3.6. SUELOS

Los suelos presentes en la CARSCH son del orden de los Molisoles, representados por asociaciones de: Argiudol típico en lomas, pendientes y planicies es muy profundo (140 cm); Haplustol típico, fino en el fondo del valle; Haplustol éntico y Haplustol lítico en los interfluvios, desarrollados sobre material loésico que cubre totalmente las laderas de las



sierras, y este a su vez se ubica sobre una costra calcárea (tosca) que oscila los 100 cm de espesor, según los diferentes accidentes que presente su topografía (Figura 11) (FUNS, 2011; Gaspari, 2007). Las texturas de los suelos se corresponden a franca, franca limosa, franco arcillosa y franco arcillo limosa. En su mayoría tienen buen drenaje con excepción de áreas con elevada pendiente con presencia de tosca, que muestran suelos muy someros (Torrero, 2009).

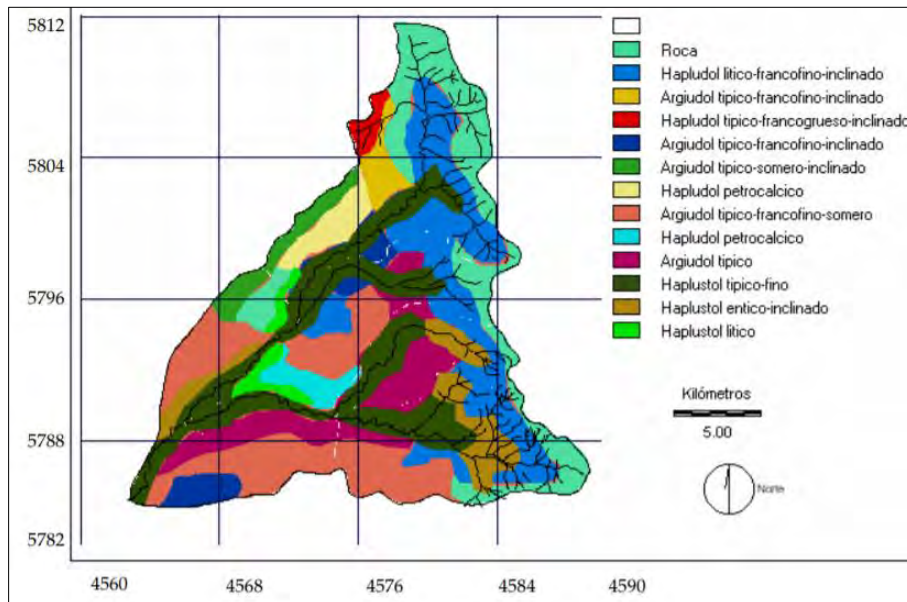


Figura 11. Mapa edafológico (Escala 1:50000).

Fuente: Gaspari (2007).

### 3.7. VEGETACIÓN

Las sierras australes de Ventania se encuentran en la ecorregión denominada Pampeana Austral, con vegetación dominante representada por la estepa gramínea (pastizales) y matorrales de arbustos con profunda alteración de la vegetación natural por actividades antrópicas (Gaspari, 2007; FUNS, 2011). Los cordones serranos que conforman la divisoria de aguas dan lugar a diversos ambientes terrestres pues las condiciones de vida difieren según el sustrato suelo-roca, la exposición al sol, pendiente y altura (Fotografía 2).



Fotografía 2. Ambientes terrestres, principalmente de estepa gramínea de la CARSCH (08/04/2019).

Según Lizzi et al. (2007) se han reconocido 24 especies de comunidades vegetales en Ventania, que incluyen diversidad de plantas entre ellas algunas endémicas, en los ambientes serranos terrestres, como se expresa en la Figura 12.

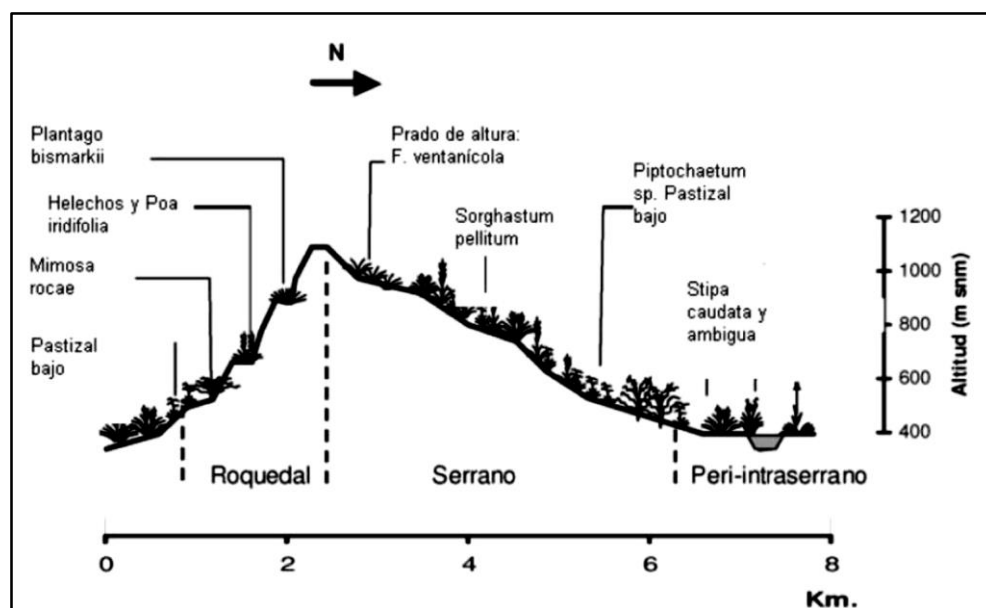


Figura 12. Ambientes terrestres y ubicación de algunas comunidades vegetales de Sierra de la Ventana.

Fuente: Lizzi et al., 2007.

De acuerdo con la Figura 12 se distinguen los siguientes ambientes terrestres en el sistema serrano de Ventania:

- **Roquedal.** En los roquedales soleados que miran hacia el sur en altitudes intermedias y con escaso suelo, se puede encontrar *Plantago bismarckii* (pino plateado), arbusto sin parentesco con los pinos y mejor llamado llantén (Fotografía 3); en la cima de los cerros la vegetación es muy pobre, como el *Plantago bismarckii*, *Grindelia chilensis*, raramente el *P.ventaniensis* y el líquen *Usnea hicronymi* (planta

saxícola), *Poa iridifolia* que es una gramínea endémica de las sierras llamada también *Poa lanígera*.

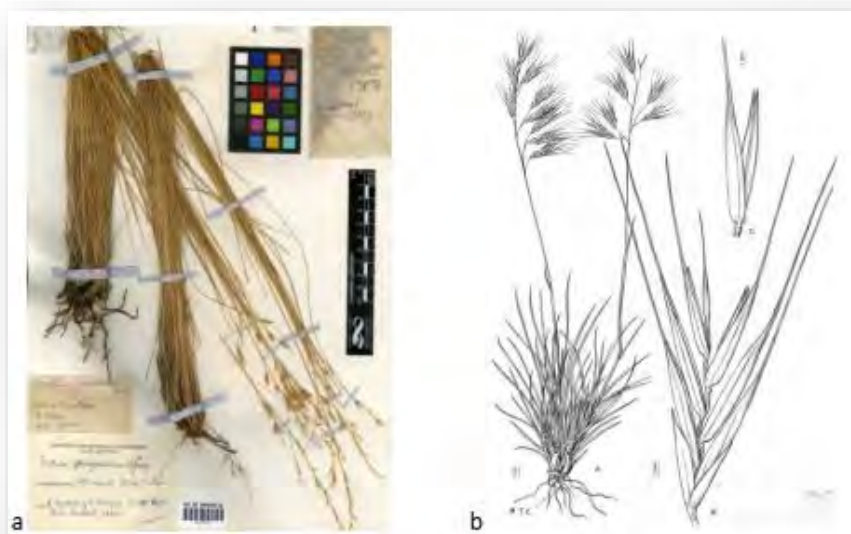


Fotografía 3. *Plantago bismarckii*.

Fuente: Campo et al. (2012).

- **Serrano.** – Se muestra sobre las pendientes más abruptas, siendo la vegetación representada por: *Festuca pampeana* y *Festuca ventanicola* que crece en suelos húmedos con humus, poco insolados, no pedregosos o roquedales planos (Fotografía 4), gramíneas como *Phalaris angusta*, *Melica brasiliana*, *Stipa pampeana*, *S.juncoides*, *Briza sp*, *Bromus hordaceu*. En las partes bajas las gramíneas se asocian con *Piptochaetium haeckeli* asociada con *P.lejopodum*, *Briza subaristata*, *Melica macra* y *Poa liguralis*, todas de interés forrajero. En las mesetas serranas de pendientes suaves prosperan praderas de césped bajo y denso de especies como *Festuca ventanicola*, *Hipericum sp.*, *Arjona sp.* y *Grindelia sp.*

Los pastizales serranos, están presentes en todas las altitudes del sistema serrano y su biomasa aérea disminuye a mayor altitud, pero su biomasa subterránea (proporción de raíces) se incrementa a mayor altitud. Esta condición es importante debido a que la biomasa subterránea aporta en la retención de suelo, acompañando la biomasa aérea en la disminución de la energía cinética del agua evitando los efectos degradativos de erosión y consecuente pérdida de suelo (Cabrera, 1968; Frangi & Bottino, 1995; Pérez, 1995; Bruno et al., 1999; Campo et al., 2012).



Fotografía 4. a) *Festuca pampeana*; b) *Festuca ventanícola*.

Fuente: Campo et al. (2012).

- **Peri serrana.** - Se corresponde con ambiente de planicies y lomadas suaves cuya vegetación está constituida por hierbas perennes xerófilas, donde predominan especies nativas de la estepa pampeana, de género *Stipa*, como *S.brachychaeta*, *S.dusenii*, *S.trichotoma*, *S. caudata* (pasto puna dulce) y *S. ambigua* (paja vizcachera) (Fotografía 5); son consideradas como un pasto muy duro no apetecido por el ganado por lo cual tiene poco valor forrajero; gramínea *Sorghastrum pellitum* perenne y nativa es apreciada por herbívoros por lo cual es susceptible a pastoreo. Entre estas matas prosperan invasoras como abrepuño (*Centaurea calcitrapa*), cardo negro (*Cirsium vulgare*), cardo de Castilla (*Cynara calcitrapa*), gramíneas como: *Convolvulus arvensis*, *Salpichroa organifolia*, *Heliotropium amplexicaule*, algunas leguminosas como: *Medicago hispida*, *Medicago arabica*, *Trifolium repens*. Otras gramíneas en asociación son *Melica argirea*, *Briza brizoides*, *Bromus hordeus*, *Bromus brevis*, *Lolium multiflorum*, *Hordeum murinum*, *Avena barbata* y *A.sterilis* (Cabrera, 1968, Frangi & Bottino, 1995).

La vegetación arbustiva está representada por calafate (*Berberis ruscifolia*), brusquilla (*Discaria longispina*), y varias compuestas como por ejemplo *Eupatorium* sp., *Bacharis* sp., *Wedelia buthalmiflora*. Entre las rosáceas aparece la yerba de perdíz (*Margyricarpus pinnatus*), la zarzaparrilla (*Mimosa rocae*) y el guindo silvestre (*Prunus mahaleb*) (Bruno et al., 1999; Gaspari, 2007; Torrero, 2009; Campo et al., 2012).



Fotografía 5. *Stipa ambigua* (11/04/2019).

- Vegetación higrófila. Distribuida sobre los cursos de agua, desde sus nacientes, se observa una vegetación más higrófila (áreas de abundante agua), localizada en zonas de torrente y manantiales, entre las principales especies se encuentran la *Cortadera dioica*, *Paspalum quadrifarium*; *Senecio bonaeriensis*; *Scirpus riparius*; *Juncus microcephalus*; *Melica macra*; *Polypogon elegantus* (Fotografía 6).



Fotografía 6. Vegetación higrófila en el Arroyo Sauce Chico (08/04/2019).

### 3.8. FAUNA

El sistema de Ventania posee una diversidad particular de taxonomía faunística, con altos niveles de endemismo, que se lo conoce como “islas orográficas”, por estar desconectado de otras cadenas montañosas y rodeado pastizales pertenecientes a la provincia fitogeográfica de Pampa, distrito austral de Pampeano en el norte, y un ecotono de tres provincias fitogeográficas: matorrales Pampa, Espinal y Monte al sur (Frangi & Bottino, 1995).

Existen varias especies endémicas de animales como *Lama guanicoe* (guanacos), lagartijas endémicas como *Pristidactylus casuhatiensis*, *Homonota williamsii sp. nov.* es una especie de lagarto gekónido, la iguana de cobre *Pristidactylus casuhatiensis*, el roedor "pericote bonaerense" *Phyllotis bonariensis* y el migido *Calathotarsus simony*. También se destacan: entre los mamíferos liebre, *Lycalopex gymnocercus* (zorro gris de la Pampa), *Chaetophractus villosus* (peludo), *Dasyurus novemcinctus* (mulitas), *Lagostomus maximus* (vizcachas), *Conepatus humboldtii* (zorrino chico), gato montés.

En relación a las aves, no existen endemismos confirmados, pero de acuerdo con la Propuesta de Plan de Manejo del Parque Provincial Ernesto Tornquist (1996-1997), existen una extensa variedad como: *Sicalis lebruni* (Jilguero austral), *Asthenes modesta navasi* (Canastero pálido), *Catamenia analis* (Piquito de oro común), se cree que el parque es el único sitio de nidificación de *Geranoaetus melanoleucus* (Águila mora) en la provincia. Otras especies presentes son: *Ammodramus humeralis* (gorrión de pajonal), *Furnarius rufus* (hornero), *Sporagra magellanica* (cabecita negra), *Mimus saturninus* (calandria), *Vanellus chilensis* (tero), patos, *Rhinocrypta lanceolata* (copetona), *Anthus correndera* (cachirla), *Charadrius dubius* (chorlo), biguá, *Nothura maculosa* (perdices), *Molothrus bonariensis* (tordos). También se encuentran aves rapaces como halcones y *Pseudoscops clamator* (lechuzones); carroñeras como *Caracara plancus* (caranchos) y *Phalco boenus chimango* (chimangos). Entre los reptiles existen yarará ñata, cascabel, víbora de la cruz, *Rhinocerothis alternatus* (yarará de cola blanca) y coral, diversas lagartijas y anfibios sapos y ranas (Gaspari, 2007; FUNS, 2011; Rodríguez et al., 2017). La riqueza ictícola de los arroyos es pobre (Sfeir, Oliva, & Devoto, 2013)

La fauna exótica está compuesta por caballos salvajes, venados y cabras introducidos para actividades de caza sobreviven en algunas áreas (Rodríguez et al., 2017).

### 3.9. USO DE SUELO

En 1870 empezó la colonización de la región pampeana con la llegada del ferrocarril General Roca, siendo las primeras colonias de agricultores las de alemanes, suizos e italianos, que datan de 1886.

El suroeste bonaerense aporta el 13% de Producto Bruto Geográfico Provincial (sin considerar a Bahía Blanca). Los principales ingresos generados provienen de agricultura representado principalmente por cultivos de soja y maíz y pastoreo de ganado, que en los últimos 120 años ha degradado el entorno natural. Como se observa en la Fotografía 7, solo las áreas rocosas escapan de actividades agrícolas, pero no de pastoreo de ganado, explotación de piedra y plantación de pinos. Adicionalmente, animales exóticos introducidos como caballos salvajes, venados y cabras para actividades de caza sobreviven en algunas áreas (Avila, Fulvio Perez, Minoli, & Morando, 2012).

El sistema serrano de Ventania es un importante icono del turismo en la Provincia.



Fotografía 7. Principales usos de suelo en la CARSCH (08/04/2019).

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 15 se representa cartográficamente los usos de suelo predominantes en la región según diversos autores, durante las dos décadas pasadas.

A continuación, se describen las características principales de los usos de suelo en la CARSCH:

- Agricultura. En el último decenio del Siglo XX la participación de los distintos cultivos en la producción provincial fue: centeno el 46%, avena 40%, cebada 38%, trigo 28%, 20% girasol, 18% sorgo, 14% en alpiste, 3 % maíz, y 2 % en el caso de la soja. Las principales especies forrajeras son: *Bromus sp.*, *Festuca sp.*, *Trifolium sp.*, *Dactalis sp.* Los sistemas agrícolas en su mayoría son de secano bajo prácticas de laboreo en curvas de nivel y tradicional.
- Ganadería. El 15% del rodeo bovino de la Provincia proviene del suroeste bonaerense (Picardi & Giacchero, 2015). Se basa en invernada y cría. En el periodo invernal los productores aprovechan la vegetación natural de la parte alta de la sierra para la alimentación del ganado, provocando la denudación del suelo por la excesiva carga animal.
- Forestal. - No existen sistemas forestales con fines productivos, únicamente como montes de abrigo, ornamentales, protectores, cortinas sobre todo en zonas de ganadería. En las márgenes de los arroyos y río cada vez han ido disminuyendo por la presión ejercida por la actividad agrícola, provocando la reducción de la vegetación de ribera nativa y la expansión de vegetación forestal exótica como *Salix* y *Populus*. Existen algunos relictos de bosquecillos de chañar (*Geoffroea decorticans*) asociados con molle (*Schinus molle*) y piquillín (*Condalia lineata*), generalmente aislados y en retracción. En las orillas del Sauce Chico se encuentran algunos ejemplares de Sauce criollo (*Salix humboltiana*) (Cabrera, 1968; Frangi & Bottino, 1995; Gaspari, 2007; Torrero, 2009; Campo et al., 2012).
- Urbana. – Como se muestra en la figura 20 existen urbanizaciones dentro del área de estudio, como ser Villa Serrana la Gruta y Villa San Andrés de las Sierras. A 20km se ubica la ciudad cabecera de Tornquist que cuenta con 6473 habitantes. Las mismas tuvieron auge en el año 2005 y se han ido expandiendo. De acuerdo con el

censo realizado en el año 2010, muestra que ambos asentamientos cuentan con 52 habitantes.

- Pastizal natural. – descrito a detalle en el ítem 3.7. Los pastizales serranos, están presentes en todas las altitudes del sistema serrano. Principalmente en el área serrana (pajonal serrano), asociado principalmente con gramíneas. Como se muestra en la Figura 13, es la principal cobertura que ha disminuido por presión antrópica.

Es importante mencionar que en la cabecera de la CARSCH se ubica el Parque Provincial Ernesto Tornquist, creado en 1937, que posee 6700 hectáreas, que ofrece una alta diversidad de especies animales y vegetales, y la mayor concentración de endemismos de la provincia. Además, conserva el último relicto del pastizal pampeano serrano, siendo una zona de protección de cuencas hidrográficas.



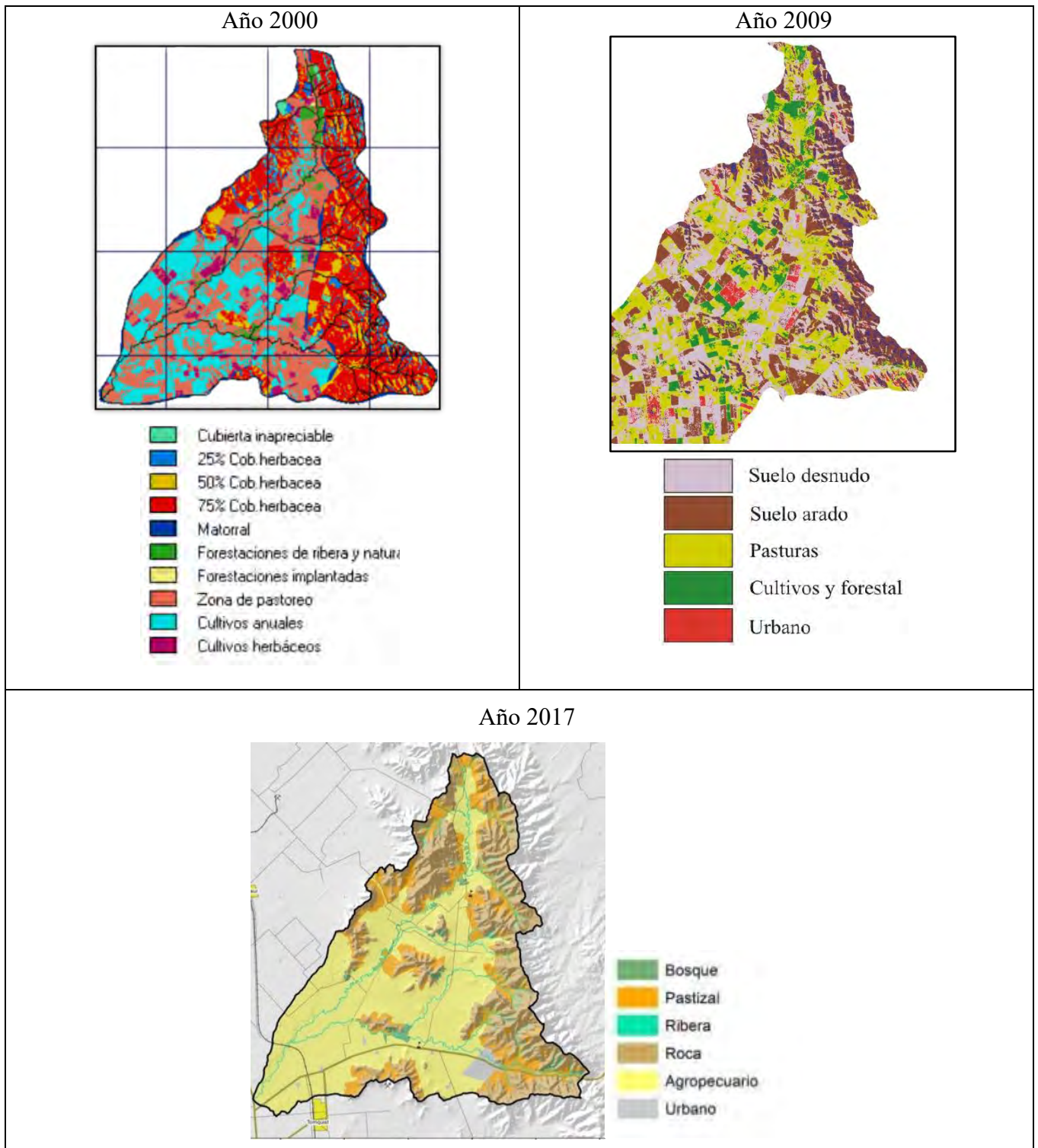


Figura 13. Uso de suelo en la CARSCH: 2000 – 2009 – 2017.

Fuente: Gaspari (2007);Torrero(2009); Cruz (2015).

## 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 4.1. CARACTERIZACIÓN LEGAL E INSTITUCIONAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el área de estudio, los excesos y los déficits hídricos son las principales problemáticas que provocan un riesgo para el hombre y sus actividades. Por esta razón, se realizó una caracterización del marco legal e institucional vigente en los distintos niveles jurisdiccionales que rige el agua como recurso. Se revisaron normativas en materia de gestión del agua, generadas en distintos niveles administrativos del Estado (nivel nacional, provincial y local). De igual forma se identificaron los organismos encargados de la administración del agua y su gestión.

### 4.2. CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA

La caracterización morfométrica de una cuenca hídrica se basó en determinar un conjunto de variables de forma (lineales y de superficie), de relieve y drenaje, para conocer las características físicas de una cuenca y respuesta del caudal emitido, pudiendo operar tanto para atenuar como para intensificar las crecidas (Gaspari, Rodríguez, Senisterra, Delgado, & Besteiro, 2013).

Primero se descargó información cartográfica de elevación del terreno, de la base de datos de elevación de la Plataforma Earth Explorer©, perteneciente a la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), en formato modelo digital de elevación (DEM), con resolución espacial de 30 m y 3 m vertical. El procesamiento del archivo DEM se realizó a través del software QGIS© y se utilizó el complemento QSwat (<https://swat.tamu.edu/software/qswat/>) para delimitar la cuenca hidrográfica.

La red de drenaje fue definida por digitalización manual, a partir del reconocimiento y análisis del historial de imágenes satelitales de Google Earth© (30 de diciembre de 1988 al 19 de septiembre de 2019). Además, fue corroborada por una delimitación automática a partir del DEM mencionado anteriormente.

Las ecuaciones que se describen a continuación caracterizan a los parámetros morfométricos, que se determinaron en la CARSCH, en base al análisis de trabajos antecedentes de: Horton (1945), Gaspari et al. (2013), Romero, et al. (2015), Khurana et al. (2019) y Mandale & Bansod (2019).

#### 4.2.1. Parámetros de forma

- **Área (A) (km<sup>2</sup>).** Es la medida de la superficie encerrada por la divisoria de aguas.
- **Perímetro (P) (km).** Se refiere a la longitud del contorno de una superficie o área de una cuenca hídrica.
- **Longitud axial (La) (km).** Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca.
- **Ancho promedio (Ap) (km).** Resulta de la relación existente entre el área y la longitud axial de la cuenca (Ecuación 1).

Ecuación 1:

$$Ap = A / La$$

A: área en km<sup>2</sup>.

La: longitud axial en km.

- **Factor de forma (IF) (adimensional).** Es la relación de proporcionalidad entre el caudal principal con respecto a sus caudales tributarios (Ecuación 2). Este criterio se considera como un indicador de la susceptibilidad de las cuencas hídricas a crecidas, debido a su forma. En el caso de IF es igual a 1 se corresponde a una cuenca de forma redondeada y con mayor susceptibilidad a crecidas; si IF es menor a 1 expresa a una cuenca alargada, en caso de cuencas triangulares se las identifica por que presenta dos vértices en la cabecera con efluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada que puede provocar crecidas significativas (Gaspari, 2013).

Ecuación 2:

$$IF = A / La^2$$

A: área en km<sup>2</sup>.

La: longitud axial en km.

- **Relación de elongación (Re) (adimensional).** Expresa la relación entre el diámetro (D) de un círculo que tiene la misma área que la cuenca y la longitud máxima de la misma conocida como longitud axial (La) (Ecuación 3).

Ecuación 3:

$$Re = D / La$$

D: diámetro en km.

La: longitud axial en km.

Valores de Re varían de 0,6 a 1. Valores cercanos a 1 refieren cuencas de muy bajo relieve, mientras los valores comprendidos entre 0,6 y 0,8 se asocia con alto relieve y superficie escarpada. Para una mejor comprensión el Re se agrupa en 3 clases que son: circular (Re>0,9), ovalada (0,9-0,8) y menos alargada (Re<0,7) (Waikar & Nilawar, 2014; Wilson et al., 2012).

- **Relación de circularidad (Rc) (adimensional).** Relaciona el área de la cuenca con el área de un círculo que tiene la misma circunferencia que el perímetro de esta (Mandale & Bansod, 2019) (Ecuación 4).

Ecuación 4:

$$Rc = 4 \pi A / P^2$$

A: área en km<sup>2</sup>.

P: Perímetro en km.

El valor unitario refiere a una cuenca de forma circular y mientras más cercano a 0 se trataría de una cuenca cuadrada (Díaz et al., 1999).

- **Índice de homogeneidad (IH) (adimensional).** Es la relación del área de la cuenca con la de un rectángulo que tiene por eje mayor la longitud máxima de la cuenca y por eje menor el ancho máximo de la cuenca (Ecuación 5).

Ecuación 5:

$$IH = A / (La * a)$$

A: área en km<sup>2</sup>.

La: longitud axial en km.

a: ancho máximo de la cuenca en km.

- **Índice de alargamiento (Ia) (adimensional).** Define si la cuenca es alargada a partir de relacionar la longitud axial y el ancho máximo (Ecuación 6).

Ecuación 6:

$$Ia = La \text{ (km)} / a \text{ (km)}$$

La: longitud axial en km.

a: ancho máximo de la cuenca en km.

Si:  $Ia > 1$  se trata de una cuenca alargada y  $Ia < 1$  refiere a cuencas achatadas con cauce principal corto.

- **Coefficiente de compacidad de Gravellius (Kc) (adimensional).** El Kc permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esta característica (Gaspari et al, 2009). Este parámetro se relaciona con el tiempo de concentración (Ecuación 7).

Ecuación 7:

$$Kc = 0,284 * P / A^{0,5}$$

A: área en km<sup>2</sup>.

P: perímetro en km.

En el caso que:

$Kc \leq 1,00$ ; cuenca es redonda y representa mayor riesgo de crecidas.

$Kc = 1,25$ , oval redonda

$Kc = 1,50$  oblonga

$Kc \geq$  igual o mayor a 1,75 cuenca rectangular-oblonga.

#### 4.2.2. Parámetros de relieve

- **Desnivel (H) (msnm).** Es la diferencia entre la elevación máxima (Hmax) y la mínima (Hmin) de la cuenca (Ecuación 8).

Ecuación 8:

$$H = H_{max} - H_{min}$$

Hmax: elevación máxima en msnm.

Hmin: elevación mínima en msnm.

- **Pendiente media (PM) (%).** El porcentaje de pendiente que presenta la cuenca e influye en los procesos de erosión, y en el caudal máximo (López, 1998). Su cálculo fue a partir de un DEM con la herramienta Estadística de Zonas del software QGIS®, que proporciona valores de los parámetros estadísticos, como ser: media, mínima y máximo de cota.
- **Relieve relativo (Rr) (adimensional).** Es el cociente entre el máximo desnivel de la cuenca y su perímetro (Ecuación 9).

Ecuación 9:

$$Rr = H / P$$

H: desnivel en msnm.

P: perímetro en m.

- **Relación relieve (Rh) (adimensional).** Resulta del cociente entre el máximo desnivel de la cuenca y su longitud axial (Ecuación 10).

Ecuación 10:

$$Rh = H / La$$

H: desnivel en msnm.

La: longitud axial en m.

- **Coefficiente de rugosidad (Ra) (adimensional).** Definido como el cociente entre el desnivel (H) y la densidad de drenaje (Dd) (Ecuación 11).

Ecuación 11:

$$Ra = H * Dd$$

H: desnivel en msnm.

Dd: densidad de drenaje en m/m<sup>2</sup>.

- **Curva hipsométrica (CH).** Las curvas hipsométricas representan la distribución del área drenada de acuerdo con su elevación. Además, es un indicador del equilibrio dinámico de la cuenca. Las mismas fueron calculadas a partir del modelo digital de elevación (DEM) en QGIS©, con apoyo en hojas de cálculo.
- **Mapa de pendiente:** partir del DEM se elaboró el mapa de pendientes (en %) por medio del procesamiento en un programa SIG. Posteriormente se elaboró el mapa de rangos de pendientes según Gaspari et al., (2013).

#### 4.2.3. Parámetros de drenaje

- **Longitud total red de drenaje (Lu) (km).** Según Horton (1945), Lu es la suma de la longitud de todos los tributarios de la corriente en cada orden de cauce dentro de una cuenca.
- **Densidad de drenaje (Dd) (km/km<sup>2</sup>).** Es la relación entre la longitud total de la red de drenaje (Lu) con respecto al área de la misma (A) (Ecuación 12).

Ecuación 12:

$$Dd = Lu / A$$

Lu: longitud total de la red de drenaje en km.

A: área de la cuenca en km<sup>2</sup>.

- **Pendiente media del cauce (J) (%).** Se deduce a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal (HCmax-HCmin) y la longitud del mismo (L). Se expresa en porcentaje (Ecuación 13).

Ecuación 13:

$$J = ((HCmax - HCmin) / L) * 100\%$$

HCmax: elevación máxima del cauce principal en msnm.

HCmin: elevación mínima del cauce principal en msnm.

L: longitud del cauce principal en m.

- **Número total de cauces (Nu).** Refiere a la cantidad total de cauces dentro de la cuenca.
- **Frecuencia de cauce (Fs) (# cauces / km<sup>2</sup>).** Es el cociente entre la cantidad de cauces (Nu) y el área de la cuenca (A) (Ecuación 14).

Ecuación 14:

$$Fs = Nu / A$$

Nu: Número total de cauces.

A: área de la cuenca en km<sup>2</sup>

- **Textura de drenaje (T) (km\*#cauce / km<sup>2</sup>).** Es el producto de multiplicar la densidad de drenaje (Dd) por la frecuencia de cauce (Fs)

Ecuación 15:

$$T = Dd * Fs$$

Dd: densidad de drenaje en km/km<sup>2</sup>.

Fs: área de la cuenca en # cauces / km<sup>2</sup>.

- **Tiempo de concentración (Tc).** Es el tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca relacionándose directamente con la forma de la cuenca (Chow et al., 1994; Gaspari et al., 2009).

La Figura 14 representa a un hidrograma para una tormenta conocida expresando, además, los tiempos que lo definen, donde Tb es el tiempo base es decir el intervalo comprendido entre el inicio y fin del escurrimiento, Tc-1 corresponde al tiempo de concentración (Tc), definido como el tiempo entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía superficial directa (C). El tiempo de retardo (Tr-1) es el tiempo transcurrido entre el centroide del hietograma y centroide del hidrograma de escorrentía, que, también se lo considera como el tiempo entre el centroide del hietograma y el caudal punta (B), Tp se considera como el intervalo transcurrido entre el inicio de la lluvia efectiva y el caudal punta (Vélez & Botero, 2010).

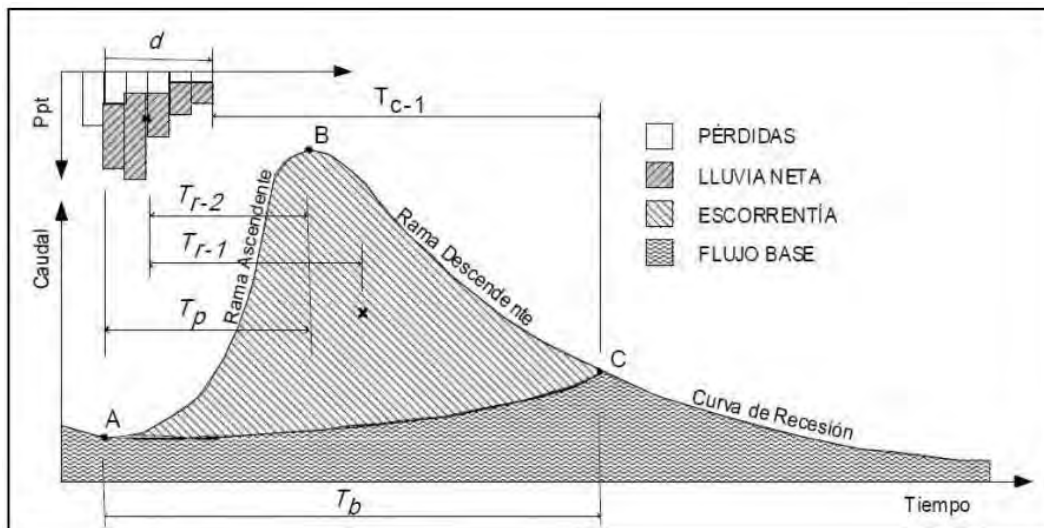


Figura 14. Tiempos característicos en un hidrograma.

Fuente: Vélez & Botero (2010).

Existen varias ecuaciones que permiten determinar el tiempo de concentración. Es importante mencionar que el tiempo de concentración se puede calcular en minutos ( $t_c$ ) y en horas ( $T_c$ ). De acuerdo a las características de la cuenca en estudio y como resultado de la investigación realiza por Vélez & Botero (2010) en la que comparan valores de tiempo de concentración de ecuaciones con observaciones en una cuenca experimental, se decidió seguir su recomendación de considerar adecuado hacer uso del promedio de la mayor cantidad de ecuaciones empíricas para calcular el tiempo de concentración, de tal forma que se reduzca la incertidumbre asociada. Para el presente trabajo de tesis se empleó el valor promedio como resultado de calcular las diez ecuaciones más citadas en Argentina, que se presentan a continuación:

Ecuación 16: Bransby (1922);

$$t_c = 14,6 * L / (A^{0,1} * J^{0,2})$$

Ecuación 17: California Department of Public Works. (1960);

$$t_c = 60 * [0,87075 * L^3 / H]^{0,385}$$

Ecuación 18: Clark (1945);

$$T_c = 0,335 * [A / J^{0,5}]^{0,593}$$

Ecuación 19: Arbeláez et al. (1997);

$$T_c = 4 * A^{0,5} + 1,5 * L / 25,3 * (J * L)^{0,5}$$

Ecuación 20 a: Kirpich (1940);

$$t_c = 0,0078 * L_p^{0,77} / J^{0,385}$$

Ecuación 20 b: Kirpich (1940);

$$t_c = 0,02 * L_p^{0,77} / S^{0,385}$$

Siendo  $L$ , longitud máxima del curso en metros y  $S$ , pendiente en metros por metro (%)  
(Mármol, 2008).

Ecuación 21: Método racional generalizado (1987);

$$t_c = [60 * n * L / H^{0,3}]$$

Ecuación 22: Pilgrim y McDermott (1982);

$$T_c = 0,76 * A^{0,38}$$

Ecuación 23: Témez (1991) y Mármol (2008);

$$T_c = 0,3 * [L / J^{0,25}]^{0,76}$$

Ecuación 24: Valencia y Zuluaga (1981);

$$T_c = 1,7694 * A^{0,325} / L^{0,096} * J_o^{0,29}$$

Ecuación 25: Snyder (1938);

$$T_c = 1,2 * (L * L_{cg})^{0,3}$$

Dónde:

Tiempo de concentración en minutos ( $t_c$ ) y en horas ( $T_c$ )

$L$ : la longitud del cauce principal en km y  $L_p$  en pies

$H$ : desnivel en m,

$J$ : pendiente promedio del cauce principal en m/m,  $J_o$  es la misma pendiente, pero en %,

$A$ : área de cuenca en  $km^2$ ,

$L_{cg}$ : distancia desde el punto de aforo hasta el centro de gravedad de la cuenca en millas,

$n$ : coeficiente de rugosidad del cauce.

- **Tiempo de retardo o Lag Time.** En cuanto al tiempo de retraso o de rezago, el Servicio de Conservación de Estados Unidos (Soil Conservation Service) propone que es 0,6 veces el  $T_c$  estimado.

Ecuación 26:

$$T_r = 0,6 * T_c$$

- **Orden de cauce.** Para la determinación del orden de cauce se empleó el método Strahler (1964) el cual asigna orden 1 a un curso que carece de tributarios, orden 2 es formado por la confluencia de dos cursos de orden 1 y orden 3 es formado por la confluencia de uno o varios afluentes de segundo orden, pero puede recibir directamente afluentes de primer orden; así sucesivamente se llega al orden más elevado, que debe corresponder al cauce principal de la cuenca.



- **Longitud promedio del cauce (Lsm) (km).** Es la relación entre la longitud total del flujo (Lu) y el número de cauces (Nu) en cada orden (Ecuación 27).

Ecuación 27:

$$Lsm = Lu / Nu$$

Lu: longitud total del flujo en km.

Nu: número de cauces.

- **Relación de longitud de flujo (RI).** Se obtiene de dividir la longitud promedio de flujo de cualquier orden (Lu) para la longitud promedio de flujo del siguiente orden inferior (Lu-1), fue anunciada por Horton para hacer referencia a “la longitud media acumulada de segmentos de cauce de ordenes sucesivos tiende a formar una progresión cuyo primer término es la longitud media de los segmentos de primer orden y tiene por razón una relación de longitud constante”. (Ecuación 28).

Ecuación 28:

$$RI = Lu / Lu-1$$

- **Relación de bifurcación (Rb).** Es la relación entre el número de segmentos de flujo de un orden dado (Nu) y el número de segmentos del siguiente orden superior (Nu+1) (Ecuación 29).

Ecuación 29

$$Rb = Nu / Nu+1$$

- **Relación promedio de bifurcación (Rbm).** Es el promedio del Rb obtenidas para todos los órdenes de cauces y expresa el nivel de control estructural debido al desarrollo geológico y litológico, el cual genera un patrón en la red de drenaje (Ecuación 30).

Ecuación 30:

$$Rbm = \Sigma Rb_n / nRb$$

### 4.3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El estudio de la variabilidad espacio temporal de elementos climáticos, como precipitación y temperatura que caracterizan un área, es importante para comprender y evaluar sus efectos sobre la cuenca hidrográfica. Para realizar el análisis climático de la CARSCH, se tomó en cuenta que la distribución geográfica de las estaciones meteorológicas permita captar la influencia del sistema serrano sobre la variabilidad espacio-temporal de la lluvia a lo largo de todo el valle interserrano, y sobre todo en el área de estudio, en coincidencia con Campo et al. (2011); Gil et al. (2016); Michalijos & Zapperi (2015) y Campo et al. (2016).

Los datos fueron provistos por el Servicio Meteorológico Nacional, Fundación Hogar FUNKE, Silos de la Cooperativa Rural Ltd. Los Vascos Cereales y Cátedra de Manejo de Cuencas Hídricas FCAYF-UNLP. Las estaciones meteorológicas consideradas se presentan a continuación, cuya distribución se muestra en la Figura 15: Gran Chaco, Tornquist, Funke, Bordenave, Pigüe y Coronel Suárez.

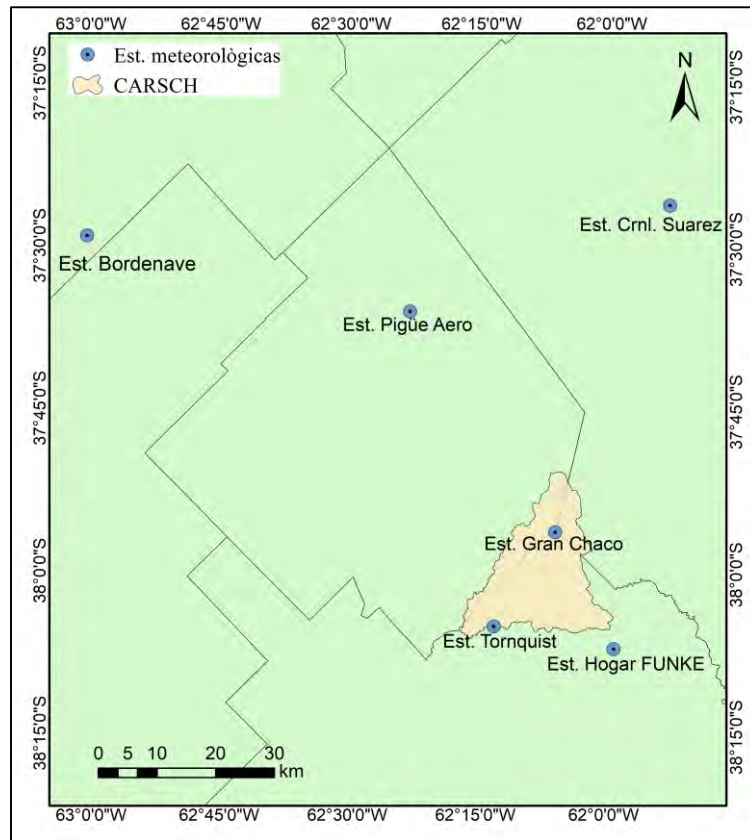


Figura 15. Localización de las estaciones meteorológicas.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, Fundación Hogar FUNKE y Silos de la Cooperativa Rural Ltd.-Los Vascos Cereales.

#### 4.3.1. Precipitación y temperatura

Para el análisis de la variabilidad climática se consideró importante contar con registros completos de precipitación y temperatura en todas las estaciones para el periodo 1988-2017, pero debido a la baja disponibilidad de valores medidos sobre todo de temperatura se recurrió a estimaciones satelitales.

En el caso de precipitación se utilizaron mediciones provenientes de la base de datos “NOAA/PERSIANN-CDR” de resolución espacial de 0,25 arc degrees y temporalidad diaria, disponible en la plataforma de Google Earth Engine ©.

En el caso de mediciones de temperatura los provenientes de la colección “NOAA/CFSV2/FOR6H” de igual resolución espacial que precipitación, pero de resolución temporal cada 6 horas y sus valores están expresados en Kelvin (K).

Previamente a la utilización de los datos adquiridos de precipitación y temperatura satelital, se realizó un análisis estadístico para determinar la validez de las mediciones satelitales relacionándolas con los valores reportados por las estaciones meteorológicas.

Finalmente, se realizó un análisis estadístico descriptivo de precipitación y temperatura en todas las estaciones, estableciendo valores máximos, mínimos, medias, y variabilidad estacional, anual y mensual expresados a través de histogramas de frecuencia relativa y diagramas ombrométricos.

### 4.3.2. Balance hidrológico medio mensual

El balance hidrológico permite analizar la entrada y salida de agua de un espacio territorial en el tiempo, para una evaluación cuantitativa. Se considera como variables la precipitación media mensual (P) y la evapotranspiración (ET) potencial (ETP) y real (ETR). Como se muestra en la Figura 16, la forma en que varía la precipitación, ETP y ETR determina la existencia de consumo, déficit, recarga o excedente de agua en el suelo. En este último caso el agua al no ser retenida por el suelo puede escapar en forma de escorrentía superficial o subterránea (Gaspari et al., 2013; Sánchez, 2018).

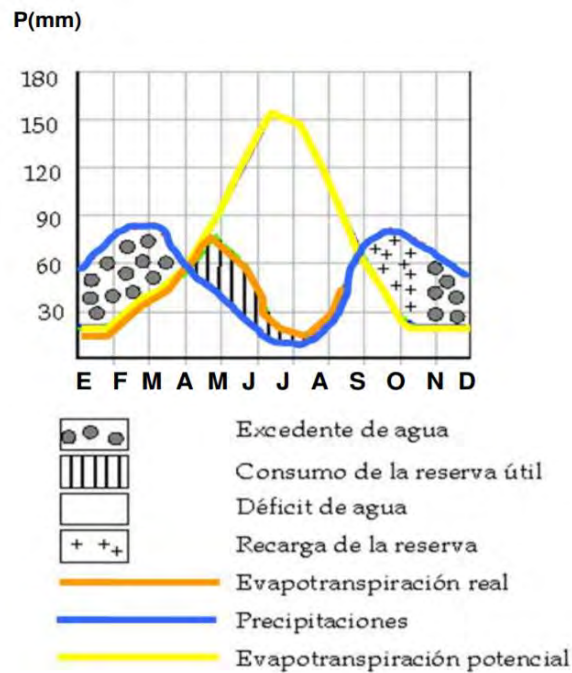


Figura 16. Balance hídrico en el suelo.

Fuente: Sánchez (2018).

A continuación, se explica cada uno de los componentes del balance hidrológico:

- Evapotranspiración potencial (ETP) expresada en mm / mes. Thornthwaite - Mather (1948) la definen como “*el agua que se perderá si en ningún momento existe déficit de la misma en el suelo para uso de la vegetación*”. Para su cálculo se aplica la siguiente secuencia de ecuaciones:

Ecuación 31:

$$i = (t / 5)^{1,514}$$

i: índice de calor mensual

t: temperatura media mensual, °C

Ecuación 32:

$$I = \sum_{k=0}^n i$$

**I:** índice de calor anual

**i:** índice de calor mensual

Ecuación 33:

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 * (10 * t / I)^a$$

$ETP_{\text{sin corregir}}$ : ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas).

**t:** temperatura media mensual, °C.

**I:** índice de calor anual.

$$a = 675 * 10^{-9}I^3 - 771 * 10^{-7}I^2 + 1792 * 10^{-5} * I + 0,49239$$

Ecuación 34:

$$ETP = ETP_{\text{sin corregir}} * N / 12 * d / 30$$

**ETP:** evapotranspiración potencial corregida.

**N:** número de horas de sol, dependiendo del mes y latitud.

**d:** número de días del mes.

- Evapotranspiración real (ETR). Es la estimación de la evapotranspiración que realmente se produce bajo condiciones atmosféricas existentes. La ETR puede ser menor o igual a la ETP. El cálculo de la ETR se realiza a través de la consideración de la reserva hídrica del suelo, conocida también, como capacidad de campo, que se la puede estimar de acuerdo a la textura del suelo y cobertura vegetal (Sánchez, 2018).

Para determinar la ETR, se parte de la relación entre la precipitación mensual en mm (PP) y la evapotranspiración potencial (ETP). Para el cálculo de la ETR se hace uso de las siguientes premisas:

1. Si  $PP - ETP \geq 0$ , entonces  $ETR = ETP$
2. Si  $ETR < ETP$ , entonces  $ETR = PP + [\text{variación de la reserva}]$

Para determinar la **variación de la reserva**, se considera la ecuación 35:

Ecuación 35:

$$\Delta VR = \text{reserva}_m - \text{reserva}_{m-1}$$

$\Delta VR$ : variación de la reserva en mm

La reserva puede ser estimada con base a la capacidad de retención del suelo y la profundidad radicular de la cobertura vegetal. En caso de no contar con estos datos se considera como valor de reserva máxima una referencia de 100 mm (Thornthwaite, 1948), que es universalmente aceptado y considerado para cálculos de balance hídrico en diferentes áreas. Para determinar la reserva de acuerdo a la diferencia de pp – ETP, considerando las siguientes premisas:

1. La capacidad máxima de la reserva son 100 mm.
2. Se considera agotada la reserva cuando su valor es cero.
3. Valores superiores a 100 y negativos serán considerados como cero.

#### 4.4. SUELOS

Para la realizar la caracterización edáfica de CARSCH, se hizo uso de la carta de suelos en escala 1:50 000, formato shape file, suministrado por el Instituto de Suelos del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) y la descripción de los grupos edáficos que se encuentran disponibles en la página <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.html> .

Para el análisis y descripción de las características edáficas en la CARSCH, se aplicaron los siguientes conceptos, estimado por medio de la zonificación realizada aplicando procedimientos geoespaciales:

a) **Capacidad de uso.** La capacidad de uso de los suelos es una clasificación técnica basada en los efectos combinados del clima y las características permanentes del suelo, con el objetivo de agrupar a los suelos en clases que señalen su adaptabilidad a ciertos cultivos, indicar las dificultades, riesgos y limitaciones que se pueden presentar al usarlos (INTA,2018). Las clases convencionales para definir la Capacidad de Uso de Suelo son:

- I apto para agricultura y requiere de poco o ningún tratamiento de manejo o conservación especial.
- II, III y IV aptos para agricultura, pero necesitan grados crecientes de cuidado y protección.
- V a VII por lo general no son aptas para los cultivos y precisan cuidados progresivamente más intensos, aun cuando se destinen para pasturas o forestación.
- VIII no tiene aplicación agrícola ni ganadera, sólo sirve para la recreación o para conservación de la fauna silvestre.

b) **Limitaciones por Subclase edáfica.** Las subclases informan sobre los tipos principales de limitaciones de las clases. La mayoría de las clases de suelos admiten hasta cuatro subclases, que se designan agregando las letras minúsculas "e", "w", "s" o "c":

- Subclase "e" -erosión- está integrada por suelos en los cuales la susceptibilidad a la erosión es el problema o peligro dominante para su uso. Este peligro latente, así como el daño que pudo haber sufrido el suelo en el pasado por un proceso erosivo, son los factores que determinan la inclusión de los suelos en esta subclase.

- Subclase "w" -exceso de agua- está constituida por suelos en los cuales dicho exceso es el riesgo o limitación dominante. Los criterios para determinar cuáles suelos pertenecen a esta subclase son: drenaje pobre, humedad excesiva, capa de agua alta (freática o suspendida) y anegabilidad.

- Subclase "s" -limitaciones del suelo dentro de la zona radical- incluye suelos que presentan problemas de escasa profundidad, baja capacidad de retención de humedad, salinidad o alcalinidad y bajo nivel de fertilidad difícil de corregir.
- Subclase "c" -limitación climática- está compuesta por suelos en los cuales el clima es la mayor limitación.

c) **Capacidad productiva agrícola.** Esta capacidad se basa en la ponderación de condiciones macro climáticas y características edáficas permanentes relevadas por los inventarios sistemáticos de suelos, producidos por el INTA en distintas etapas. Con el objeto de establecer Áreas Homogéneas de productividad agrícola, se establecieron niveles de capacidad productiva según rangos, para diversas zonas de la Argentina, como se muestra en la Figura 17 y Tabla 1

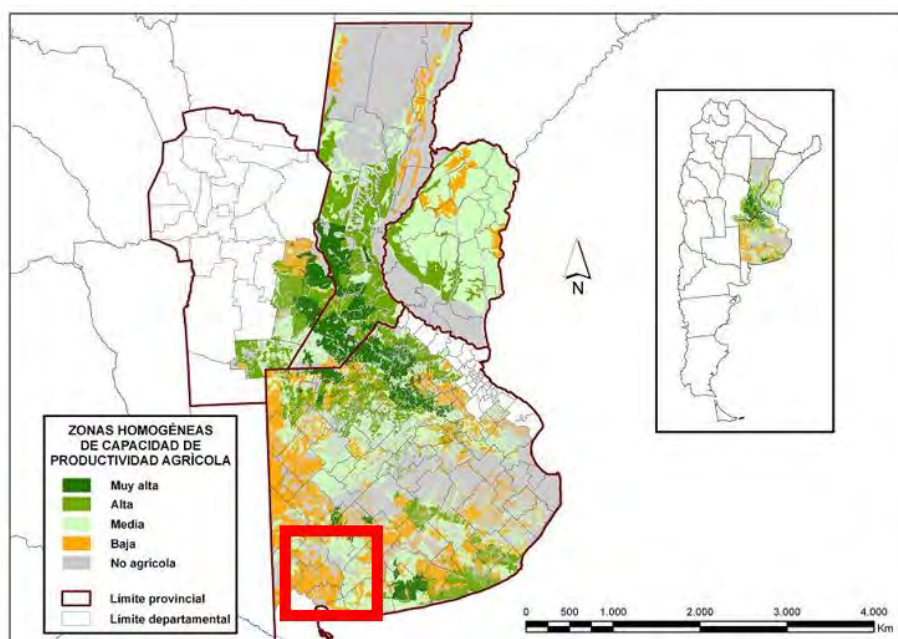


Figura 17. Zonificación de la capacidad de productividad agrícola y área en estudio.  
Fuente: ORA (2019).

La capacidad productiva agrícola se evalúa a través del índice de productividad unificado (IP) que valora la productividad agraria actual y potencial de los suelos de acuerdo a sus características y propiedades (Schulz et al., 2012). Del cálculo del IP realizado por el INTA y publicado en el año 2013, surge la tabla 1 que resume el nivel de productividad de acuerdo al valor de IP.

Tabla 1. Clase de capacidad productiva agrícola (IP).

CLASE DE IP	INTERVALO DE IP
MUY ALTA	85-100
ALTA	84-70
MEDIA	69-55
BAJA	54-40
NO AGRÍCOLA	<39

Fuente: ORA (2019).

d) **Grupo hidrológico.** Se basa en cálculos del potencial de escorrentía, de acuerdo con el índice de infiltración del agua cuando el suelo no está protegido por vegetación, está completamente húmedo y recibe precipitaciones de tormentas de larga duración. El criterio establecido en el Sistema Soil Taxonomy (National Resource Conservation Service, (USDA 1999 2ª. Edición) para definir los grupos hidrológicos y aplicada por GeoINTA, es:

- **Grupo A:** suelos que tienen un alto índice de infiltración (bajo potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Están formados principalmente por arenas profundas, bien drenadas o excesivamente drenadas, o arenas de textura gruesa. Estos suelos presentan una tasa elevada de transmisión de agua.
- **Grupo B:** suelos que tienen un índice de infiltración moderado cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos moderadamente profundos o profundos, moderadamente bien drenados o bien drenados con una textura de moderadamente fina a moderadamente gruesa. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua.
- **Grupo C:** suelos que tienen un índice de infiltración lento cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua o suelos de textura moderadamente fina o fina. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua lenta.
- **Grupo D:** suelos que tienen un índice de infiltración muy lento (alto potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Se trata fundamentalmente de arcillas con alta capacidad para expandirse y contraerse, suelos con un elevado nivel freático, suelos que presentan una capa de arcilla o claypan en la superficie o cerca de la superficie, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

Los cuatro procedimientos mencionados se realizaron en la CARSCH, por medio del procesamiento y posterior creación de base de datos digital de toda la cartografía recolectada, a través de programa QGIS©. Debido a la escala de la información digital para el análisis fue necesario contrastar con datos generados en estudios previos y observaciones a campo.

#### **4.5. COBERTURA Y USO DE SUELO**

Para la identificación espacio-temporal de los principales usos de suelo en la CARSCH y posterior detección de cambios se empleó la plataforma de acceso libre Google Earth Engine que ofrece un amplio catálogo de información satelital y permite el análisis geoespacial en base web y entorno automatizado (Céliz & Maidana, 2019).

El tipo de clasificación empleada fue de tipo supervisada mediante el algoritmo Random Forest (RF), considerado como el más óptimo por revisión bibliográfica y pruebas realizadas anteriormente frente a otros clasificadores. Las imágenes utilizadas fueron de la colección "LANDSAT/LT05/C01/T1\_TOA" de LANDSAT 5 TM para 1988 y 2005 y la colección "LANDSAT/LC08/C01/T1\_TOA" de LANDSAT 8 OLI para 2017, calibradas a tope de la atmosfera y adquiridas entre los meses de mayo – julio correspondiente a los meses más secos y de menor cobertura nubosa. La reducción de la resolución temporal a una sola imagen se empleó la mediana de las imágenes existentes. Para incrementar la separabilidad de clases se utilizó el modelo de elevación digital (SRTM) y el índice espectral NDVI.

Para establecer los puntos de muestreo de cobertura vegetal y uso del suelo en mayo de 2017 se relevaron a campo 50 puntos de control con GPS, considerando su representatividad y procurando que estén ubicados en parches homogéneos. En estos puntos se estableció el tipo de cobertura/uso de suelo identificadas. Para los años 2005 y 1988 los puntos de muestreo se generaron en gabinete, relacionando la información obtenida de campo con los valores de índice normalizado de vegetación (NDVI) e interpretación visual debido a su respuesta espectral. En el caso de la cobertura Semi-urbano fue definida por digitalización en base a información digital del IGN.

A partir de los puntos de control obtenidos se generaron polígonos buffer y se amplió la base de datos a 40 puntos por cobertura. Para la clasificación, el set de datos fue dividido aleatoriamente en dos conjuntos de tamaño correspondiente al 85% del total de datos de entrenamiento, Este procedimiento permite garantizar que los dos conjuntos de datos tengan la misma proporción de cada clase identificada (Thanh Noi & Kappas, 2017). El script generado para la clasificación se muestra en el Anexo 8.1.

#### **4.6. ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL**

Al inicio de evento de precipitación, una parte es retenida por la vegetación que la intercepta, otra infiltra dependiendo de la capacidad de saturación del suelo y finalmente si el volumen o intensidad de la precipitación sobrepasa estos límites, empieza la generación de escurrimiento. El flujo de agua de lluvia que conforma el escurrimiento circula de forma laminar en movimientos cuasi horizontales ya sea sobre la superficie del suelo o a nivel de subsuelo ayudando a mantener los ríos y lagos por largos periodos de tiempo (Gaspari et al., 2013).

Cuando el flujo de escurrimiento es sobre la superficie del suelo se conoce como escurrimiento superficial y tiende a ser el principal responsable de cambiar los contornos y formas del relieve a través de la activación de procesos de erosión.

Una forma de cuantificar el escurrimiento superficial es mediante el método del Número de Curva (NC), establecido en 1985 por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos. Este método permite calcular las abstracciones de la precipitación, que por diferencia permite determinar el escurrimiento. El NC debe ser establecido para cada complejo suelo-vegetación, a partir de características particulares de vegetación y textura edáfica (Gaspari et al., 2013).



Para determinar el NC es necesario:

- a) Establecer la clasificación hídrica de los suelos que conforman la cuenca en función de cuatro grupos hidrológicos (GH), según el ítem 4.5.d y Tablas 12 y 13 del Anexo 8.2.
- b) A partir de la zonificación de uso de suelo realizada en el ítem 4.6. se delimitó las zonas de vegetación.
- c) La condición de humedad antecedente en el suelo aplicada en esta tesis fue la media (II) considerada en base a una tormenta modal (P), para cuyo valor se consideró que sea una lluvia entre 12,7 – 38,1mm, dentro de los 5 a 10 días previos a dicho evento.

Se determinó el  $NC_i$  para cada complejo suelo-vegetación en base a la Tablas 15 y 16 del Anexo 8.2. Para asignar un solo  $NC_p$  (número de curva ponderado) a CARSCH se realizó la ponderación en superficie de ocupación (A) de todos los  $NC_i$  obtenidos para cada uno de los complejos, aplicando la Ecuación 36:

Ecuación 36:

$$NC_p = (1 / A) * \sum_{i=1}^n A_i * NC_i$$

Una vez obtenido el  $NC_p$  para la CARSCH, se realizó la cuantificación del escurrimiento directo o superficial (Q), a través de las siguientes ecuaciones:

#### **Pérdidas iniciales ( $I_0$ ):**

Ecuación 37:

$$I_0 = 0,2 * S$$

#### **Retención potencial máxima (S):**

Ecuación 38:

$$S = 254 * (100 / NC - 1)$$

#### **Escurrimiento superficial en mm (Q):**

Ecuación 39:

$$Q = (P - 0,2 * S)^2 / (P + 0,8 * S)$$

P: tormenta modal de 95 mm que tuvo lugar el 08 de noviembre de 2002.

Obtenida la zonificación del NC y realizado un agrupamiento por clases, se procedió al cruzamiento del mapa de rangos de NC con el mapa de rangos de pendiente elaborado en el ítem 4.2.2. Una vez generado el mapa de cruzamiento se identificaron las diferentes clases de riesgo de erosión con base en la clasificación propuesta por Gaspari et al. (2013) y expresada en la Tabla 2:

Tabla 2: Riesgo de erosión en clases según rangos de NC y rangos de pendiente

Rango Pendiente %	Rango de NC		
	<60	60 - 80	>80
0 – 3	MB	MB	B
3 – 12	MB	B	M
12 - 18	B	M	M
18 - 24	M	A	MA
24 - 30	A	A	MA
>30	MA	MA	MA

\*MB: muy bajo, B: bajo, M: medio, A: alto, MA: muy alto

Fuente: Gaspari et al. (2013)

#### 4.7. PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL

De acuerdo con Gaspari et al. (2013), la erosión hídrica es el procesos de disgregación y transporte de las partículas del suelo por acción del agua. Una metodología para la cuantificación de la pérdida de suelo es el Modelo USLE (Universal Soil Loss Equation):

El modelo USLE fue formulado por Wischmeier y Smith, en el año 1965, estima la pérdida promedio anual de suelo en tierras agrícolas. Como se observa en la Figura 18 este modelo utiliza información sobre precipitación, suelo, pendiente del terreno, uso y manejo del suelo, que combinada permite establecer la erosión hídrica superficial (Gaspari et al., 2013). La Ecuación 40 presenta los factores que integran el modelo.

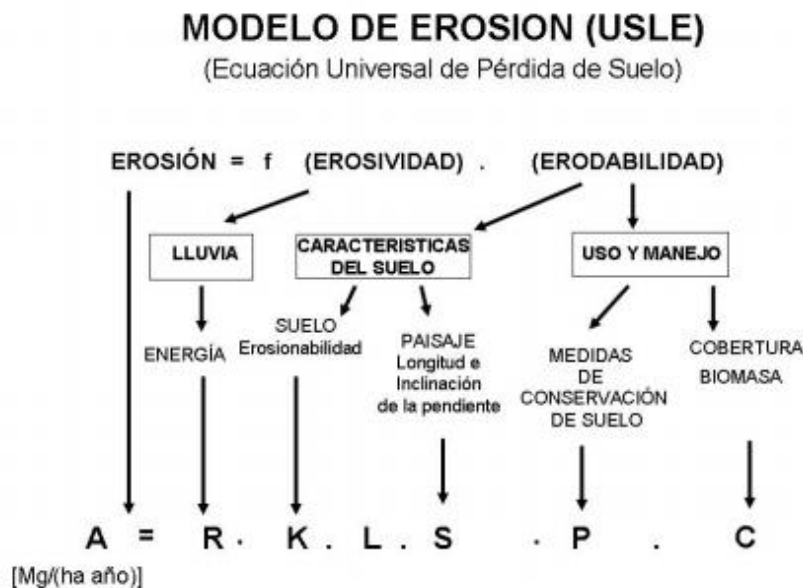


Figura 18. Modelo U.S.L.E  
Fuente: Gaspari et al. (2013)

Ecuación 40:

$$A = R * K * LS * C * P$$

A: Pérdida de suelo por erosión pluvial (Mg/ha\*año).

R: Factor índice de erosión pluvial o erosionabilidad del aguacero ( $J*cm/m^2*h$ ).

K: Factor de erodabilidad del suelo ( $Mg.m^2/h/ha*J*cm$ ).

L: factor de largo de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos en el largo de la pendiente.

S: factor de magnitud de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos de una superficie con una pendiente específica.

C: Factor ordenación de cultivos.

P: Factor de control de erosión mediante prácticas de cultivo.

A continuación, se presenta la forma de cálculo de cada uno de estos factores:

a) **Factor índice de erosión pluvial o erosionabilidad del aguacero (R).** Es el número de unidades de índice de erosión pluvial (EI), más un factor para escurrimiento por derretimiento de nieve o aplicación de agua. El EI para una tormenta es el producto de la energía total de la tormenta (E) y su máxima intensidad en 30 minutos (I) (FAO,1993). Debido a que se requiere de información detallada y un registro continuo de intensidad de lluvia este valor se asumió a partir de la aplicación INTA-USLE-RUSLE (INTA, 2015) para la localidad de Coronel Suárez y Tornquist.

b) **Factor de erodabilidad del suelo (K).** Indica la predisposición del suelo a ser erosionado y se relaciona directamente con la estabilidad estructural del mismo (Ecuación 41).

Ecuación 41:

$$100*K = 10^{-4} * 2,71 * M^{1,14} * (12 - a) + 4,20 * (b - 2) + 3,23 * (c - 3)$$

M: (% limo + % arena muy fina) \* (100 - % arcilla), expresándose también como: (% partículas entre 0,002 y 0,1 mm) \* (% partículas entre 0,002 - 2,0 mm)

a: Porcentaje de materia orgánica = Porcentaje de Carbono Orgánico \* 1,724.

b: Indica la estructura del suelo.

1. Gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1 mm)
2. Gránulo fino y grumo medio (1 - 2 mm)
3. Gránulo medio, grumo medio (2 - 5 mm) y gránulo grueso (5 - 10 mm)
4. Gránulo liso, prismático columnar y muy grueso (> 10 mm).

c: Clase de permeabilidad del perfil del suelo según Soil Survey Manual del U.S.D.A

1. Rápida o muy rápida
2. Moderadamente rápida
3. Moderada
4. Moderadamente lenta
5. Lenta

## 6. Muy lenta

c) **Factor topográfico LS.** Este factor expresa el efecto que tiene la pendiente sobre la pérdida de suelo por acción de la escorrentía. La determinación de este factor se realiza a partir del procesamiento del DEM empleado en el punto 4.2. mediante el software QGIS ©.

d) **El valor de efecto de cobertura de cultivo (C).** Este factor se lo asume a partir del tipo de cultivo presente en el área de la cuenca y se lo relaciona con la tabla de valores predeterminadas (Gaspari et al, 2013).

e) **Factor prácticas de cultivo (P).** El factor P Indica la relación entre la pérdida del suelo en áreas con prácticas de conservación de suelos y las que realizan actividad agrícola sin ninguna medida de conservación. Este valor es asumido de acuerdo a las características del área en base a valores existentes en tablas (Gaspari et al., 2013). En el caso de áreas sin ningún tipo de práctica de cultivo, se asume el valor de 1.

### 4.7.1. Clasificación de pérdida de suelo

En 1981 FAO, PNUMA y UNESCO, presentaron una clasificación que evalúa el grado de erosión hídrica expresado en la Tabla 3 (Gaspari et al., 2013).

Tabla 3. Clasificación en grado de erosión hídrica superficial.

<b>Pérdida de suelo (Mg/ha*año)</b>	<b>Grado de erosión hídrica</b>
<10	Nulo o leve
10-50	Moderado
50-200	Alto
>200	Muy alto

Fuente: Gaspari et al. (2013).

## 4.8. ÁREA HISTÓRICA / POTENCIAL DE HUMEDALES

La distribución potencial de los humedales se define como la distribución espacial de los humedales que existiría si no hubiera actividades humanas en la tierra (Hu, Niu, Chen, Li, & Zhang, 2017). La metodología para identificar y delimitar sitios potenciales para humedales a escala de paisaje implicó un primer acercamiento a través de un análisis topográfico y posterior correlación con suelos que cumplan con las características señaladas en el ítem 2.2. Humedales. Una vez delineados, monitorear los cambios que han experimentado estas áreas y sus consecuencias en la provisión de SE de regulación hídrica.

### 4.8.1. Identificación y delimitación

Para la identificación y delimitación de sitios históricos/potenciales para humedales a escala de cuenca hidrográfica se basó en modelos topográficos que ayudan a la predicción espacial de procesos hidrológicos y geomorfológicos debido a elevadas correlaciones que muestran con los atributos del suelo y procesos del paisaje (Gessler et al., 1995).

### a) Índice topográfico de humedad (TWI)

El TWI fue propuesto por Beven y Kirkby en 1979, y permite la identificación de áreas que tienden a acumular agua. Esta situación es importante en la comprensión de la distribución de la humedad del suelo, que es la principal condicionante en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, incluyendo la composición y estructura de la vegetación (Babbar & Sebens et al., 2013).

El TWI se ha probado con estudios ecológicos de vegetación, con datos de humedad de suelo medidas y otras propiedades del suelo, revelando altas correlaciones (Palmeri & Trepel, 2002; Walters & Babbar-Sebens, 2016). Zonas que presentan altos valores de TWI se consideran áreas húmedas potenciales donde los factores topográficos contribuyen a la acumulación de agua.

El análisis espacial de TWI, se realizó con base a la metodología presentada por Walters & Babbar-Sebens (2016). En este caso se siguió la recomendación hecha por Walters & Babbar-Sebens (2016) que consideran a los píxeles con valores superiores a 11.5 como ubicaciones topográficas para los humedales. Para ello se utilizaron los complementos del software libre QGIS.

Los pasos a seguir fueron:

1. A partir del DEM crear un ráster de dirección de flujo.
2. Creación de un ráster acumulación de flujo (Ac).
3. Mapa de pendientes en radianes ( $\beta$ ).
4. Aplicación de la ecuación 42, que describe la obtención del TWI:

Ecuación 42.

$$TWI = \ln\left(\frac{Ac}{\tan\beta}\right)$$

### b) Índice de Humedad Topográfica de Precipitación (PTWI)

Se trata de un nuevo índice propuesto por Hu, Niu, Chen, Li, & Zhang (2017), en base a una modificación del índice TWI, con el objetivo de simular la distribución potencial de los humedales mundiales independientemente de actividades humanas, para evaluar las pérdidas de humedales globales.

Este índice se basa en el siguiente concepto de Hu, Niu, Chen, Li, & Zhang (2017), quienes mencionan que *“La precipitación abundante siempre resulta en la presencia de humedales, mientras que una mayor evapotranspiración siempre resulta de la existencia de humedales”*. Por ello el PTWI se basa en utilizar una precipitación (Ecuación 43) para simular la distribución de los humedales a partir de su mecanismo de ocurrencia. Argumento que fue validado a través de un conjunto de datos de humedales observados en distintas regiones del mundo distribuidas en una variedad de regiones desde tropicales a boreales y de climas húmedos a secos con precipitaciones promedio anual de 266 mm a 1394 mm.

Ecuación 43.

$$PTWI = \ln(P * Ac / \tan\beta)$$

Ac: Mapa de acumulación de flujo.

$\beta$ : Mapa de pendientes en radianes.

P: valor de precipitación media anual del periodo de estudio.

Al tratarse de un índice nuevo son limitados los estudios relacionados a este índice por ello, el valor umbral a partir del cual se consideraría como área potencial de humedal se hizo de la misma forma que en el estudio citado. Los valores de PTWI se probaron repetidamente para simular la distribución espacial de humedales, tomando en cuenta zonas de referencia y coincidencia con el índice TWI.

### **c) Orientación de ladera.**

La exposición de las laderas respecto a la radiación solar (insolación) modifica las condiciones micro climáticas sobre todo en zonas áridas y semiáridas. Estas modificaciones condicionan la temperatura y humedad del suelo. Como consecuencia regula la distribución y presencia de vegetación (Gil, 2009), disponibilidad de agua al relacionarse directamente con los valores de evapotranspiración potencial (Gonzalez & Raventos, 1992; López, Zedillo, Soonyoo, González, & Cano, 2012). El análisis de la orientación de ladera se realizó a través del software QGis ©.

### **4.8.2. Análisis histórico para determinar cambios en la superficie de ocupación de humedal.**

Para la caracterizar comportamiento y tendencia de las áreas de humedal y su distribución en la cuenca se estableció series temporales coincidentes a los periodos del que se utilizaron en Cobertura y uso de suelo (1988, 2005 y 2017).

### **4.8.3. Servicios ecosistémicos (SE) de regulación hídrica de las áreas de humedal**

El rendimiento hídrico en cuencas con pendiente escarpada no sólo depende del clima y topografía, sino también de la cobertura vegetal, especialmente nativa que contribuye a la disminución de la pérdida de humedad del suelo, absorción de la radiación solar, captura el agua que ingresa al sistema y la libera lentamente (Cortés et al., 2014).

Una forma de analizar estos SE de forma temporal y espacial es a través de atributos funcionales de índices espectrales que son sensibles a cambios fenológicos y variaciones en los ecosistemas. La heterogeneidad espacial de la dinámica de carbono, dinámica del agua y protección de suelo son algunas de estas variaciones (Paruelo et al., 2016).

Para el presente trabajo se estimó y analizó los SE a partir de índices espectrales descritos a continuación:

#### **4.8.3.1. Índices espectrales**

El uso de imágenes satelitales e índices que derivan de ellas son métodos útiles y confiables para evaluar la hidrología de ciertos tipos de humedales y los efectos de las alteraciones en la hidrología de humedales y en algunos casos hacen que la delimitación de los humedales sea más efectiva, pero requieren de una validación de campo.

El análisis de la variabilidad de los distintos índices espectrales se hizo a partir de imágenes espectrales mensuales pertenecientes a las colecciones LANDSAT/LT05/C01/T1\_TOA, LANDSAT/LE07/C01/T1\_TOA,

LANDSAT/LC08/C01/T1\_TOA, filtradas a partir de la plataforma Google Earth Engine. Posteriormente se realizó una última valoración de la calidad de las imágenes para el consiguiente cálculo de descriptores estadísticos como promedio, desviación estándar para cada uno de los índices en cada uno de los años seleccionados. Para este procesamiento se utilizó en el software libre QGIS ©.

A continuación, se presenta los índices que se aplicaron para la CARSCH:

**a) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).**

El Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) propuesto por Rouse et al. (1974), permite caracterizar la fenología de la vegetación a nivel espacio temporal. Se basa en la combinación de la reflectancia que genera la actividad fotosintética al interactuar con ondas electromagnéticas en longitudes de onda del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC). El NDVI toma valores comprendidos entre 0 y 1. Valores cercanos a 0 significan que no existe vegetación y mientras se acerca a 1 existe mayor densidad de vegetación y actividad fotosintética.

Ecuación 44.

$$NDVI = (IRC - R) / (IRC + R)$$

IRC: reflectancia en el infrarrojo cercano

R: reflectancia en el rojo.

A partir de del NDVI mensual, se calcularon algunos atributos funcionales indicadores de la productividad y estacionalidad del índice de acuerdo a lo indicado por Paruelo (2008):

- NDVI-I (integral): corresponde al promedio anual del NDVI y es un indicador de la productividad total y biomasa;
- NDVIcv: correspondiente al coeficiente de variación temporal. El procedimiento para determinar el NDVIcv fue a través de la aplicación la medida estadística coeficiente de variación de Pearson. Su cálculo se realizó a partir de dividir la desviación estándar ( $\sigma$ ) de la serie de imágenes de NDVI mensual y el promedio anual (NDVI-I).

**b) Índice diferencial de agua normalizado (NDWI).**

Es un índice espectral que se utiliza como medida del contenido hídrico de la vegetación o el nivel de saturación que posee el suelo (CONAE, 2013) (Ecuación 45).

Ecuación 45.

$$NDWI = (IRC - IM) / (IRC + IM)$$

IRC: reflectancia en el infrarrojo cercano.

IM: reflectancia en el infrarrojo medio.

**c) Evapotranspiración**

A través del producto MOD16A2 versión 6, compuesto de 8 días de datos, con una resolución espacial de 500 metros, expresado en unidades de  $kg/m^2$  producto que se encuentra disponible a partir del año 2001. El algoritmo utilizado para la recopilación de

datos se basó en la ecuación de Penman-Monteith, que incluye entradas de datos de análisis meteorológico diarios, junto con datos derivados de teledetección, como las propiedades de la vegetación, y la cobertura del suelo

**d) IPSE (índice de provisión de servicios Ecosistémicos)**

IPSE es una forma de estimar y mapear SE relacionados con la dinámica de regulación de carbono y del agua a partir de datos de detección remota. Los atributos funcionales de NDVI utilizados para definir el IPSE fueron el NDVI-I (NDVI promedio anual) que es el indicador de la absorción de la energía lumínica absorbida por la cobertura vegetal, y el coeficiente de variación intra-anual del NDVI (NDVIcv) como descriptor de la variabilidad (Paruelo et al., 2016). Para su determinación se aplicó la ecuación 46.

Ecuación 46.

$$\text{IPSE} = \text{NDVI-I} * (1 - \text{NDVIcv})$$



## 5. RESULTADOS

### 5.1. CARACTERIZACIÓN LEGAL E INSTITUCIONAL VINCULADO AL USO Y GESTIÓN DEL AGUA Y HUMEDALES

Moretto, Gentili, Ortuño & Campo (2018) expresan que *“la Argentina, al presentar una organización de tipo federal se caracteriza por la ausencia de una legislación de agua nacional y una gran heterogeneidad en las legislaciones provinciales. Las competencias en materia hídrica están repartidas entre varias instituciones lo que da lugar a la superposición de funciones y al recelo por parte de las mismas. A nivel municipal, en Coronel Suárez y Tornquist existen ordenanzas en las que se proponen acciones para prevenir y mitigar inundaciones y anegamientos, constituyendo de forma indirecta normas que consideran al agua como peligro”*.

#### 5.1.1. Internacional

- Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, conocida como Ramsar que se desarrolló en 1971, de la cual la República Argentina es parte Contratante por la Ley N° 23.919. Esta convención tuvo como principal objetivo *la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales, regionales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo* (Benzaquén et al., 2017). Hasta el año 2011, la convención contó con 60 países miembros logrando proteger 1950 humedales que representan 190 millones de hectáreas.

#### 5.1.2. Nacional

- Constitución de la República Argentina (1994), capítulo segundo Nuevos Derechos y Garantías.

Artículo 41 indica que *“todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras, y tienen el deber de preservarlo. El daño ambiental generará prioritariamente la obligación de recomponer, según lo establezca la ley. Las autoridades proveerán a la protección de este derecho, a la utilización racional de los recursos naturales, a la preservación del patrimonio natural y cultural y de la diversidad biológica, y a la información y educación ambientales. Corresponde a la Nación dictar las normas que contengan los presupuestos mínimos de protección, y a las provincias, las necesarias para complementarlas, sin que aquellas alteren las jurisdicciones locales [...]”* (Ministerio de Justicia Y Derechos Humanos de la Presidencia de la Nación).

Artículo 124, establece que *“corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio”*, entre ellos el agua (Ministerio de Justicia Y Derechos Humano,2018).

- Ley General del Ambiente N° 25.675 (noviembre 2002)

Establece presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica e implementación del desarrollo sustentable, principios de la política ambiental, presupuesto mínimo, competencia judicial, instrumentos de política y gestión, ordenamiento ambiental, evaluación de impacto ambiental, educación e información, participación ciudadana,

seguro ambiental y fondo de restauración, sistema federal ambiental. ratificación de acuerdos federales, autogestión, daño ambiental, fondo de compensación ambiental (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina, 2017).

- Ley N° 23.919 (abril 1991) Ecología

Aprobación de la Convención Relativa a los Humedales de importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas que dependen ecológicamente de este tipo de ecosistemas. Establece como definición de humedales a “*extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros*” y sus enmiendas a los artículos 6 y 7 mediante la ley 25.335 (noviembre 2000) que establece los compromisos de los países parte de la convención RAMSAR de definir áreas de humedal y conservación de las mismas (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina, 2017).

- Ley N° 25.688 (28-nov-2002) Régimen de Gestión Ambiental de Aguas

Establece los presupuestos mínimos ambientales para la preservación de las aguas, su aprovechamiento y uso racional, definición e importancia de cuenca hídrica superficial, comités de cuencas hídricas, establecer las funciones de la autoridad nacional del agua (Secretaría de Infraestructura y política hídrica, 2017).

- Plan Nacional del Agua (junio – 2017)

El Plan Nacional del Agua apunta a reducir sustancialmente el porcentaje de la población en situación de pobreza, a garantizar el derecho al agua potable y al saneamiento, el desarrollo productivo sustentable, la conservación del agua en un estado compatible con la salud y el medio ambiente y mejorando la protección de la población contra las inundaciones. Se estableció como ejes: agua y saneamiento, adaptación a los extremos climáticos, aprovechamiento multipropósito, agua para la producción. Como ejes transversales: preservación de los recursos hídricos, fortalecimiento de capacidades, innovación, participación. El alcance de este plan tiene un carácter federal, por eso, este Plan debe darse en el marco de una mirada y una acción conjunta de la Nación y las provincias, que articule todo el trabajo de forma mancomunada. (Subsecretaría de Infraestructura y política hídrica, 2017).

### 5.1.3. Provincial

- **Constitución de la Provincia de Buenos Aires 1994.**

En la sección I Declaraciones, derechos y garantías, en su artículo 28 indica: *Los habitantes de la Provincia tienen el derecho a gozar de un ambiente sano y el deber de conservarlo y protegerlo en su provecho y en el de las generaciones futuras.*

*La Provincia ejerce el dominio eminente sobre el ambiente y los recursos naturales de su territorio incluyendo el subsuelo y el espacio aéreo correspondiente, el mar territorial y su lecho, la plataforma continental y los recursos naturales de la zona económica exclusiva, con el fin de asegurar una gestión ambientalmente adecuada.*

*En materia ecológica deberá preservar, recuperar y conservar los recursos naturales, renovables y no renovables del territorio de la Provincia; planificar el aprovechamiento racional de los mismos; controlar el impacto ambiental de todas las actividades que perjudiquen al ecosistema; promover acciones que eviten la contaminación del aire, agua y suelo; prohibir el ingreso en el territorio de residuos tóxicos o radiactivos; y garantizar el derecho a solicitar y recibir la adecuada información y a participar en la defensa del ambiente, de los recursos naturales y culturales.*

*Asimismo, asegurará políticas de conservación y recuperación de la calidad del agua, aire y suelo compatible con la exigencia de mantener su integridad física y su capacidad productiva, y el resguardo de áreas de importancia ecológica, de la flora y la fauna.*

*Toda persona física o jurídica cuya acción u omisión pueda degradar el ambiente está obligada a tomar todas las precauciones para evitarlo (Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, 2018).*

- Ley N° 12.257 Código de Aguas (últimas modificaciones en mayo 2013)

Establece el régimen de protección, conservación y manejo del recurso hídrico de la Provincia de Buenos Aires. Además, se refiere a la creación de una Autoridad del Agua (ADA), que tendrá a su cargo la planificación, el registro, la constitución y la protección de los derechos, la policía y el cumplimiento y ejecución de las demás misiones que este Código y las Leyes que lo modifiquen, sustituyan o reemplacen. (Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, 2018).

- Ley N° 11. 723. Ley Integral del Medio Ambiente y los Recursos Naturales

Tiene por objeto la protección, conservación, mejoramiento y restauración de los recursos naturales y del ambiente en general en el ámbito de la Provincia de Buenos Aires, a fin de preservar la vida en su sentido más amplio; asegurando a las generaciones presentes y futuras la conservación de la calidad ambiental y la diversidad biológica (Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, 2018).

- Ley N° 10.907: Reservas, Monumentos y Parques Naturales en la Provincia de Buenos Aires.

Establece lineamientos para que áreas sean declaradas "Paisaje Protegido de Interés Provincial" o "Espacio Verde de Interés Provincial", y proponer medidas para protegerlas y conservarlas. Se considera espacios de acceso público, tendiendo al bienestar común, con el fin de elevar la calidad de vida de la población y la protección del medio. El cumplimiento de esta ley es reglamentado por el Decreto 218/94 (Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, 2018).

- Resolución N° 565 (julio de 2011)

Emitido por ADA (Autoridad del Agua), y un alcance a la resolución 968/10 del año 2010, el objetivo es implementar un programa de uso racional y ordenamiento del recurso hídricos de la **Cuenca del Río Sauce Chico**, destinado al exclusivo uso agrario. En base un estudio de prefactibilidad de sistematización y aprovechamiento de la Cuenca del Río Sauce Chico, contratado con el Consejo Federal de Inversiones, a solicitud de esta Autoridad del Agua, en el cual se concluye que "...el recurso hídrico superficial es insuficiente temporalmente para

la superficie actualmente regada y se encuentra agravado por su anárquica forma de manejo...”, que “...al no existir una obra de retención o almacenamiento y un sistema de distribución unificado, como podría ser una red de canales integrados por sus respectivas compuertas, resulta prácticamente imposible planificar un régimen de entrega de agua ordenado y equitativo, en función de la superficie explotada por cada regante...” y que “...Debería considerarse la explotación del recurso hídrico subterráneo en los sectores donde los suelos de la cuenca superior se encuentren favorecidos por una buena calidad de las aguas...”. Que las temporadas de riego se encuentran comprendidas entre los meses de septiembre y marzo (Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, 2018).

## 5.2. CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA

El análisis de cada uno de los parámetros morfométricos se describe a continuación.

### 5.2.1. Parámetros de forma.

La CARSCH tiene un área de 365,61 km<sup>2</sup>, 149,79 km de perímetro. Presenta una forma triangular alargada con dos vértices en la cabecera. Considerando los parámetros de forma que se muestran en la tabla 4. El IF, Re y Rc de 0,35; 0,67 y 0,20 al ser menor a 1, la cuenca corresponde a una forma alargada y menos alargada. Características que son asociadas a su alto relieve y superficie escarpada. También se determinó el Ia e IH de 1,36 y 0,48 correspondientes a una cuenca alargada de forma no muy regular. El valor de Kc de 2,21 indica que la cuenca tiene un contorno de forma rectangular-oblonga. Debido a su forma presenta bajas probabilidades de provocar crecidas. Considerando que esta afirmación es relativa ya que depende principalmente de las características de la tormenta.

Tabla 4. Parámetros de forma.

Parámetro	Unidades	CARSCH
Área (A)	km <sup>2</sup>	365,61
Perímetro (P)	km	149,79
Longitud axial (La)	km	32,35
Ancho máximo (a)	km	23,71
Ancho promedio (Ap)	km	11,30
Factor de forma (IF)		0,35
Diámetro (D)	km	21,58
Relación de elongación (Re)		0,67
Relación de circularidad (Rc)		0,20
Índice de homogeneidad (IH)		0,48
Índice de alargamiento (Ia)		1,36
Coefficiente de compacidad de Gravellius (Kc)		2,21

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2. Parámetros de relieve.

La variabilidad en la altitud da lugar a un paisaje con pendientes que expresan un relieve muy plano a muy escarpado. De acuerdo con el porcentaje de ocupación del suelo las lomadas

ocupan el 38,13% del área, seguido por pendientes muy fuertes con 20,79% y 17,60 % pendiente suave. Las pendientes escarpadas apenas ocupan el 8,46% del área total como se observa en la Figura 19. Los parámetros Rh y Rr mostrados en la Tabla 5 relacionan las características de relieve con la intensidad de los procesos de erosión en las laderas de la cuenca. En el caso de la CARSCH los valores de Rr y Rh son de 5,73 m/km y 26,52 m/km respectivamente. Estos valores expresan un riesgo moderado a fuerte en la activación de procesos de erosión con transporte de sedimentos a través del flujo principal (Khurana, Rawat, Raina, Sharma, & P, 2019; Mandale & Bansod, 2019).

Tabla 5. Parámetros de relieve.

Parámetro	Unidades	CARSCH
Elevación máxima (Hmax)	msnm	1 112
Elevación mínima (Hmin)	msnm	254
Desnivel (H)	msnm	858
Pendiente media (PM)	%	16,60
Relieve relativo (Rr)		5,73
Relación relieve (Rh)		26,52
Coefficiente de rugosidad (Ra)		0,97

Fuente: Elaboración propia.

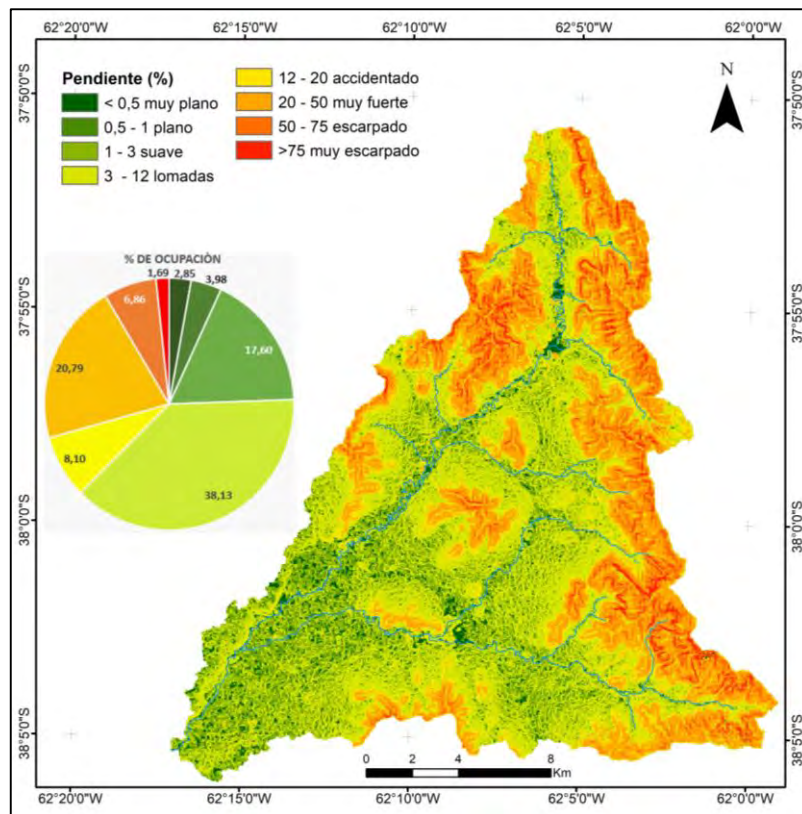
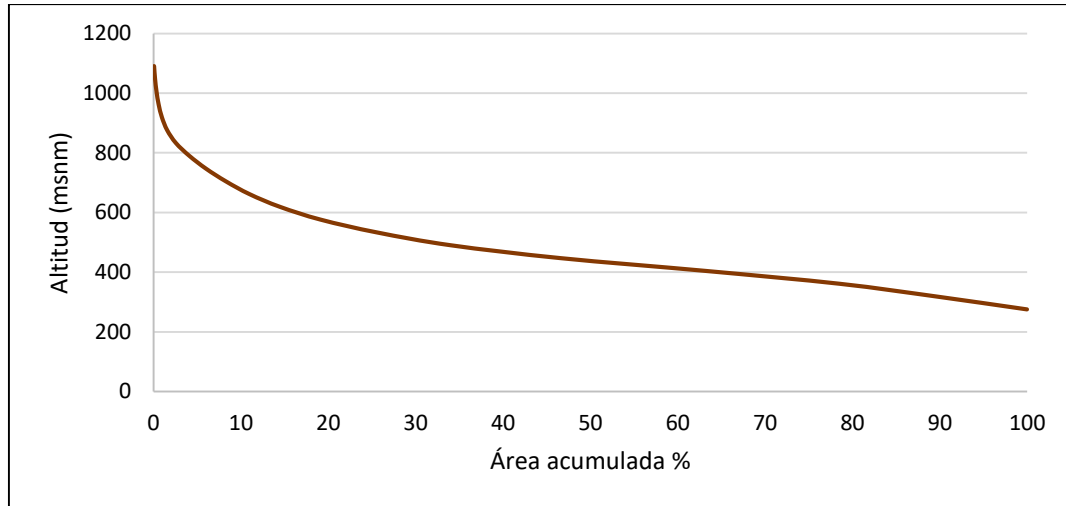


Figura 19. Distribución de la pendiente en la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

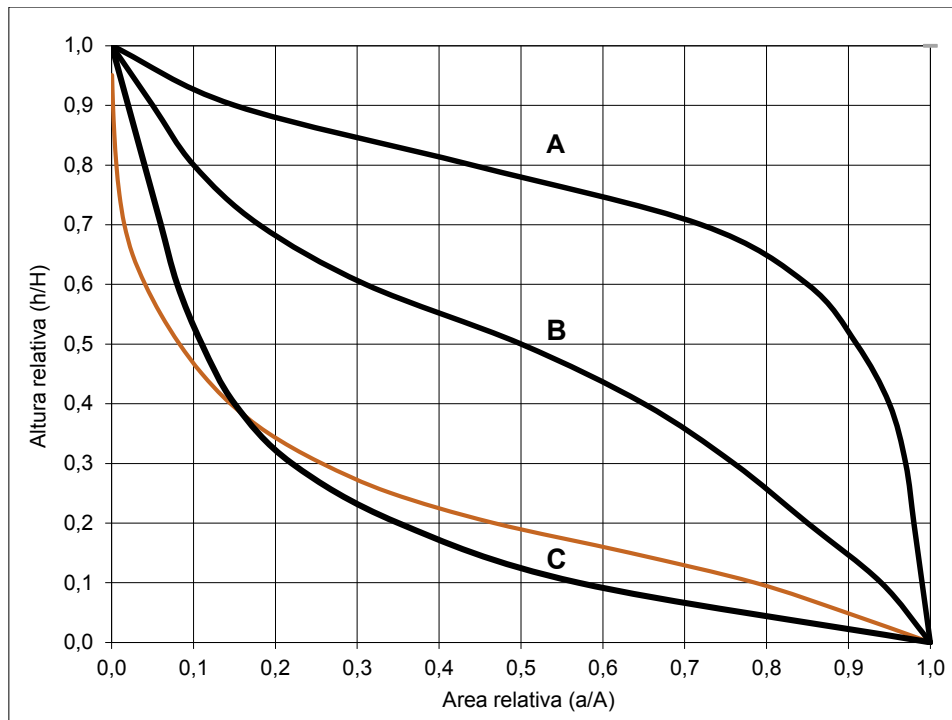
En referencia a la curva hipsométrica representada en la Gráfica 1, se muestra que 50% del área acumulada de la cuenca presenta elevaciones por debajo de 450 msnm. La elevación máxima es de 1.112 msnm y la mínima de 254 msnm, que conducen a un desnivel de 858 msnm como se muestra en la Tabla 5.



Gráfica 1. Curva hipsométrica de la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la Gráfica 2 muestra la curva hipsométrica adimensional de la CARSCH en comparación con las tres curvas hipsométricas de referencia propuestas por Strahler. De esta gráfica se deduce que el equilibrio dinámico de la CARSCH es típico de una cuenca en fase de vejez (Gaspari et al., 2013), cuyos procesos erosivos siguen activos, comenzando proceso de sedimentación.



Gráfica 2. Curva hipsométrica adimensional de la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3. Parámetros de drenaje

En base a los parámetros mostrados en la Tabla 6, la CARSCH presenta un patrón de drenaje dendrítico de orden 5. De acuerdo con la clasificación de Smith (1950) y Stralher (1957) (Vich, 1999) la textura de drenaje (T) se considera moderada en concordancia a una gruesa densidad de drenaje (Dd) y Fs. Estas condiciones son frecuentes en áreas de terrenos permeables y baja intensidad de lluvia (Farfán, Urbina, Ferreira, & Brandan, 2010).

La cuenca de estudio presenta 630 cauces siendo más numerosos los de orden 1 y 2, indicando un comportamiento torrencioso en épocas de lluvia, con arrastre de materiales, respondiendo a la definición de torrentes de Mármol (2008) que los caracteriza como un cauce natural que permanece seco durante casi todo un año o varios años y al experimentar una creciente como respuesta a una lluvia, lo hace en forma violenta, con gran aporte de materiales sólidos, para volver a secarse poco tiempo después.

Tabla 6. Parámetros de drenaje.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>CARSCH</b>
Longitud total red de drenaje (Lu)	km	412,02
Densidad de drenaje (Dd)	km/km <sup>2</sup>	1,13
Longitud del cauce principal (L)	km	52,68
Altura máxima del cauce (HCmax)	msnm	800
Altura mínima del cauce (HCmin)	msnm	254
Pendiente media del cauce (J)	%	1,0%
Máximo orden de cauce		5
Número total de cauces (Nu)		630
Frecuencia de cauce (Fs)		1,72
Textura de drenaje (T)		1,94

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7, muestra los parámetros que describen la configuración de la red hídrica de la CARSCH. El número (Nu) y longitud (Ln) de los cauces disminuyen al incrementarse el número de orden de flujo, siendo máximo en el primer y segundo orden (Figura 20). Los órdenes con mayor número y longitud de cauces son propios de áreas con alto relieve o modernamente empinados y litología variable, mientras que longitudes de arroyos más largas indican un gradiente de pendiente más plana. Esto último se observa en el comportamiento inverso que presenta el parámetro Lsm.

Según Campo, Aldur y Fernández (2011) cuando Rl es mayor a 3 infiere una concentración progresiva de caudales a lo largo del cauce principal, mientras que valores inferiores implican mayor energía en el transporte del agua al cauce principal (torrencialidad). En el caso de la cuenca en estudio se observa que casi todos los órdenes presentan características de flujo con potencial a grandes avenidas, contrario a la dinámica de los cauces de orden 3.

La relación de bifurcación Rb, valores menores a 3 son comunes en áreas donde la estructura geológica no ejerce una influencia dominante sobre el patrón de drenaje, pero a medida que Rb se incrementa el control estructural sobre el drenaje es mayor (Campo et al., 2011; Waikar & Nilawar, 2014). En la cuenca de estudio los cauces correspondientes al orden 3 tienen una influencia muy marcada de la estructura geológica y relieve sobre el drenaje, no así en los demás órdenes. En general la cuenca tiene un Rb promedio de 3,44 que implica un control estructural medio.



Tabla 7. Parámetros de drenaje por orden de cauce.

Orden de cauce \ Parámetro	1	2	3	4	5
Cantidad de cauces por orden (Nu)	347	197	75	9	2
longitud total por orden (Ln) km	174,43	85,94	67,37	63,12	20,87
Longitud promedio del cauce (Lsm)	0,50	0,44	0,90	7,01	10,44
Relación de longitud de flujo (Rl)	0,87	2,06	7,81	1,49	0,00
Relación de bifurcación (Rb)	1,76	2,63	8,33	4,50	0,00
Relación promedio de bifurcación (Rbm)	3,44				

Fuente: Elaboración propia.

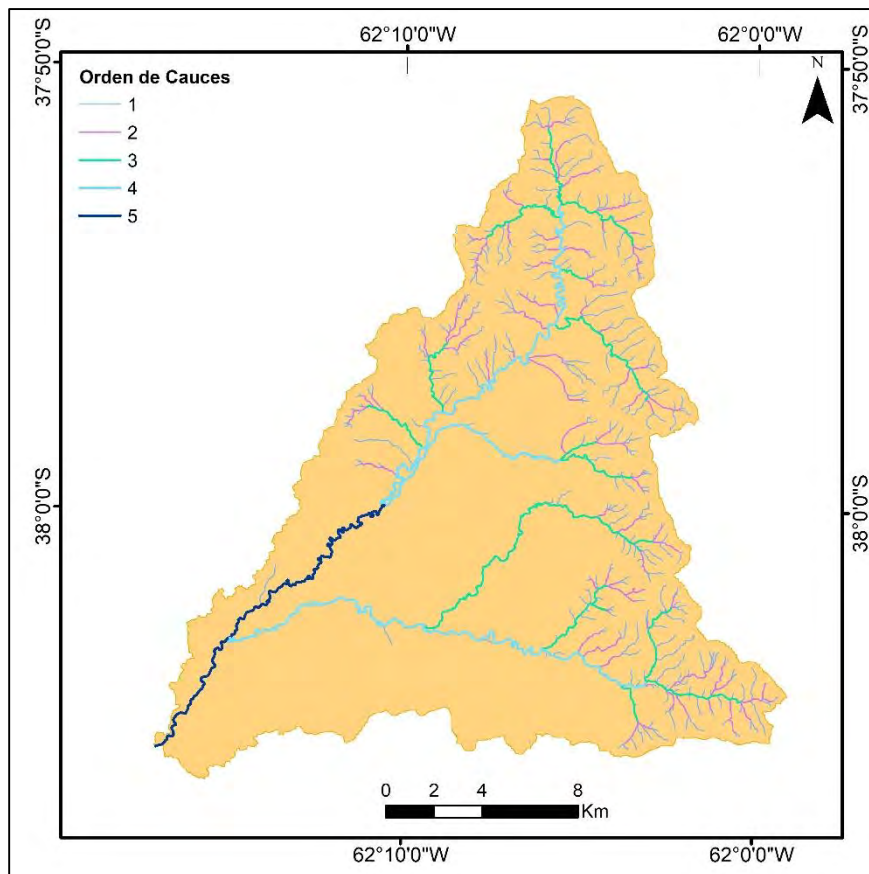


Figura 20. Orden de cauces de la CARSCH.

El tiempo de concentración ( $T_c$ ) de la CARSCH es de 7,97 horas que resulta de promediar los resultados de la aplicación de los modelos mencionados en 4.2.3., mostrados en la Tabla 8, e integra la caracterización morfométrica, porque se ve afectado por la forma, relieve y drenaje de la cuenca. El tiempo de retardo ( $T_{r-1}$ ) es de 4,78 horas.

Tabla 8. Tiempo de concentración.

<b>Tiempo de concentración (hrs)</b>	<b>CARSCH</b>
Bransby (1922)	7,05
California Culvert Practice (1960)	8,16
Clark (1945)	10,97
Giandotti, Arbeláez et al.(1997)	8,32
Kirpich (1940)	8,15
Método racional generalizado (1987)	7,69
Pilgrim y McDermonntt (1982)	7,16
Témez (1991)	6,06
Valencia y Zuluaga (1981)	8,15
Snyder (1938)	8,00
Promedio	7,97

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

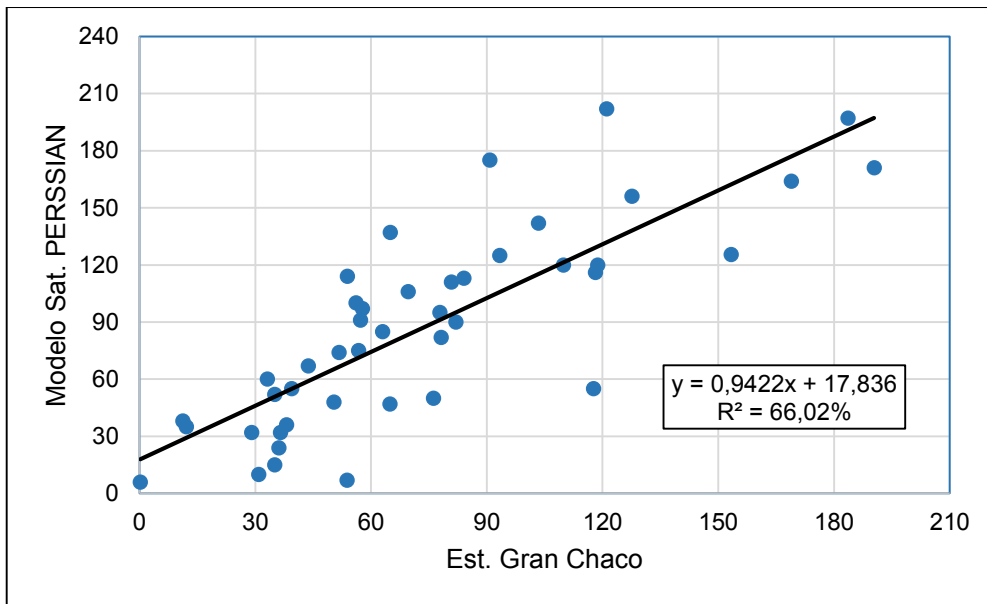
#### 5.3.1. Precipitación y temperatura

El análisis cualitativo del comportamiento anual y mensual de la precipitación y temperatura en la CARSCH, se presenta a continuación:

- **Completitud de la serie mensual de precipitación y temperatura para el periodo 1988-2017.**

En el caso de las mediciones de precipitación únicamente existen datos faltantes en la estación meteorológica Gran Chaco, en lo correspondiente al periodo 1992-2017.

Para ello, se realizó un análisis estadístico mediante una correlación lineal entre los datos observados disponibles y los satelitales (Gráfica 3), mostrando un estadístico  $R^2$  de 66,02 %; el coeficiente de correlación es igual a 0,81, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. Esta alta relación permite establecer que los datos faltantes pueden ser expresado con la ecuación de la Gráfica 3 y con datos mensuales acumulados de lluvias obtenidas de la base de datos “NOAA/CFSV2/FOR6H.

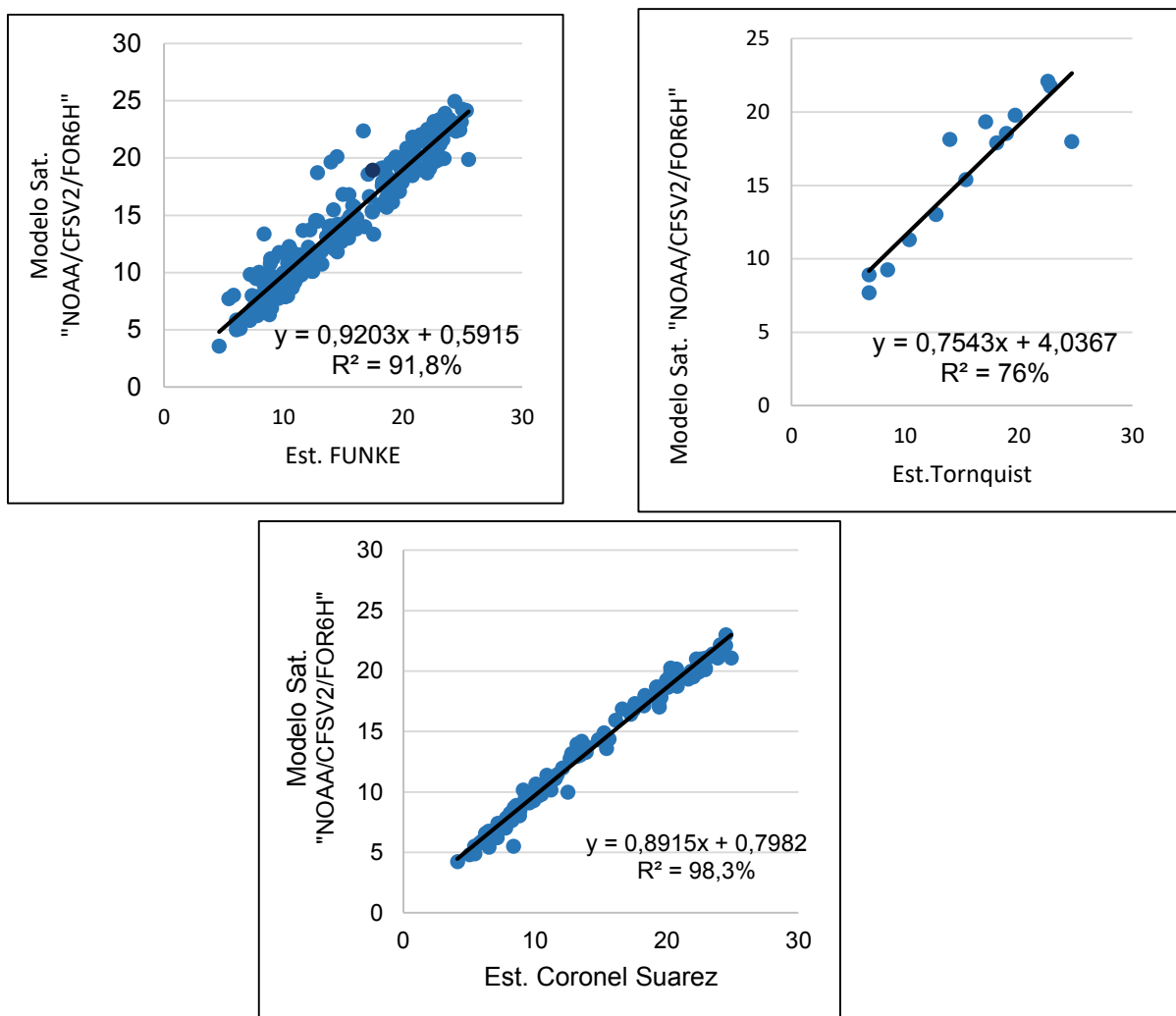


Gráfica 3. Modelo de regresión lineal entre datos observados y satelitales de precipitación (1989-1992) de la estación Gran Chaco.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los valores de temperatura son mucho más limitados ya que únicamente las estaciones meteorológicas de Pigüe y Bordenave cuentan con registros completos de temperatura máxima, mínima y promedio. En FUNKE no se conocen datos para los años 2003,2004 y 2008 a 2014. La estación Tornquist muestra datos esporádicos entre el año 2011 y 2016; Coronel Suarez faltan mediciones a partir del año 1998 y la estación Gran Chaco que no existe ningún dato disponible referente a temperatura ambiente.

El análisis estadístico mediante el ajuste a un modelo lineal entre los datos observados disponibles y los satelitales (Gráfica 4), la estación Funke presenta un estadístico  $R^2$  de 91,8% y un coeficiente de correlación igual a 0,96; en Tornquist se presentó un  $R^2$  de 76% y un coeficiente de correlación 0,92; finalmente la estación de Coronel Suarez presenta un  $R^2$  de 98,3% y un coeficiente de correlación igual a 0,99 indicando una relación fuerte entre las variables.



Gráfica 4. Modelo de regresión lineal entre datos observados y satelitales de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

- **Análisis de la variabilidad climática**

En el suroeste bonaerense existe una amplia variabilidad climática siendo más notoria en el comportamiento de la precipitación que en la temperatura. De forma general esta zona se caracteriza por que las condiciones de aridez se incrementan de Norte a Sur (Torrero, 2009). Sin embargo como se observa en la Figura 21, la presencia del sistema serrano de Ventania incide en las condiciones climáticas de la zona en estudio, que se caracteriza por presentar un clima templado y subhúmedo seco (Gaspari, 2007). De acuerdo a la distribución de las isoyetas, las estaciones meteorológicas que están cerca de las sierras como son Gran Chaco, Funke, Pigüe, y Tornquist registran un valor medio anual de precipitación entre 762 a 875 mm, siendo mayor en la primera, que está ubicada dentro del sistema serrano. Los valores pluviométricos registrados por las estaciones Bordenave y Coronel Suarez bordean entre 752 a 757 mm y se encuentran más alejadas de las sierras. La temperatura no presenta mayor variación con máximos entre los 31-32 °C, mínimos entre -2 a 2 °C, con excepción de la estación Bordenave

que en enero de 1989 presentó un valor máximo de 41°C y en julio de 2007 una mínima de -12°C.

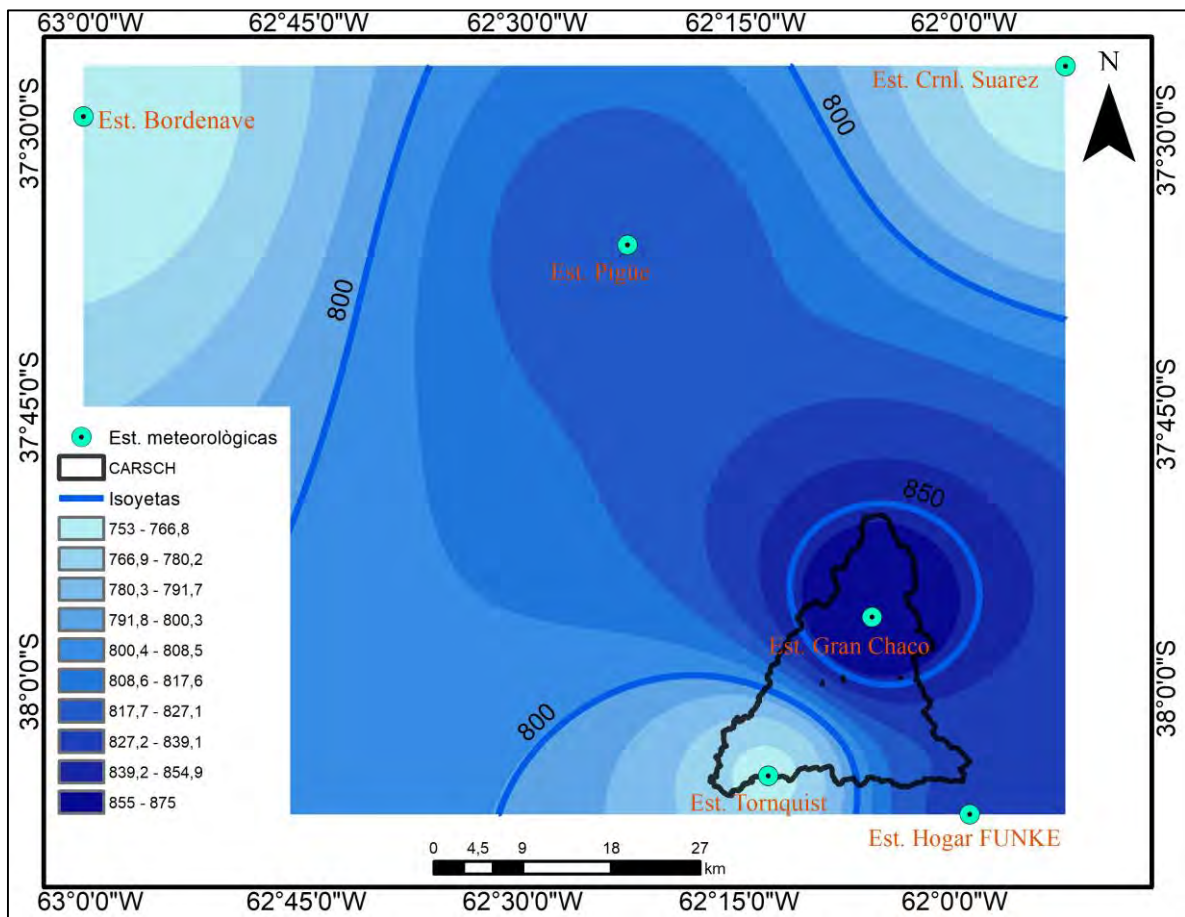
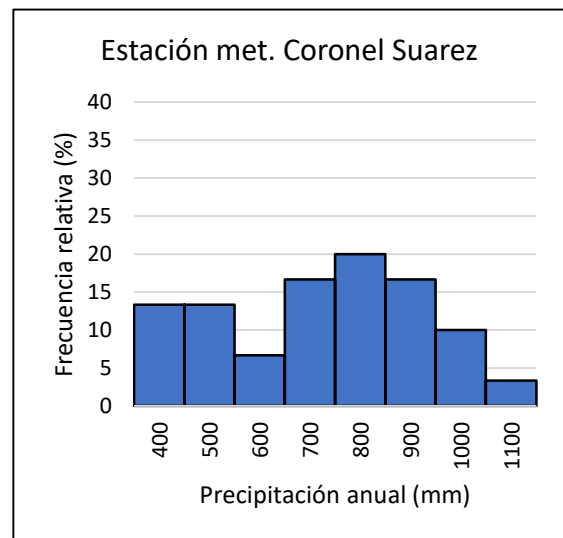
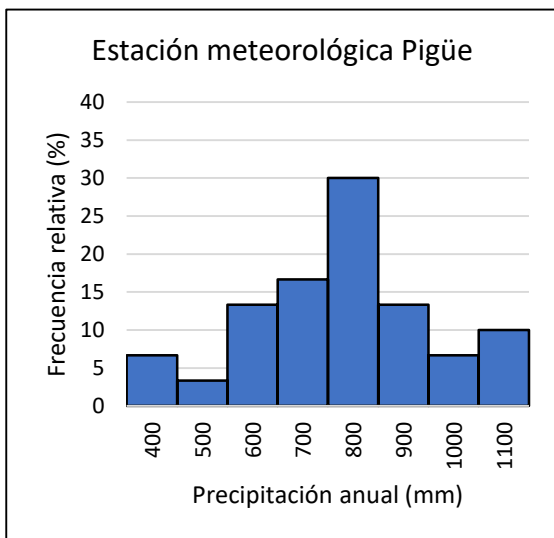
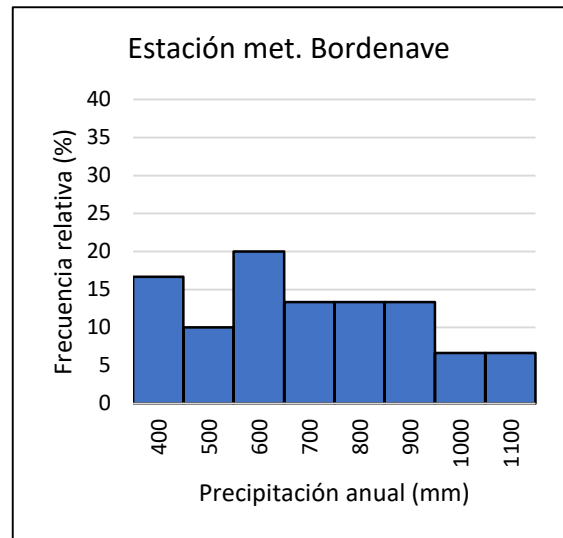
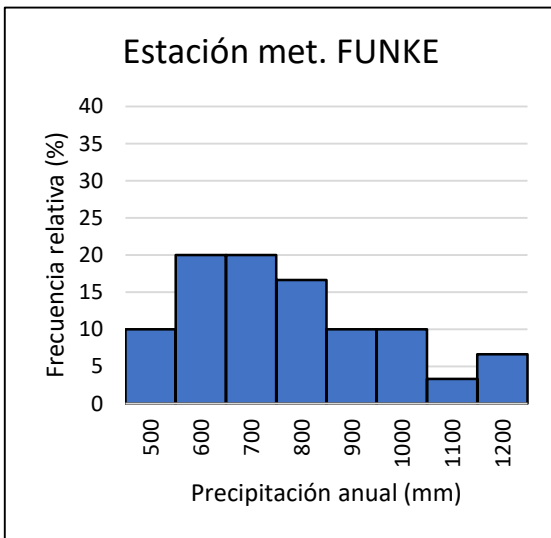
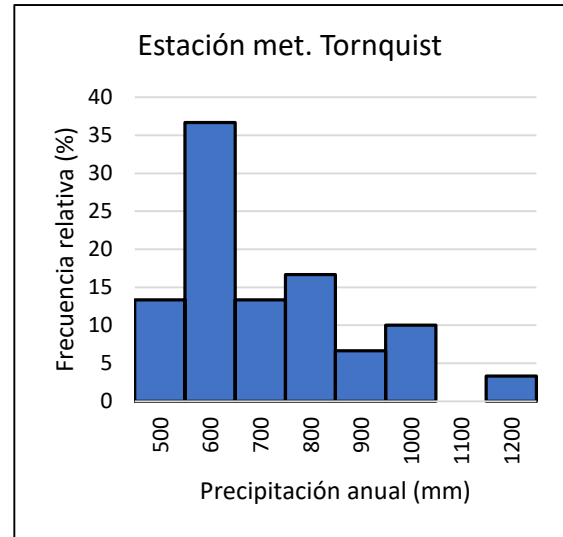
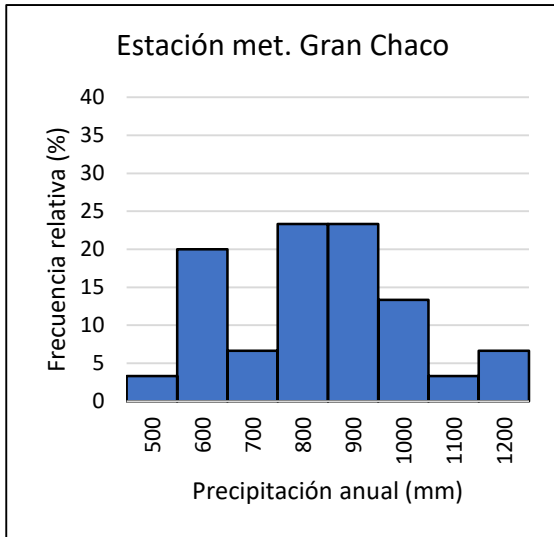


Figura 21: Isoyetas media anual. Periodo 1988 – 2017.

Fuente: Elaboración propia.

Los histogramas de frecuencia de precipitación para el periodo 1988 – 2017 (Gráfica 5), muestran que la precipitación anual más frecuente está en el rango de 600 mm para las estaciones cercanas a las sierras, con excepción de Pigüe y Gran Chaco que, además, tienen mayor recurrencia de años con 800 y 900 mm. Al contrario que las estaciones Bordenave y Coronel Suarez que no muestran dominancia de rango de precipitación en específico.

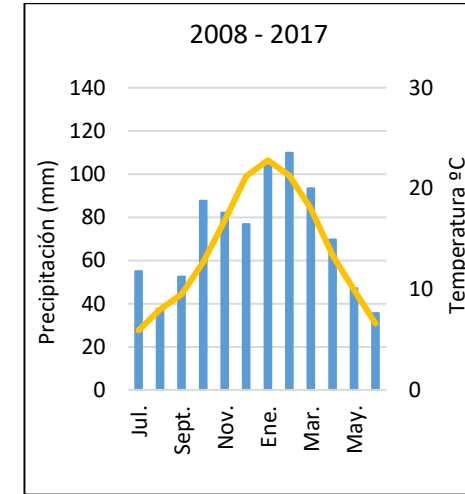
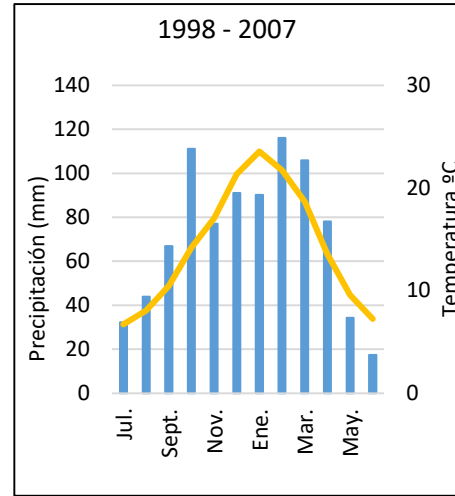
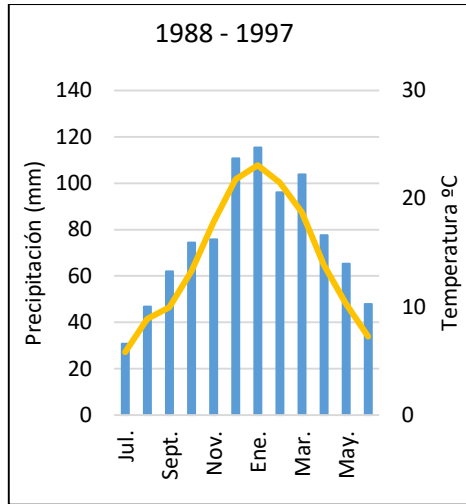


Gráfica 5. Histograma de frecuencia. Periodo 1988 – 2017.  
Fuente: Elaboración propia.

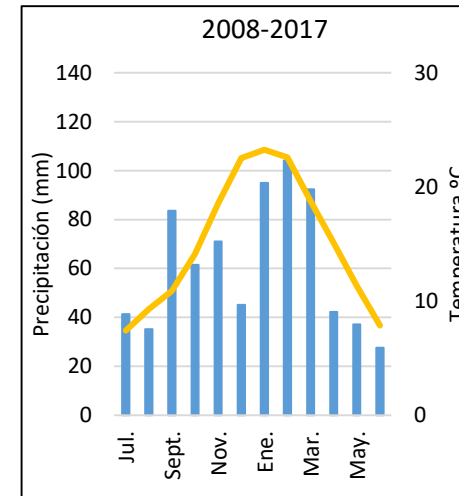
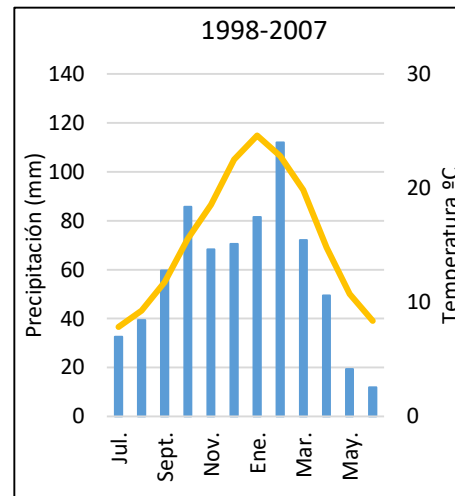
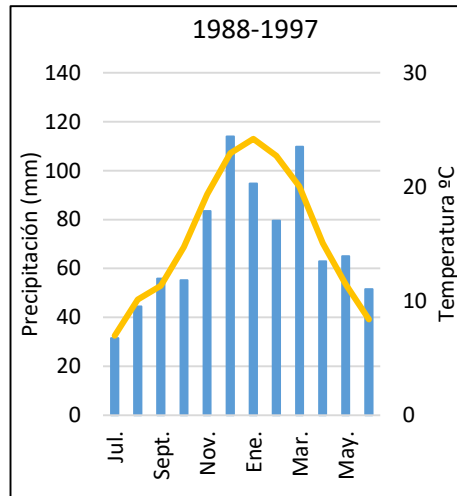
Los diagramas ombrométricos de la Gráfica 6, muestran una comparación por década de la variación de la precipitación y temperatura en cada una de las estaciones. La forma de distribución de la precipitación en el año es de tipo bimodal distinguiéndose dos periodos considerados húmedos de enero a marzo y octubre a diciembre, y otro considerado seco a mitad del año de abril a septiembre.

Las estaciones meteorológicas que se localizan en las cercanías del sistema serrano como Pigüe, Gran Chaco, FUNKE y Tornquist presentan un comportamiento muy variable en la forma en que se distribuyen en el tiempo las precipitaciones, con una notable disminución en las dos últimas décadas con presencia de periodos de aridez principalmente en el mes de mayo. En Tornquist en la década de 1998 a 2007 es más frecuente la presencia de meses muy secos.

Las estaciones meteorológicas de Bordenave y Coronel Suarez muestran un comportamiento muy diferente. Bordenave presenta mayor recurrencia de escenarios de aridez en la primera década de análisis y en la última década existe variación en la temperatura acompañado de una disminución en la precipitación. En Coronel Suarez la década de 1997 a 2007 es la más seca con periodos de aridez, mientras que la última década de análisis se presenta de mayor humedad.



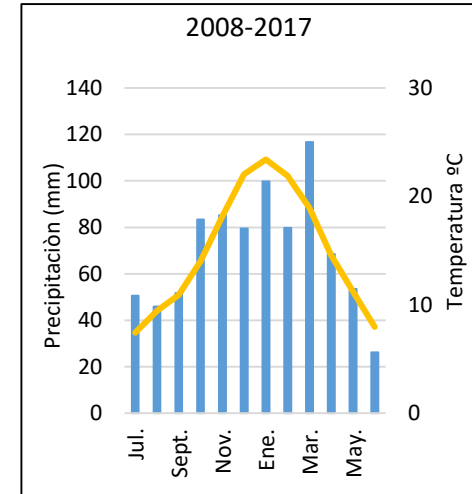
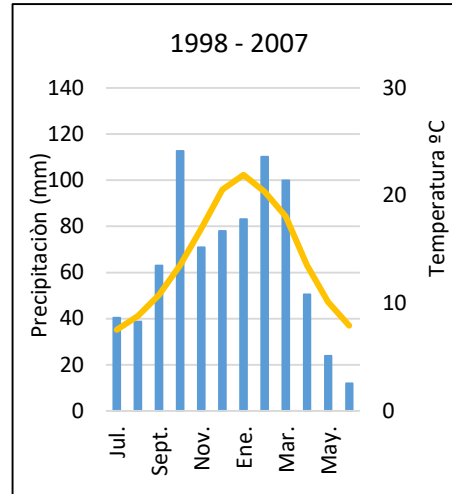
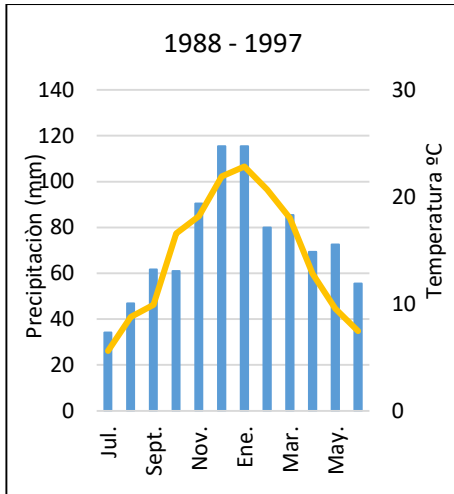
Estación meteorológica Gran Chaco.



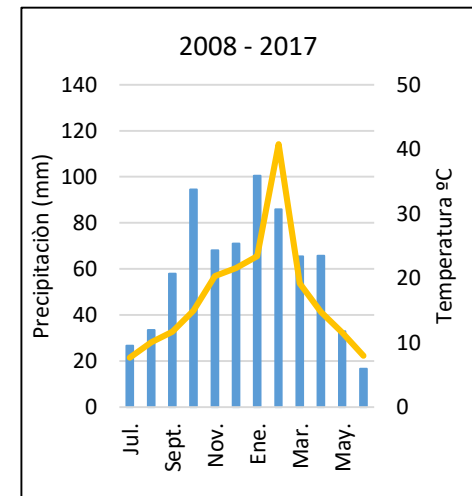
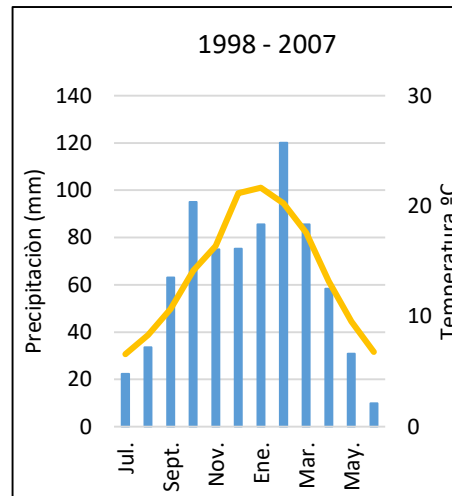
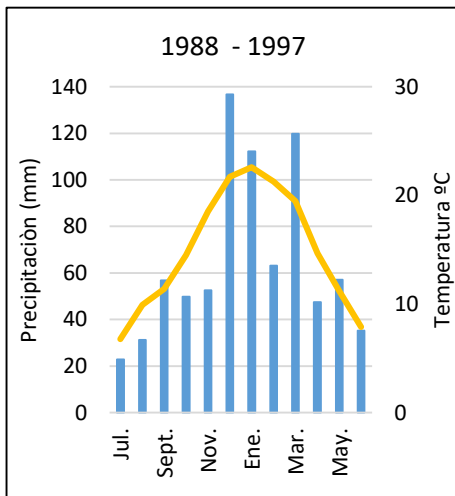
Estación meteorológica Tornquist.

Gráfica 6. Diagramas ombrométricos, con barras azules: precipitación media mensual; línea amarilla: temperatura media mensual.



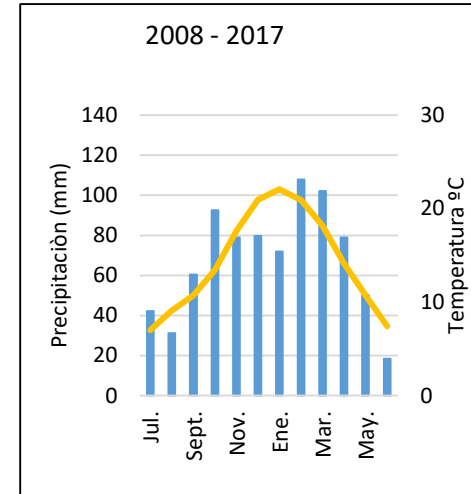
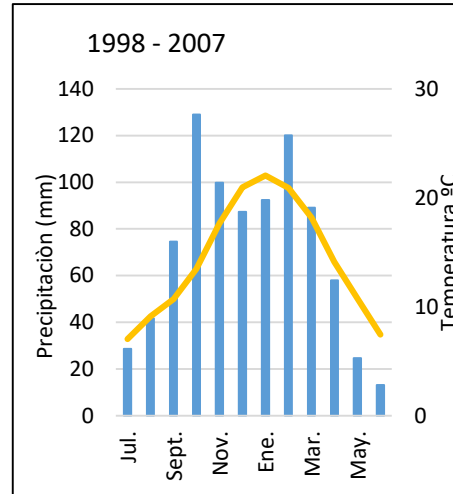
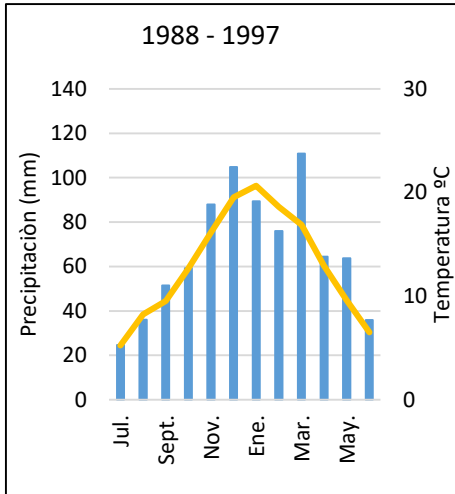


Estación meteorológica FUNKE.

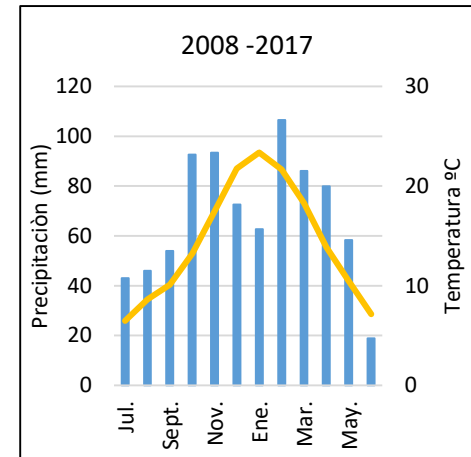
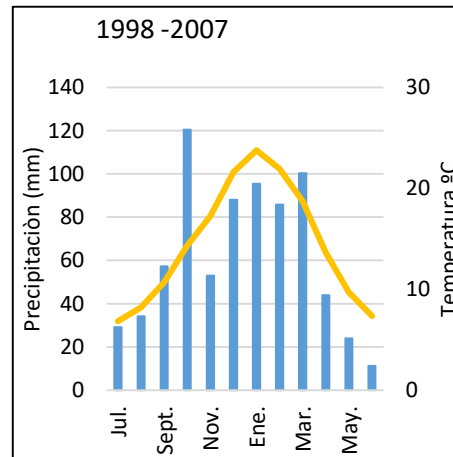
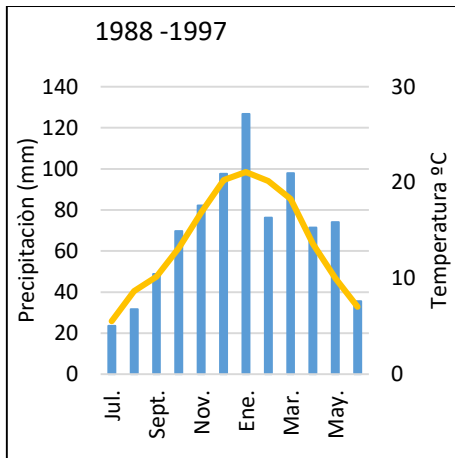


Estación meteorológica Bordenave.

Gráfica 6. Continuación: Diagramas ombrométricos, con barras azules: precipitación media mensual; línea amarilla: temperatura media mensual.



Estación meteorológica Pigüe.



Estación meteorológica Coronel Suarez

Gráfica 6. Continuación: Diagramas ombrométricos, con barras azules: precipitación media mensual; línea amarilla: temperatura media mensual.

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los valores de precipitación promedio estacional se observa que tanto en semestre húmedo y seco las estaciones que se ubican entre las sierras como ser Gran Chaco y FUNKE presentan mayor precipitación, a diferencia del resto que se encuentran en zonas más planas (Tabla 9), y mientras más alejadas se encuentran de las sierras el periodo seco se muestra más marcado como sucede en Tornquist y Bordenave:

Tabla 9: Precipitación promedio estacional (mm). Periodo 1988 – 2017

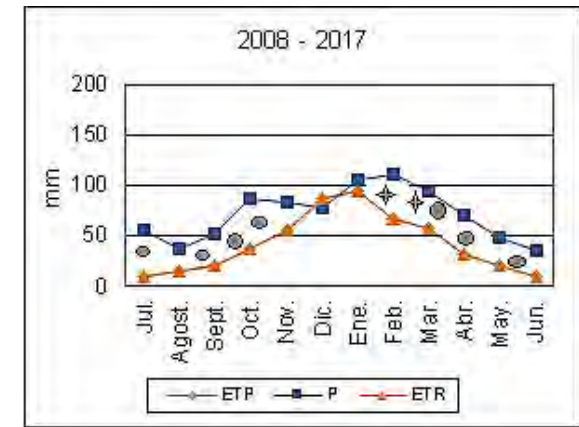
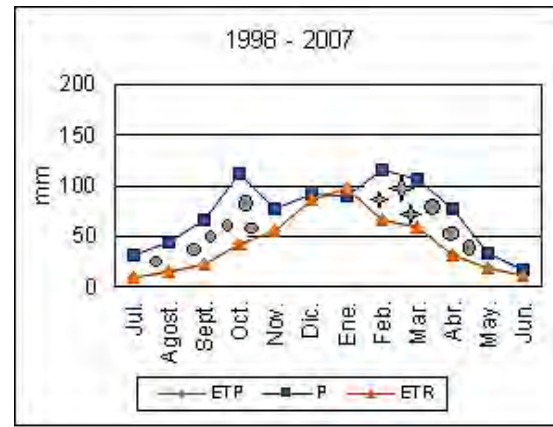
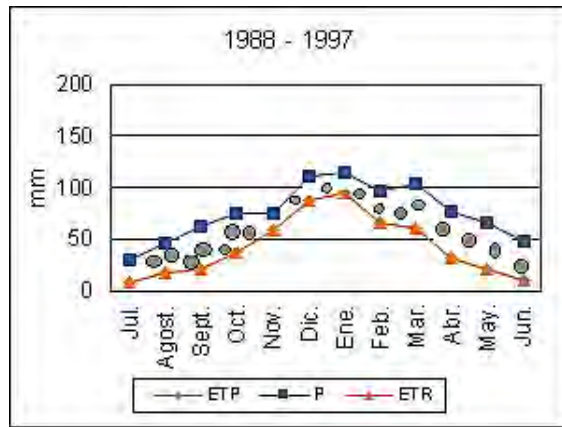
<b>Estación meteorológica</b>	<b>Semestre húmedo Octubre a Marzo.</b>	<b>Semestre seco Abril a Septiembre.</b>
Gran Chaco	574,55	300,32
Tornquist	498,83	263,60
FUNKE	546,78	283,52
Bordenave	518,81	234,10
Pigüe	559,79	266,11
Cornel. Suarez	533,22	256,98
<b>Promedio</b>	<b>538,66</b>	<b>267,44</b>

Fuente: Elaboración propia.

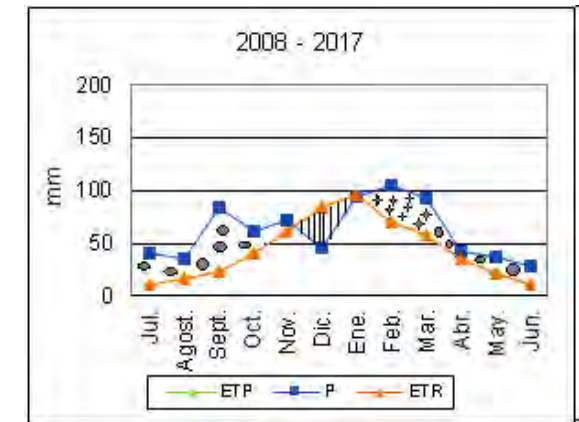
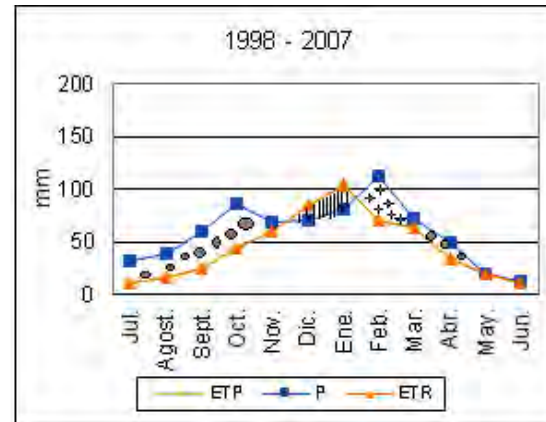
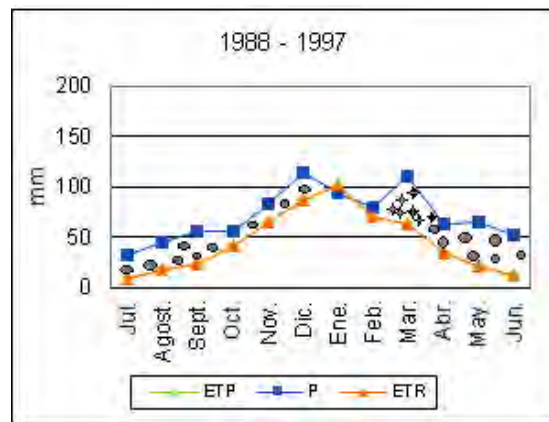
### 5.3.2. Balance hidrológico mensual

Para el análisis temporal del balance hidrológico se utilizó la metodología propuesta. Se puede observar los resultados en la Gráfica 7. De forma general los resultados muestran que la ETP y ETR son iguales, salvo el caso de los meses de enero a marzo del periodo 2008-2017 en la estación Bordenave que muestra un ligero incremento de la ETP (Figura 21).

Como se interpretó en el análisis de la variabilidad climática (punto 5.3.1) concuerda con las figuras generadas de balance hidrológico, ya que las estaciones meteorológicas cercanas a las sierras, en la primera década de análisis, muestran escenarios de agua excedente considerando que  $PP_j - ETP \geq 0$  y las décadas siguientes, especialmente en los meses de diciembre, enero y junio, existe un aumento en la evaporación. Las estaciones Bordenave y Coronel Suarez en diciembre y enero de la década comprendida entre 1998 y 2007 existe consumo de las reservas de agua útil.

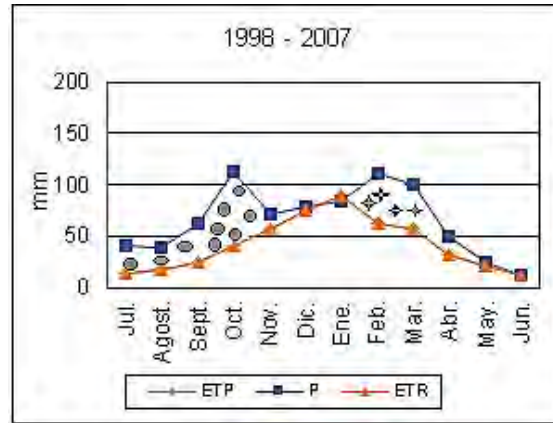
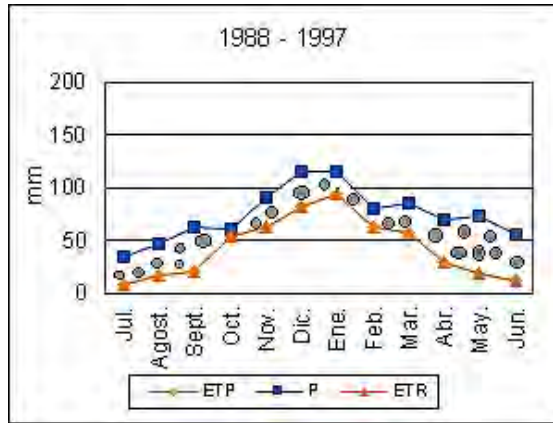


Estación meteorológica Gran Chaco; —◆— Evapotranspiración potencial, —■— Precipitación, —▲— Evapotranspiración real, ●● Excedente de agua  
 |||| Consumo de la reserva útil, ++ Recarga de la reserva.

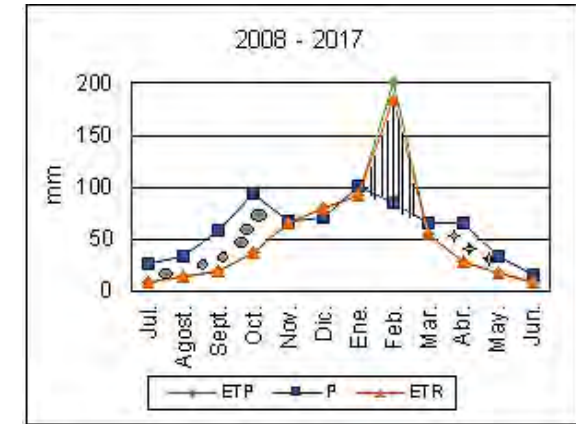
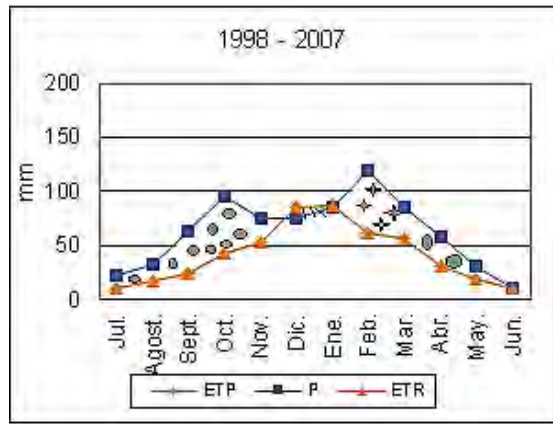
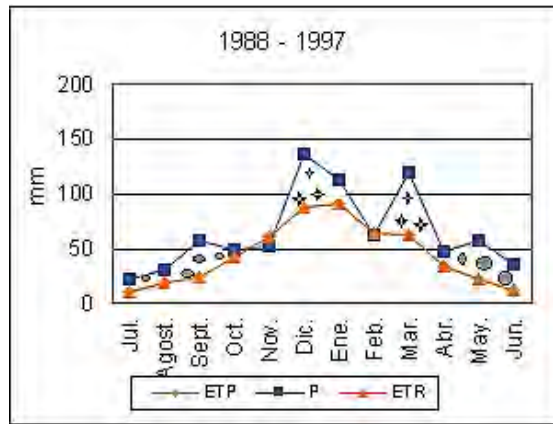


Estación meteorológica Tornquist; —◆— Evapotranspiración potencial, —■— Precipitación, —▲— Evapotranspiración real, ●● Excedente de agua  
 |||| Consumo de la reserva útil, ++ Recarga de la reserva.

Gráfica 7. Balance hidrológico.

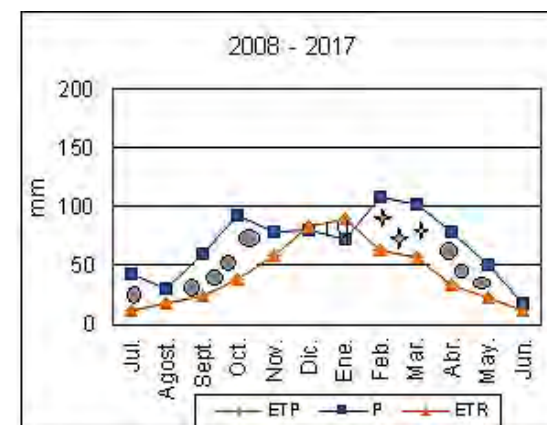
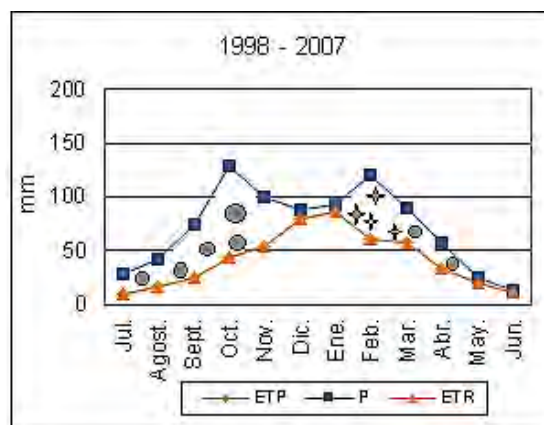
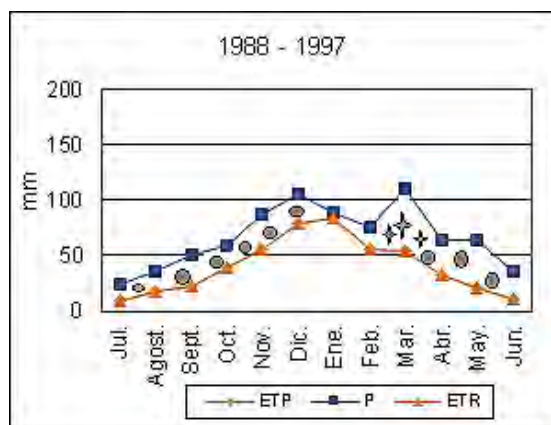


Estación meteorológica FUNKE; —●— Evapotranspiración potencial, —■— Precipitación, —▲— Evapotranspiración real, ●● Excedente de agua  
 Consumo de la reserva útil, ++ Recarga de la reserva.

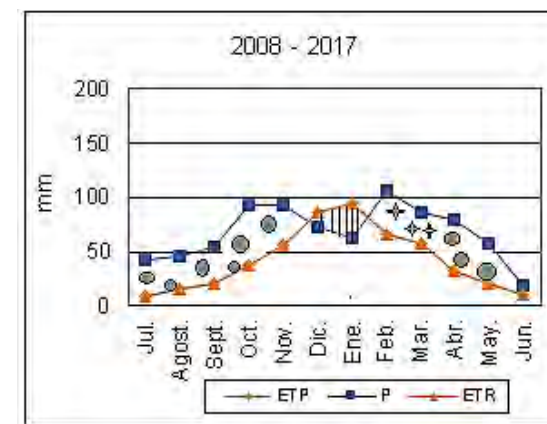
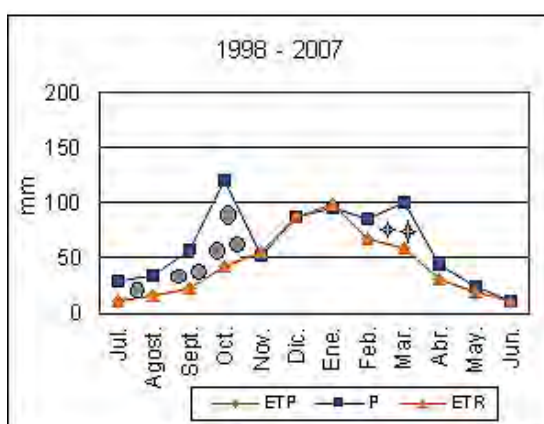
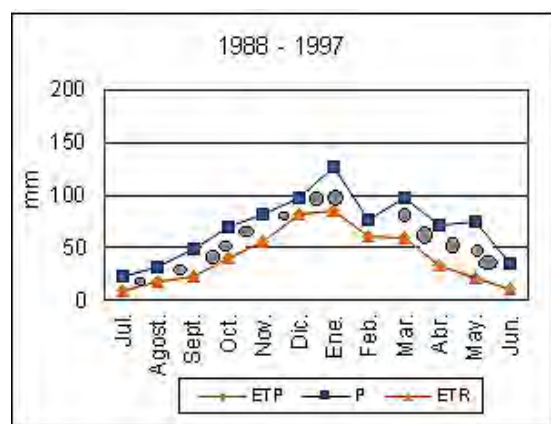


Estación meteorológica Bordenave; —●— Evapotranspiración potencial, —■— Precipitación, —▲— Evapotranspiración real, ●● Excedente de agua  
 Consumo de la reserva útil, ++ Recarga de la reserva.

Gráfica 7. Balance hidrológico.



Estación meteorológica Pigüe; —●— Evapotranspiración potencial, —■— Precipitación, —▲— Evapotranspiración real, ● Excedente de agua |||| Consumo de la reserva útil, ++ Recarga de la reserva.



Estación meteorológica Coronel Suarez; —●— Evapotranspiración potencial, —■— Precipitación, —▲— Evapotranspiración real, ● Excedente de agua |||| Consumo de la reserva útil, ++ Recarga de la reserva.

Gráfica 7. Continuación: Balance hidrológico.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.4. SUELOS

En la Figura 22 se observa la distribución espacial de los distintos complejos de suelo presentes en la CARSCH. Al tratarse de una zona de recarga, el paisaje formado por las sierras presenta roca expuesta con pedregosidad superficial en los faldeos. La roca (R) está cubierta por una delgada capa de loess. Los suelos adyacentes al sistema serrano tienen tosca a distintas profundidades que van desde los 35 a 90 cm de profundidad. Muchos de los materiales que coexisten en los distintos suelos son de materiales aluviales, loessico o eólico.

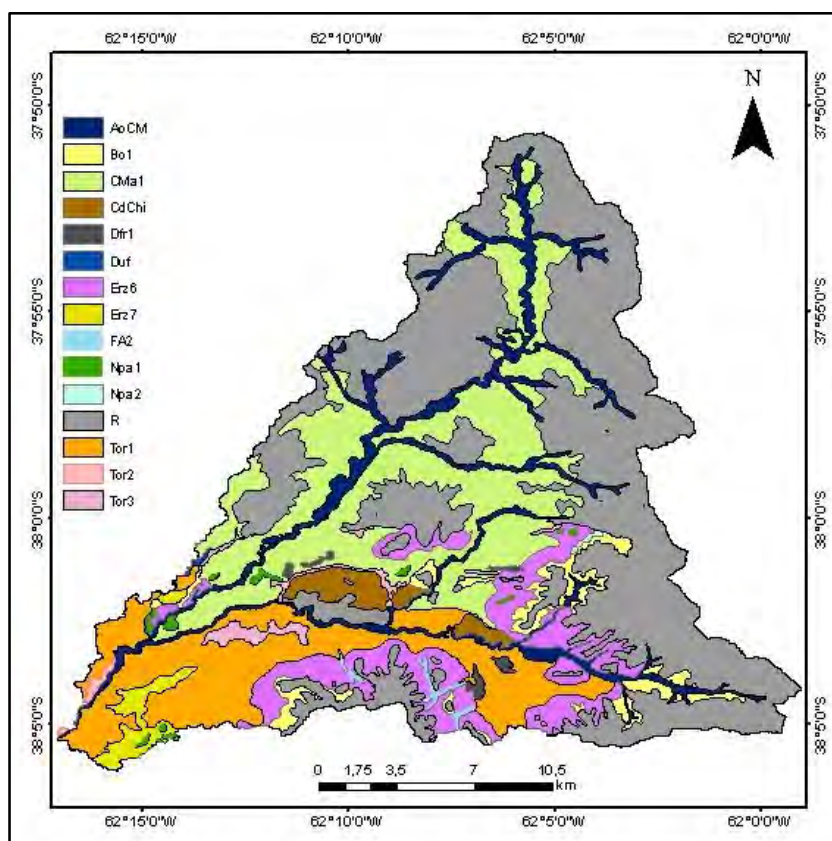


Figura 22. Mapa edafológico

Fuente: INTA (2019).

La Tabla 10 muestra las características físicas de los distintos complejos y las series de suelos de las cuales están conformados, con escala de 1:50.000, a partir de información disponible en la carta de suelos del INTA (<http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm>).

Tabla 10. Caracterización de los complejos de suelos de la CARSCH.

Complejo de suelos	Serie	% de composición	Textura	% de partículas			Materia orgánica	Permeabilidad
				Arcilla	Limo	Arena		
AoCM	Grupo no diferenciado del arroyo Cura Malal grande, suelos hidromórficos 100%							
Bo1	Bonete	50						
	Estación Rivera	40	franco arenoso	15,8	25,27	13,68	1,52	moderada a moderadamente rápida
	Estancia Los Manantiales	10	franco arcilloso	29,9	31,3	31,8	5,2	moderada
CMa1	Cura Malal	70	Franco	24,4	38,7	31,1	3,7	moderada
	Estancia Los Manantiales	20	franco arcilloso	29,9	31,3	31,8	5,2	moderada
	Estancia Ojo de Agua	10						
CdChi	Cerro del Chimango	60	arenoso	11,6	22	18,9	2,22	moderada
	Estancia Ojo de Agua	30						
	Alta Vista	10	franco arcillo arenoso	24,7	25,1	19,5	2,1	moderada
Dfr1	Dufaur	50	franco arenoso	18,3	24,2	38,7	1,7	moderada
	Erize	30	franco	16,6	45,7	16,6	2,7	moderada
	Alta Vista	20	franco arcillo arenoso	24,7	25,1	19,5	2,1	moderada
Duf	Dufaur	80	franco arenoso	18,3	24,2	38,7	1,7	moderada
	Estancia Ojo de Agua	10						
	Saavedra	10						
Erz6 o TP1	Erize	40	franco	16,6	45,7	16,6	2,7	moderada
	Tornquist	30						
	Cerro del Chimango	20	arenoso	11,6	22	18,9	2,22	moderada
	Napostá	20						
Erz7 O TP2	Erize	30	franco	16,6	45,7	16,6	2,7	moderada
	Bonete	30						
	Cerro del Chimango	20						
	Napostá	20						
FA2	Grupo no diferenciado de suelos hidromórficos Estancia Fuerte Argentino (100%)							
Npa1 o SGr1	Napostá	70						
	Bonete	30						
Npa2 o SGr2	Napostá	80						
	Bonete	20						



Tabla 10. Continuación: Caracterización de los complejos de suelos de la CARSCH.

Complejo de suelos	Serie	% de composición	Textura	% de partículas			Materia orgánica	Permeabilidad
				Arcilla	Limo	Arena		
R	Misceláneas: Afloramiento rocoso							
Tor1	Tornquist	30						
	Cerro del Chimango	30	arenoso	11,6	22	18,9	2,22	moderada
	Erize	20						
	Alta Vista	20	franco arcillo arenoso	24,7	25,1	19,5	2,1	moderada
Tor2	Tornquist	50						
	Chasicó	30						
	Erize	10	franco	16,6	45,7	16,6	2,7	moderada
	Cerro del Chimango	10	arenoso	11,6	22	18,9	2,22	moderada
Tor3	Tornquist	40						
	Erize	30	franco	16,6	45,7	16,6	2,7	moderada
	Cerro del Chimango	30	arenoso	11,6	22	18,9	2,22	moderada

Fuente: INTA (2018)

En Tabla 11 se observa la superficie de ocupación de cada uno de los complejos de suelo presentes en la CARSCH. Sobresaliendo los complejos roca (R) y CMa, que representa el 41,7% y el 21,32% respectivamente, de la superficie total del área de estudio. En base a los descrito en el ítem 4.4. la capacidad agrícola productiva de los suelos se encuentra entre media y baja, siendo las principales limitaciones de tipo Sc y Ws que refieren a suelos de escasa profundidad, limitación climática y tendencia a la anegabilidad.

Tabla 11. Superficie de ocupación y características de los complejos de suelos de la CARSH.

Complejo de suelos	Superficie km <sup>2</sup>	Capacidad de uso	Subclase	Capacidad Productiva	Grupo Hidrológico
AoCM	28,43	VII	Ws	5,0 (no agrícola)	C
Bo1	10,28	IV	Sc	38	C
CMa1	77,94	III	Ec	53,4	B
CdChi	6,54	IV	Sc	20	A
Dfr1	1,57	IV	Sc	34,4	A
Duf	0,27	IV	Sc	38,1	A
Erz6	29,61	IV	Sc	48	B
Erz7	5,35	IV	Sc	43	B
FA2	0,99	III	Ws	15	C
Npa1	1,63	IV	Sc	20	B
Npa2	0,27	IV	Sc	38	C
R	152,41	VIII			D
Tor1	45,59	III	Sc	52	C
Tor2	0,60	III	Sc	60	C
Tor3	4,12	III	Sc	55	C

Fuente: Adaptado de GeoINTA, Valdés A., 2017

## 5.5. COBERTURA Y USO DE SUELO

### 5.5.1. Caracterización de la cobertura y uso del suelo

En base a los descrito en los ítems 3.9. Uso de suelo y 4.5. Cobertura y uso de suelo, se elaboró los mapas de cobertura y uso de suelo en los cuales se identificó las siguientes clases:

- **Semi urbano.** Cerca de las márgenes del arroyo Ventana se localizan las urbanizaciones Villa Serrana la Gruta y Villa San Andrés de las Sierras que se muestran en la Figura 23 y Fotografía 8. Su aparición y posterior desarrollo es a partir del año 1998.



Figura 23. Vista aérea de Villa Serrana La Gruta.

Fuente: Villa Serrana, 2003.



Fotografía 8. Villa Serrana la Gruta.

Fuente: Elaboración propia.

- **Pastizal natural con roca.** Como se describe en el ítem 3.7. este tipo de cobertura se refiere a los ambientes de roquedal y serrano que presentan afloramiento rocoso, cubiertos por loess con escasa vegetación natural (Fotografía 7), que se caracteriza por tener poca biomasa aérea pero abundante biomasa subterránea. Esta clase se corresponde con pendientes de muy fuerte a muy escarpada de la Figura 21.



Fotografía 9. Clase pastizal natural con roca

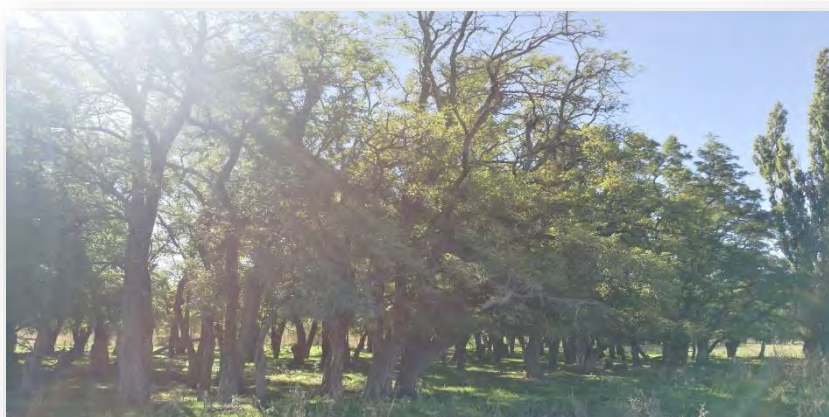
Fuente: Elaboración propia.

- **Forestación.** A pesar de no existir sistemas forestales con fines productivos, se encuentran repartidos por toda el área de estudio en pequeños manchones como se describe en el ítem 5.5. que son usados principalmente montes de abrigo, ornamentales, protectores, cortinas sobre todo en zonas de ganadería y en las márgenes de los arroyos existe una presencia importante especialmente de especies exóticas como se muestra en las Fotografías 10 y 11.



Fotografía 10. Forestaciones ubicadas en las márgenes del arroyo Sauce Chico.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 11. Forestación utilizada como monte de abrigo para ganadería

Fuente: Elaboración propia.

- **Agropecuario.** La CARSCH se caracteriza por tener como principales actividades económicas la agricultura de secano y ganadería como se muestra en la fotografía 10. La ganadería se desarrolla en los ambientes peri serranos y valles longitudinales, mientras que la agricultura se desarrolla en los valles transversales cerca de los arroyos tributarios del Sauce Chico con pendientes de muy plano a suave, aunque en varios lugares se observa un avance hacia zonas de lomada y valles longitudinales como se observa en las Fotografías 12 y 13.



Fotografía 12. En el fondo se observa ganado vacuno y delante cultivos de maíz.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 13. Distintos sistemas agrícolas con cultivos principalmente de avena y maíz.

Fuente: Elaboración propia.

- **Pastizal serrano.** Dentro de esta clasificación se considera zonas de pastizal y pajonal serrano descritas en el punto 3.7. que actualmente ocupan ambientes peri serranos y valles como se muestra en las Fotografías 14 y 15. Estos ambientes abarcan una diversidad de especies vegetales principalmente gramíneas y leguminosas con abundante biomasa aérea como se describe en el ítem 3.7 y se muestra en la fotografía 13. Entre el espesor de la vegetación que conforma estos ambientes se abren paso las nacientes de los cursos de agua que conforman el río Sauce Chico.



Fotografía 14. Ambientes peri serrana y valle ocupado por pajonal y pastizal serrano.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 15. Diversidad de especies presentes en el pastizal serrano.

Fuente: Elaboración propia.

- **Ribera.** Sobre los cursos de agua desde sus nacientes se observa una vegetación más higrófila (áreas de abundante agua), localizada en zonas de torrente como se muestra en la Fotografía 16.



Fotografía 16. Vegetación higrófila en ribera y cursos del río Sauce Chico.

Fuente: Elaboración propia.

#### **5.5.2. Análisis del cambio de uso / cobertura de suelo**

La CARSCH es una cuenca con un alto grado de antropización, como se menciona en el ítem 3.9. Las figuras 24, 25 y 26 muestran de forma resumida los principales usos de suelo identificados y el cambio que han experimentado en los últimos 30 años. La cobertura que actualmente predomina es de tipo agropecuario con un crecimiento del 8% al comparar los años 1989 y 2017.

Esta intensificación del uso agropecuario se ha extendido principalmente sobre zonas de pastizal natural y ribera, provocando la reducción del 9 % en el primer caso y un 0,3 % en el segundo. Además, estas coberturas soportan la presión de asentamientos semi urbanos que se desarrollan cerca de las márgenes del arroyo Ventana. Otra grave amenaza hacia los relictos de pastizal y pajonal serrano son los constantes incendios forestales en las sierras.

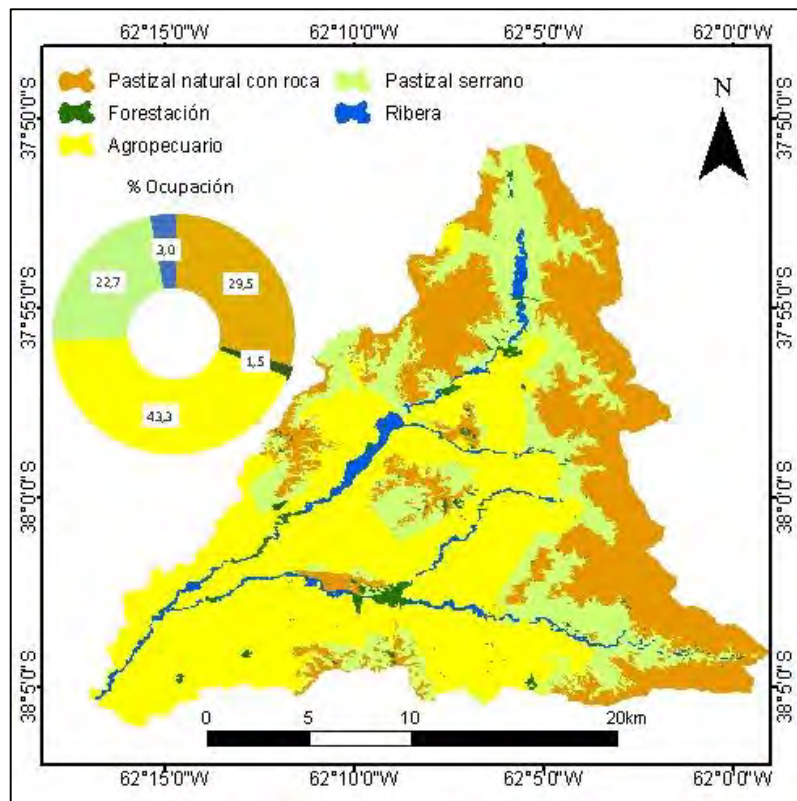


Figura 24. Mapa de uso/cobertura de suelos del año 1989.  
Fuente: Elaboración propia.

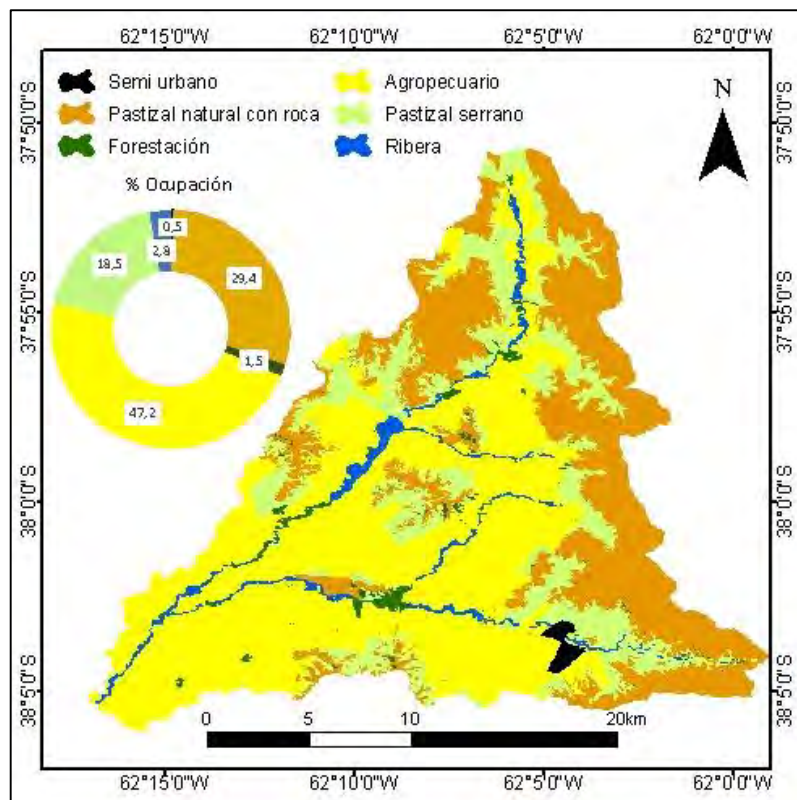


Figura 25. Mapa de uso/cobertura de suelos del año 2005.  
Fuente: Elaboración propia.



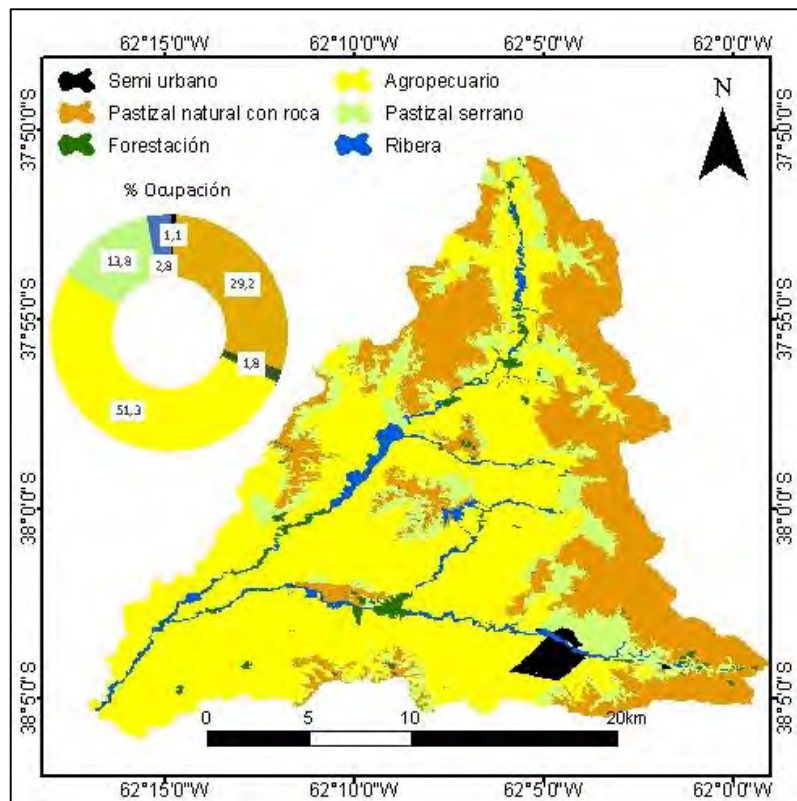


Figura 26. Mapa de uso/cobertura de suelos del año 2017.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.6. ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

El grupo hidrológico predominante en la CARSCH es de tipo D correspondiente a las zonas de elevadas pendientes con presencia de afloramientos rocosos, catalogado en el Atlas de suelos como roca. Los grupos hidrológicos B y C constituyen el 55 % del área de estudio se ubican en zonas de menor pendiente adyacente a las zonas de roca. Únicamente el 2,3 % del área de estudio se corresponde con el grupo hidrológico A, localizado en el centro de la cuenca (Figura 27).

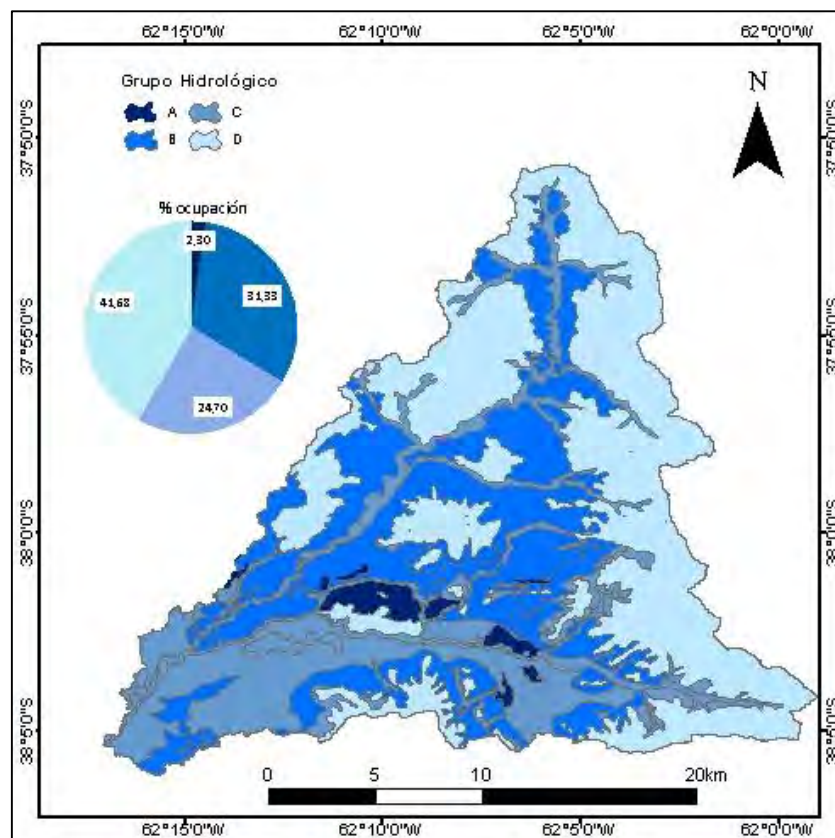


Figura 27. Grupos hidrológicos en la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

A través de la zonificación de los diferentes complejos suelo – vegetación para los años 1989, 2005 y 2017; se obtuvo los valores de NC para la CARSCH. En promedio la cuenca presenta un valor de 78,6 para el año de 1989; 79,7 para el 2005 y 80,3 en el año 2017.

Las Figuras 28, 29 y 30 muestran las distintas variaciones en tiempo y espacio durante el periodo de estudio. En los tres mapas se observa el cambio paulatino que se produce principalmente en zonas peri serranas, ocupadas inicialmente por vegetación natural, que luego son transformadas en zonas agrícolas. La Figura 30 que corresponde al año 2017 muestra la situación actual de la cuenca, en la que el 96,6 % de superficie de la cuenca presenta altos valores de NC es decir entre 61-91, debido a la expansión e intensificación agrícola.

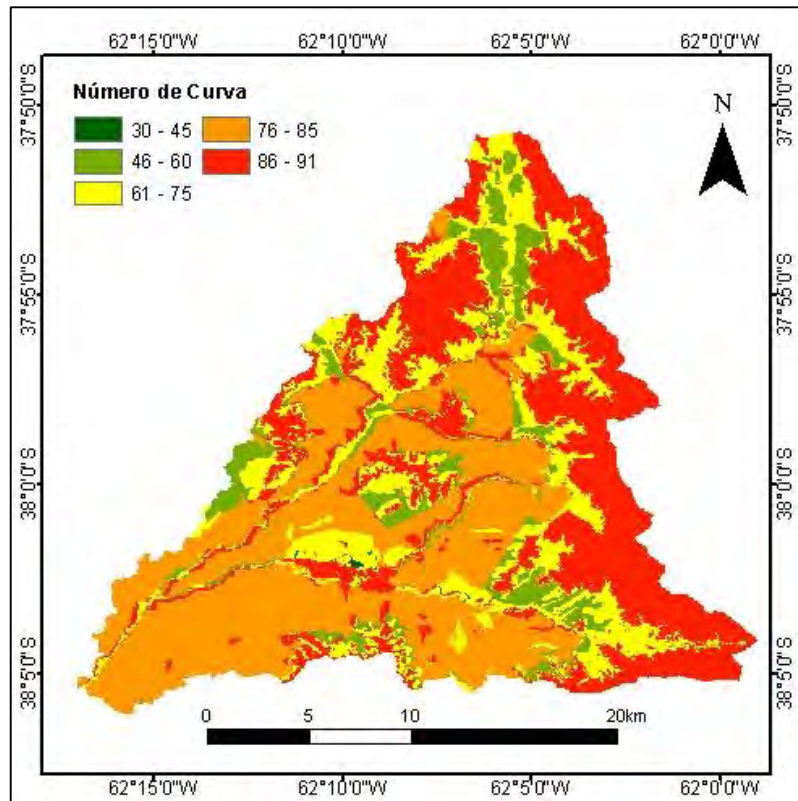


Figura 28. Zonificación del número de curva en la CARSCH para el año 1989.

Fuente: Elaboración propia.

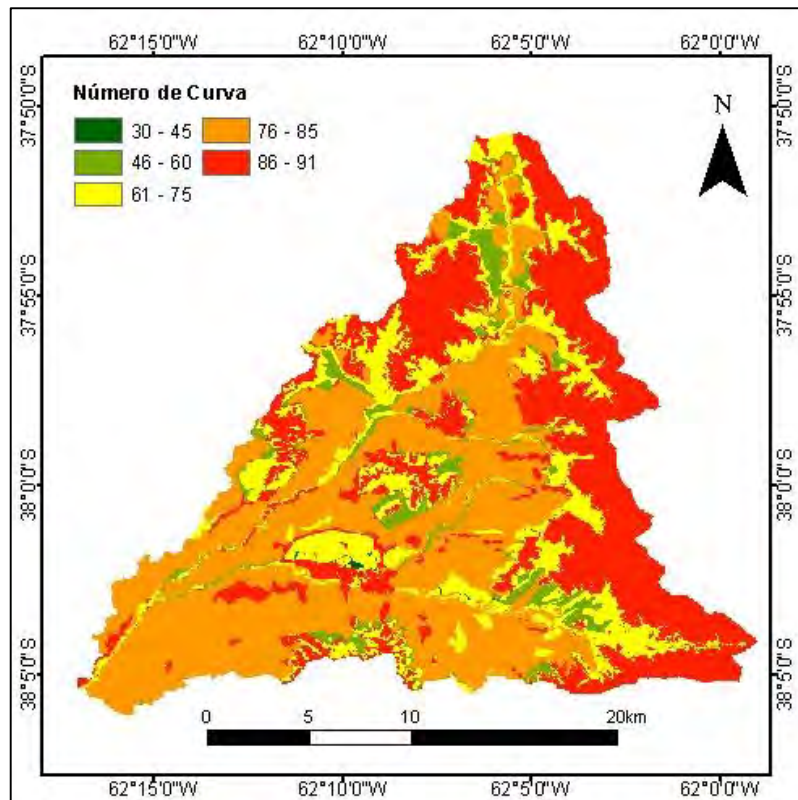


Figura 29. Zonificación del número de curva en la CARSCH para el año 2005.

Fuente: Elaboración propia.

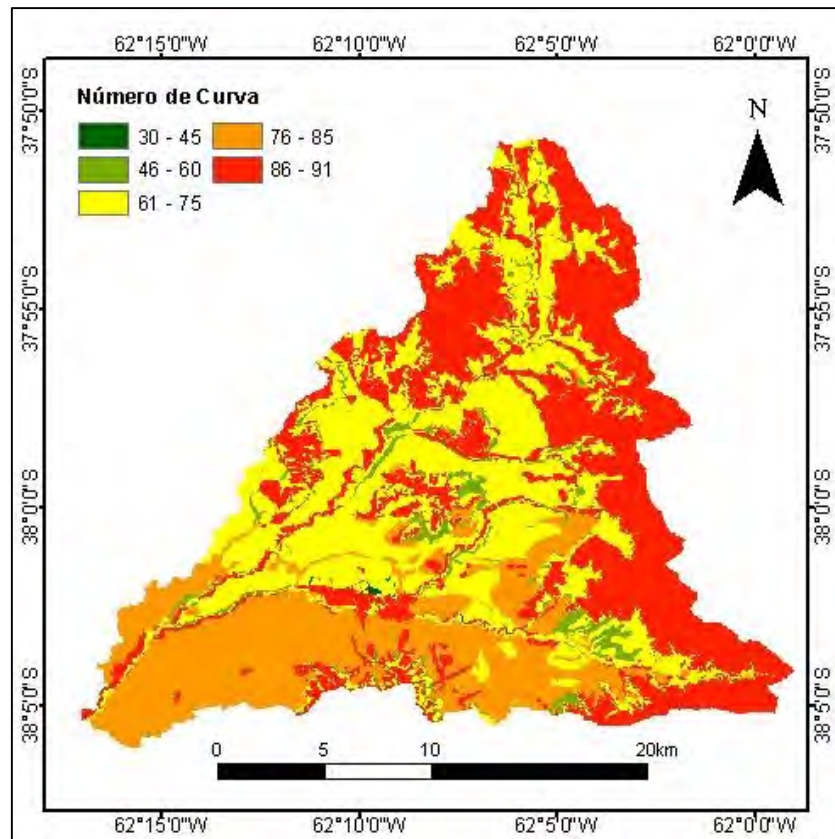
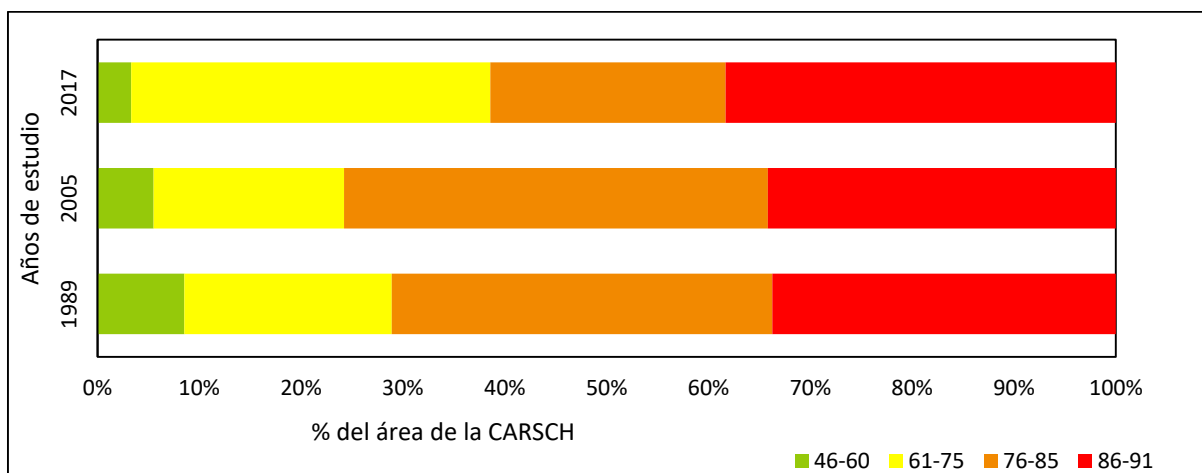


Figura 30. Zonificación del número de curva en la CARSCH para el año 2017.

Fuente: Elaboración propia.

La Gráfica 8 muestra la variación porcentual de los distintos rangos en que se ha dividido el NC. De forma general se observa una tendencia hacia el incremento en los rangos que significa mayor escurrimiento. En lo que se refiere al rango más bajo de NC no se presenta en la gráfica ya que representa menos del 0,3% de la superficie total y no presenta mayor variación en los tres casos estudiados.



Gráfica 8. Cambio de superficie de ocupación de NC en la CARSCH en los años estudiados.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de NC en distintos años para la CARSCH permitió determinar la variación espacial y temporal del escurrimiento superficial (Q) expresado en mm para una lluvia de 95mm. Como se observa en las Figuras 31,32 y 33 al comprar los años 1989, 2005 y 2017 existe una disminución de las superficies que presentan escurrimiento menor a 30mm de 65 km<sup>2</sup> en el primer año a 39 km<sup>2</sup> en el 2017. Las áreas que generan láminas de escurrimiento superficial que superan los 30mm se han incrementado en 26 km<sup>2</sup>.

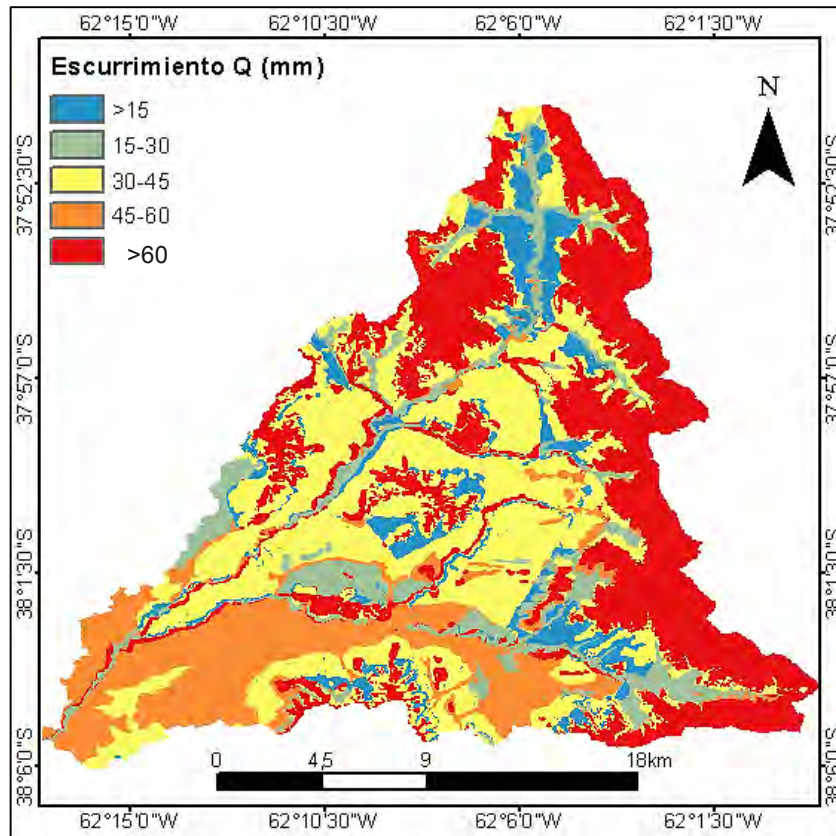


Figura 31. Escurrimiento superficial para el año 1989.

Fuente: Elaboración propia.

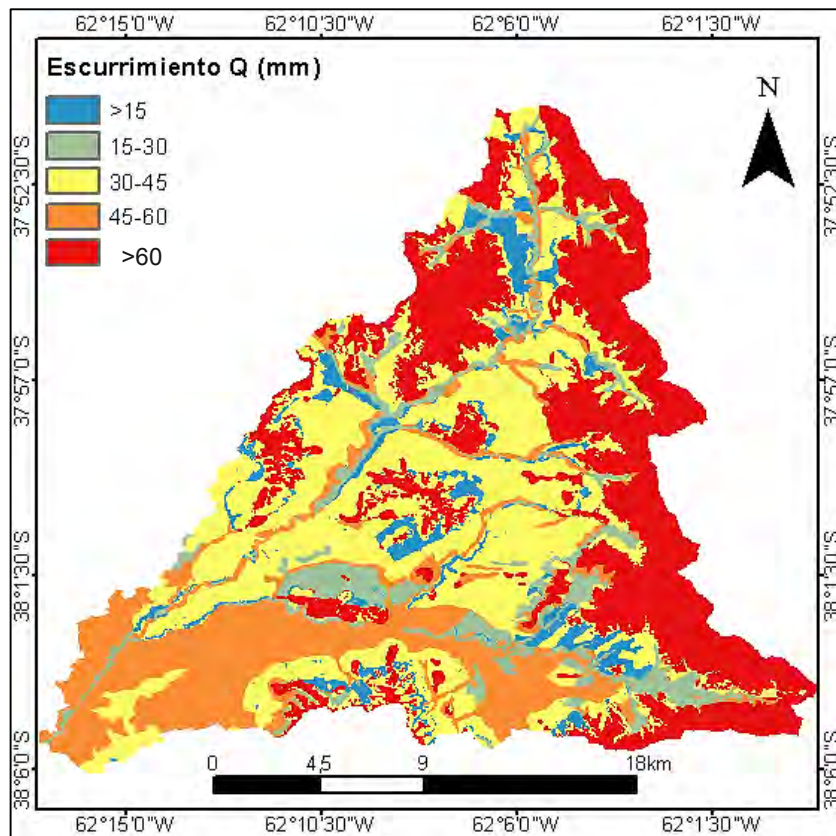


Figura 32. Escorrimento superficial para el año 2005.

Fuente: Elaboración propia.

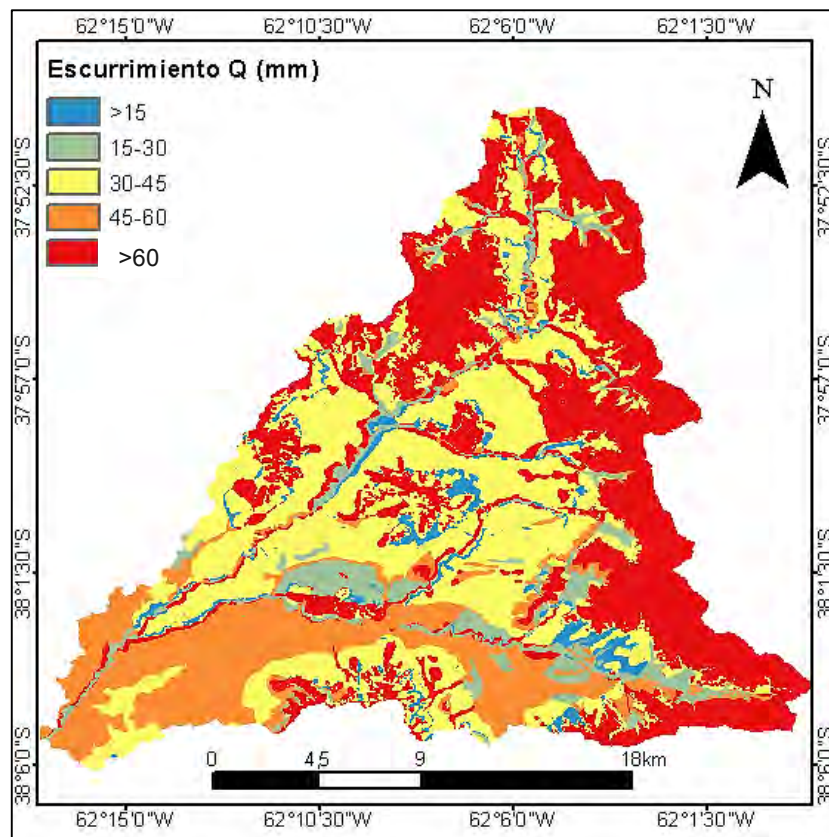


Figura 33. Escorrimento superficial para el año 2017.

Fuente: Elaboración propia.

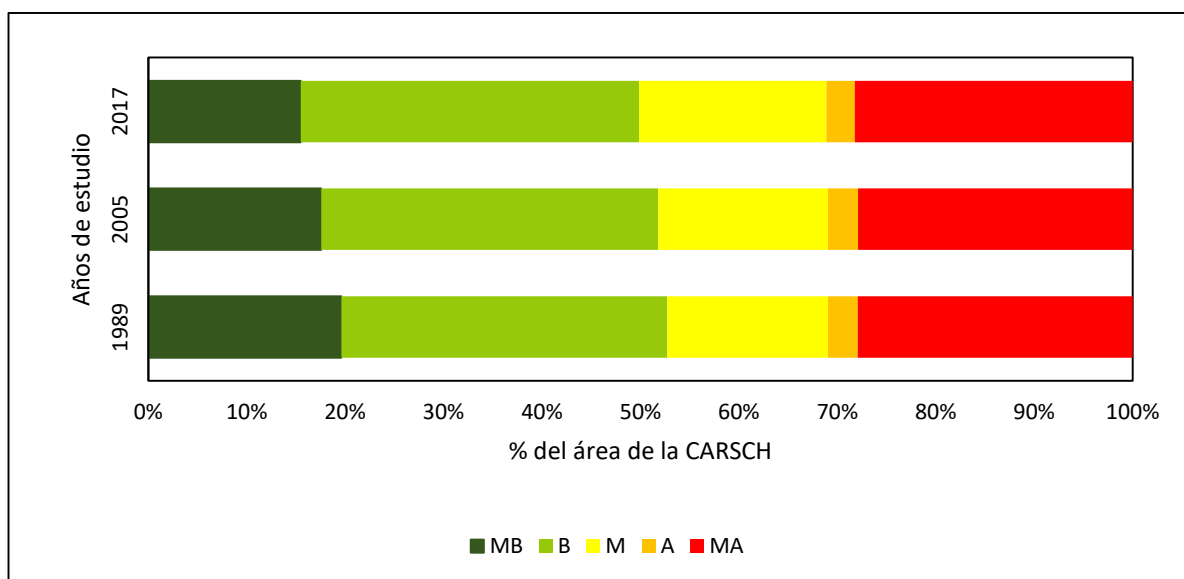
La Tabla 12 muestra los valores promedio para toda la cuenca de los parámetros necesarios para estimar el escurrimiento superficial. En la CARSCH existe un aumento en el número de curva ya sea por la disminución y degradación de la cobertura natural como por la falta de prácticas de conservación de suelo. Este aumento del valor del NC trae consigo una disminución en el potencial de retención (S) de la CARSCH ha disminuido en casi 7 puntos al comparar los años 1989 y 2017 y el consecuente incremento en el escurrimiento superficial.

**Tabla 12. Parámetros de escurrimiento.**

Año	NC	S	Io (mm)	Q (mm)
1989	78,64	69,01	13,80	43,89
2005	79,70	64,71	12,94	45,88
2017	80,27	62,44	12,49	46,97

Fuente: Elaboración propia.

La Gráfica 9 cuantifica la evolución del riesgo de erosión hídrica en la CARSCH. La distribución espacial se muestra en las Figuras 34, 35 y 36 que representan la distribución espacial del riesgo de erosión. De forma general se observa que en toda la cuenca existe una tendencia hacia la disminución de zonas con muy bajo riesgo de erosión e incrementos significativos en rangos de riesgo bueno y medio.



Gráfica 9. Cambio de superficie de ocupación del riesgo de erosión hídrica en la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

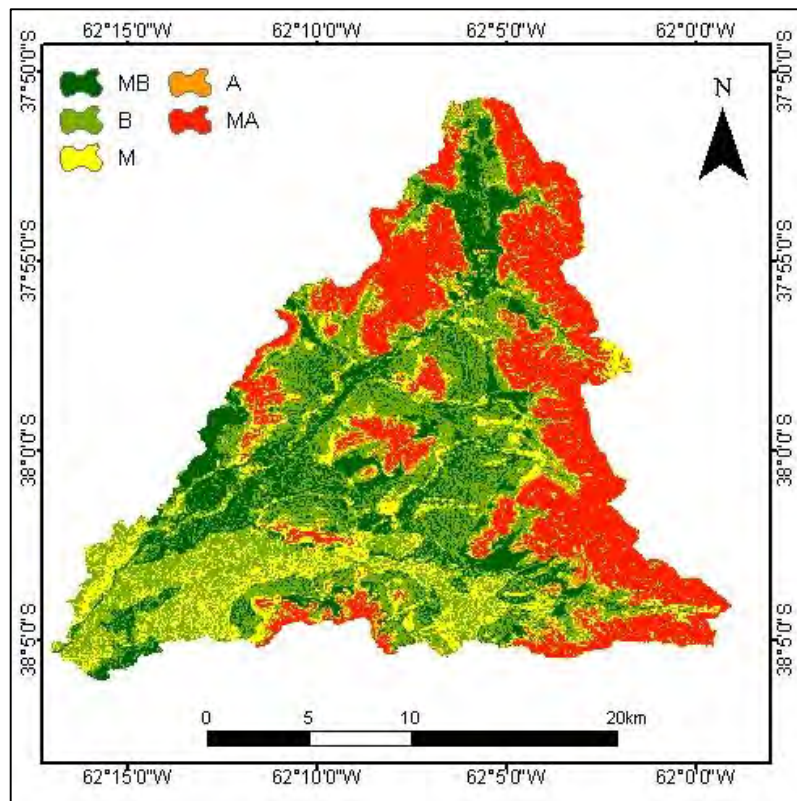


Figura 34. Riesgo de erosión hídrica para el año 1989.

Fuente: Elaboración propia.

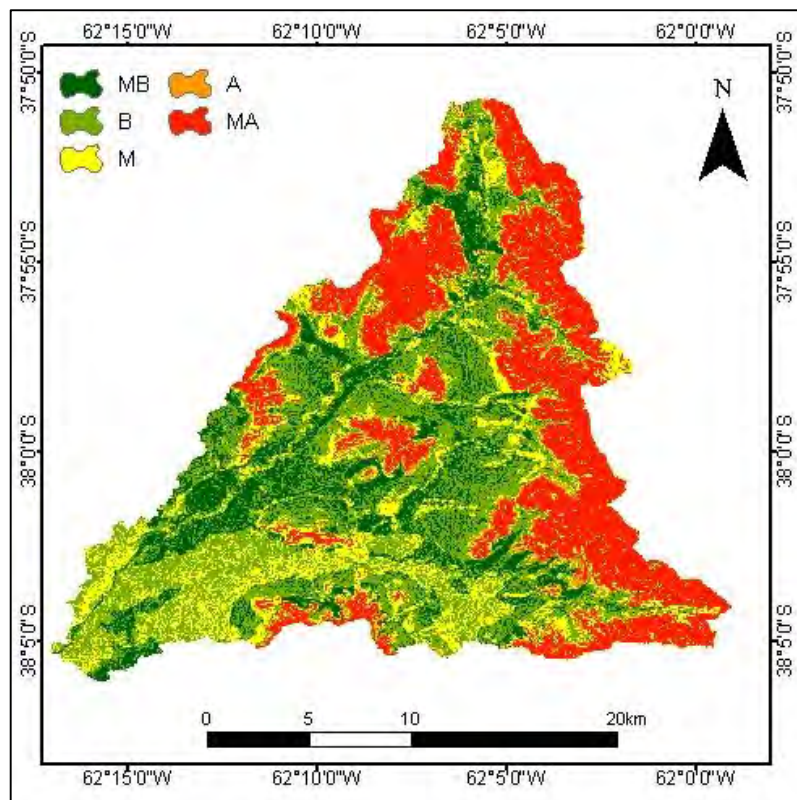


Figura 35. Riesgo de erosión hídrica para el año 2005.

Fuente: Elaboración propia.



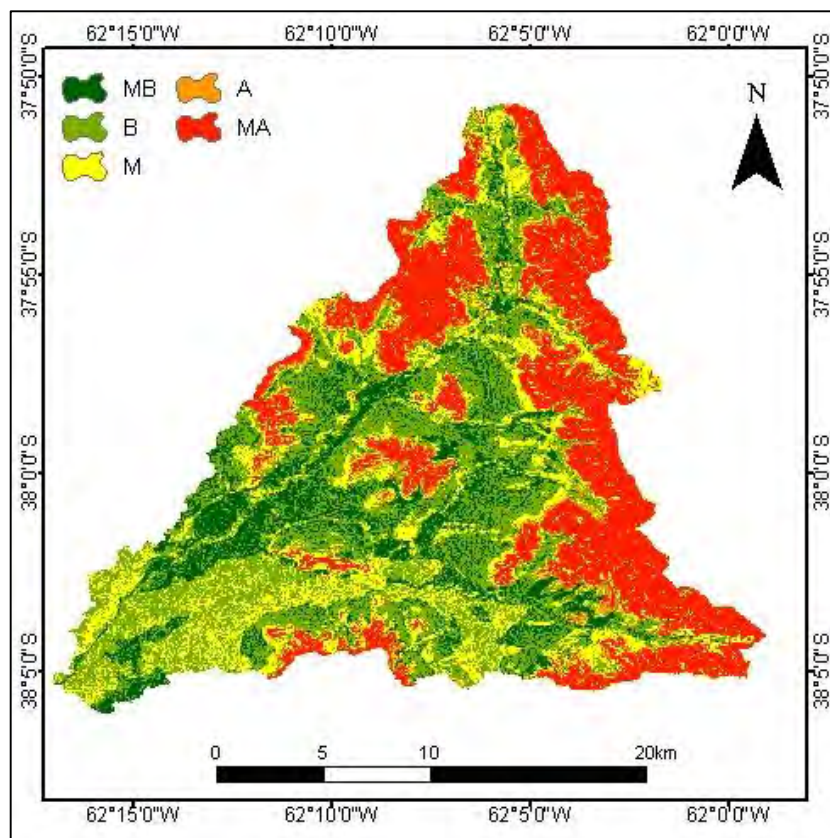


Figura 36. Riesgo de erosión hídrica para el año 2017.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.7. PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL

La obtención de cada uno de los 6 factores que integran la USLE se resume a continuación:

- a. **El factor R** tiene un valor de  $343 \text{ J} \cdot \text{cm} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$  para toda la CARSCH, valor que fue pre calculado por el INTA, para el partido Coronel Suarez.
- b. **Factor de erodabilidad del suelo (K)**. Los parámetros necesarios para su estimación se muestran en el anexo 8.3.2. La variabilidad espacial del factor K se muestra en la Figura 37.

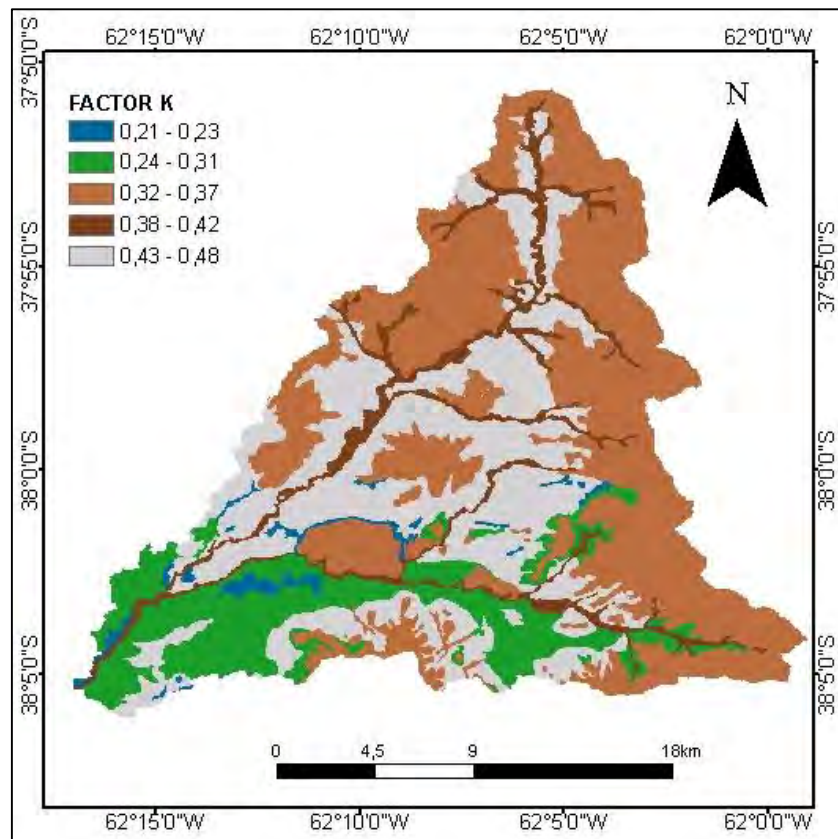


Figura 37. Factor K ( $\text{Mg.m}^2\cdot\text{h}/\text{ha}\cdot\text{J}\cdot\text{cm}$ ) para la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

- c. **Factor topográfico LS.** La variabilidad de este factor que está representada en la Figura 38 e indica que a mayor pendiente se eleva el riesgo de escorrentía.

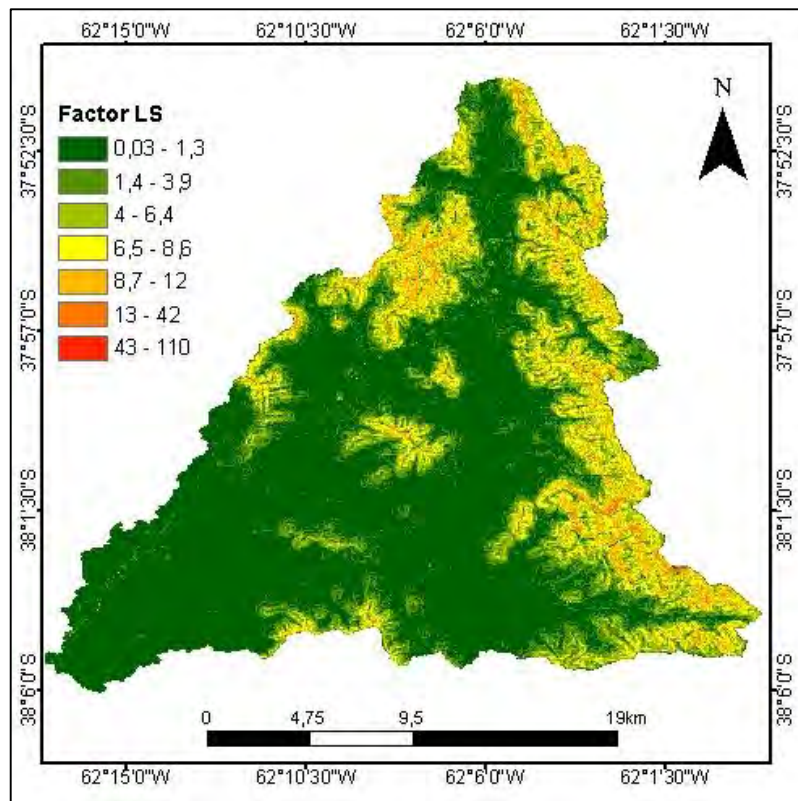
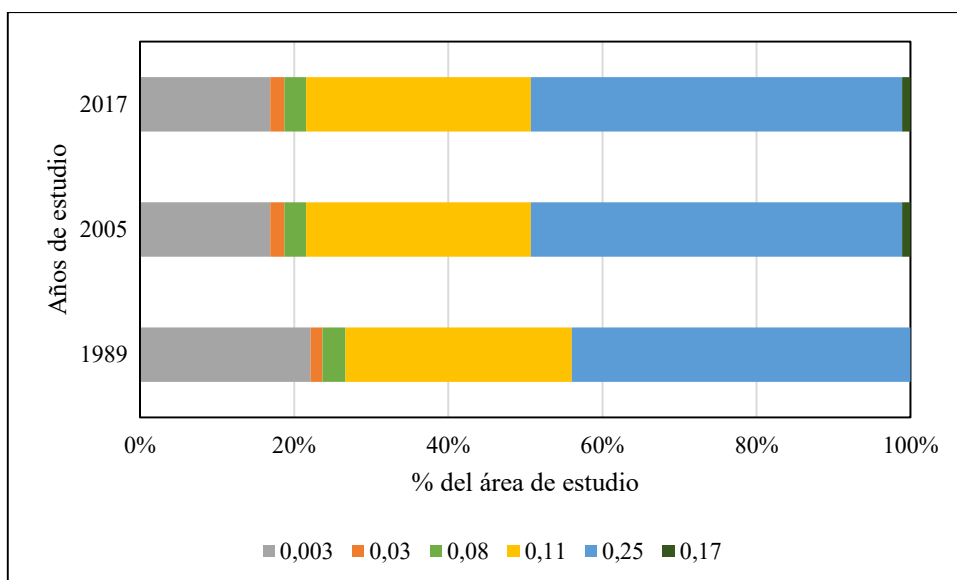


Figura 38. Factor LS para la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

d. **Efecto de cobertura de cultivo (C).** La Gráfica 10, muestra la variabilidad del factor, definida a partir de la zonificación del uso de suelo en las figuras 24, 25 y 26.



Gráfica 10. Factor C para la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

e. **Factor prácticas de cultivo (P).** La Figura 39, muestra la variabilidad espacial y temporal de la aplicación de prácticas de conservación de suelos.

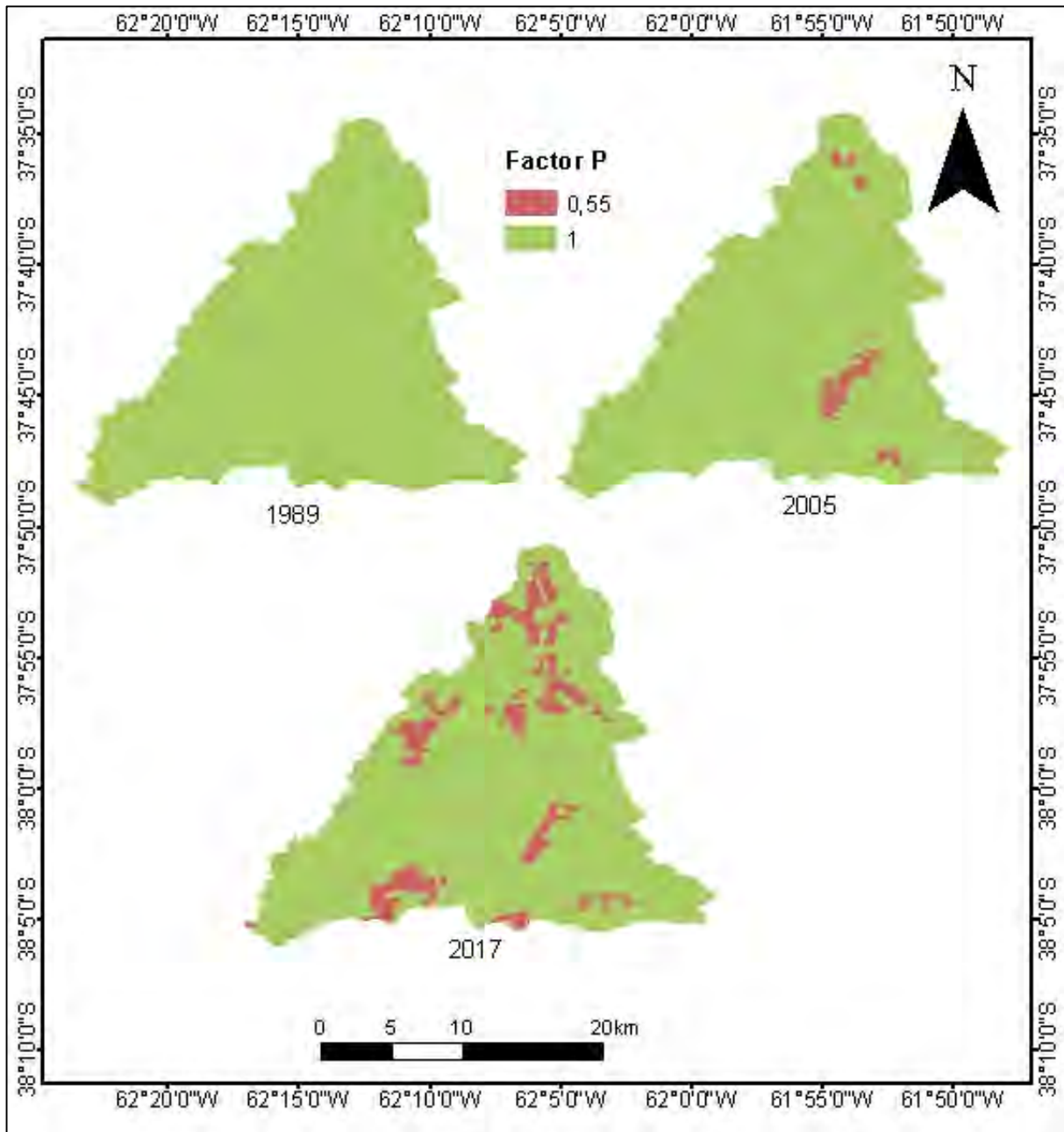


Figura 39. Factor P para la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.7.1. Clasificación de pérdida de suelo.

Las Figuras 40, 41 y 42 zonifican el grado de pérdida de suelo en cada uno de los años seleccionados. Las distintas clases que se presentan en los mapas han sido realizadas de acuerdo a la Tabla 3 Clasificación en grado de erosión hídrica superficial. Los resultados muestran como los distintos cambios de cobertura y uso de suelo han ido modificando a la CARSCH.

En la Figura 40 se observa que durante el periodo que rodea al año 1989, a pesar de no existir medidas de conservación de suelo en las actividades agropecuarias y tener un alto grado de

antropización, la existencia de vegetación natural en zonas de pendiente como serranas y peri serranas muestran que cerca del 76 % del área de la cuenca presentaba un grado de erosión entre nulo y moderado (Gráfica 11).

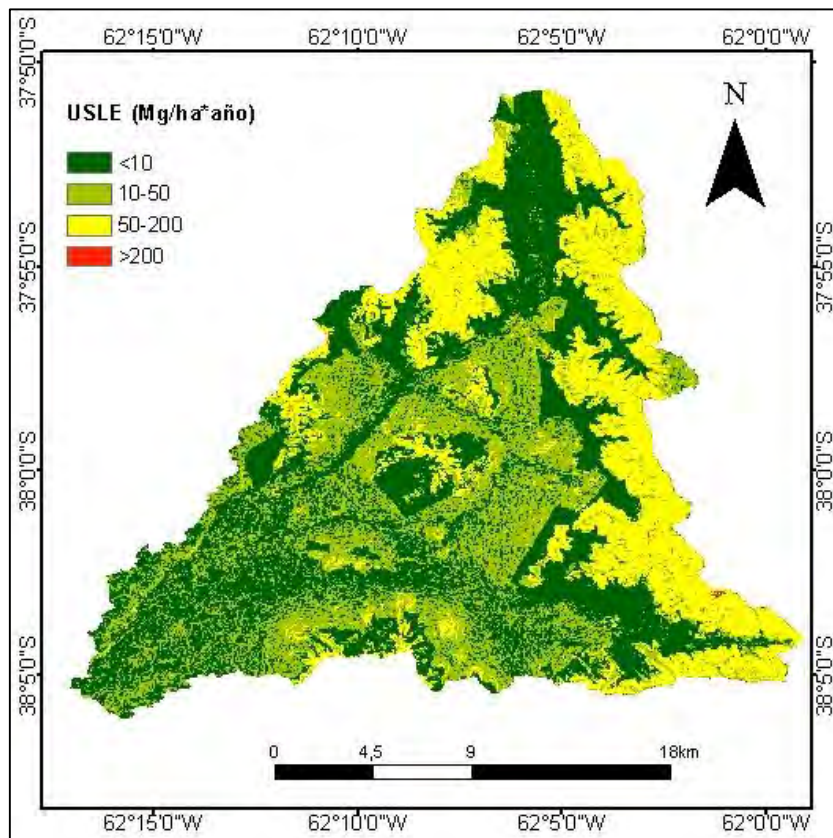


Figura 40. Pérdida de suelo para el año 1989.

Fuente: Elaboración propia.

Durante el periodo correspondiente al año 2005, la Figura 41 muestra como varias zonas que eran de erosión nula a moderada se han transformado en alta (Gráfica 11). Además, la cuenca presenta zonas con erosión muy alta principalmente en las sierras, todo ello como resultado de la disminución de vegetación natural sobre todo en zonas de pendiente y apenas 900 ha km<sup>2</sup> aplican medidas de conservación, como lo muestra la Figura 39.

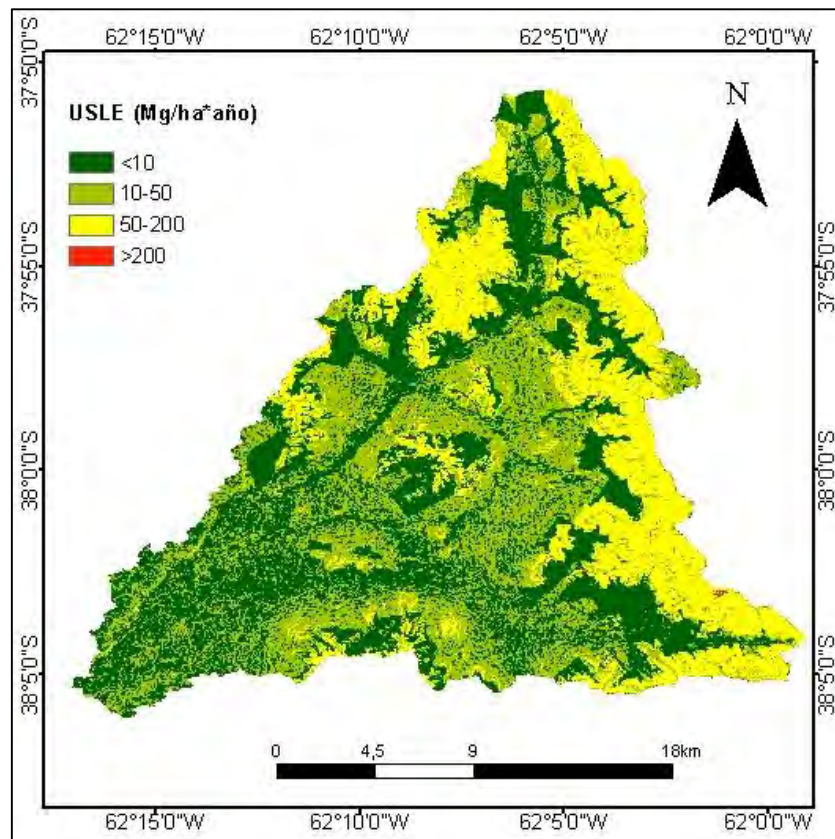


Figura 41. Pérdida de suelo para el año 2005

Fuente: Elaboración propia.

El año 2017 se consideraría como la acumulación de todos los escenarios analizados anteriormente. Las áreas de erosión alta crecieron 0,6 % en comparación con el año 1989, 1 % las zonas de muy alta erosión y las de mayor crecimiento fueron de tipo moderada por cerca del 5%. Si se compara con las figuras de uso de suelo en este periodo las áreas de cobertura natural especialmente en zonas de pendiente es baja incluso entre sierras. Cabe destacar que para este periodo existió un incremento de 3000 ha de áreas agrícolas que aplicaron medidas de conservación de suelos en comparación con el año 2005.

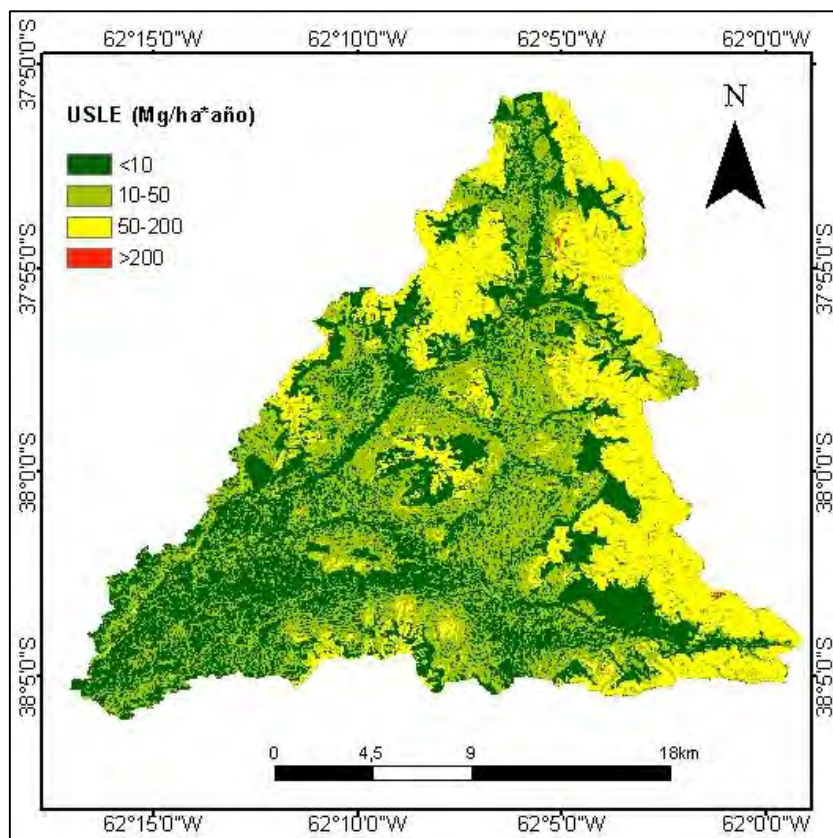
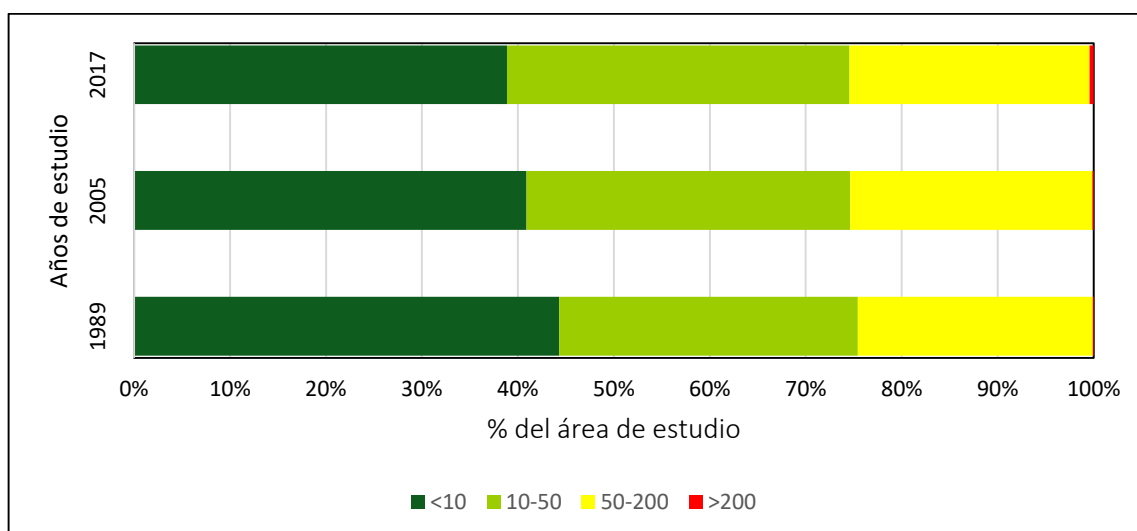


Figura 42. Pérdida de suelo para el año 2017

Fuente: Elaboración propia.

La Gráfica 11 muestra un resumen de la tendencia que presenta la cuenca hacia escenarios de erosión alta principalmente en zonas cercanas a las sierras que de elevada pendiente que incluso se observa procesos de degradación como se muestra en el mosaico de la Figura 43 en el literal a, además se muestra ejemplos de zonas que se encuentran aplicando medidas de conservación de suelos Figura 43, literal b.



Gráfica 11. Cuantificación porcentual de la pérdida de suelo para el periodo 1988-2017.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 43. Procesos de degradación en la CARSCH; a) erosión en cárcava b) medidas de conservación.

Fuente: Reconocimiento a partir de imágenes satelitales de Google Earth.

## 5.8. ÁREA HISTÓRICA/ POTENCIAL DE HUMEDALES

### 5.8.1. Identificación y delimitación

La característica topográfica de la zona de estudio permitió la identificación de áreas que tienden a recolectar agua y preservarla en el suelo. A continuación, se observan los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros que describen estas condiciones.

#### a) Índice topográfico de humedad (TWI)

La Figura 44 muestra la variación del índice TWI. Valores pequeños generalmente inferior a 11,5 (Walters & Babbar-Sebens, 2016) se relaciona principalmente con las sierras que tienen elevada pendiente sin probabilidad de acumulación de agua. Valores superiores muestran una tendencia cada vez más fuerte a la formación de concavidades con la correspondiente acumulación de flujo.



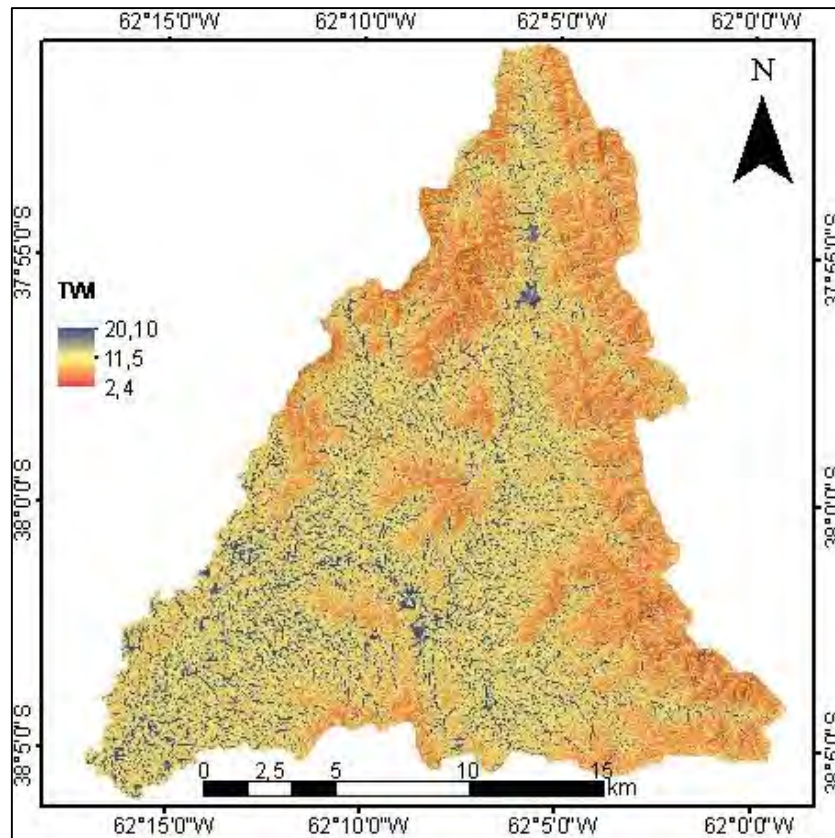


Figura 44. Índice topográfico de humedad (TWI) en la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

**b) Índice de Humedad Topográfica de Precipitación (PTWI)**

La variabilidad espacial del índice PTWI se muestra en la Figura 45. Los valores obtenidos para la CARSCH al igual que el índice TWI presenta una relación inversa con la pendiente en porcentaje. Al agregar el componente de precipitación promedio anual de la CARSCH (852,58 mm) la escala de medición es mayor que TWI por lo cual valores superiores a 16,5 se relacionan con humedales no acuáticos o humedales herbáceos y los valores más altos tienden a representar zonas con altas posibilidades de presentar agua libre.

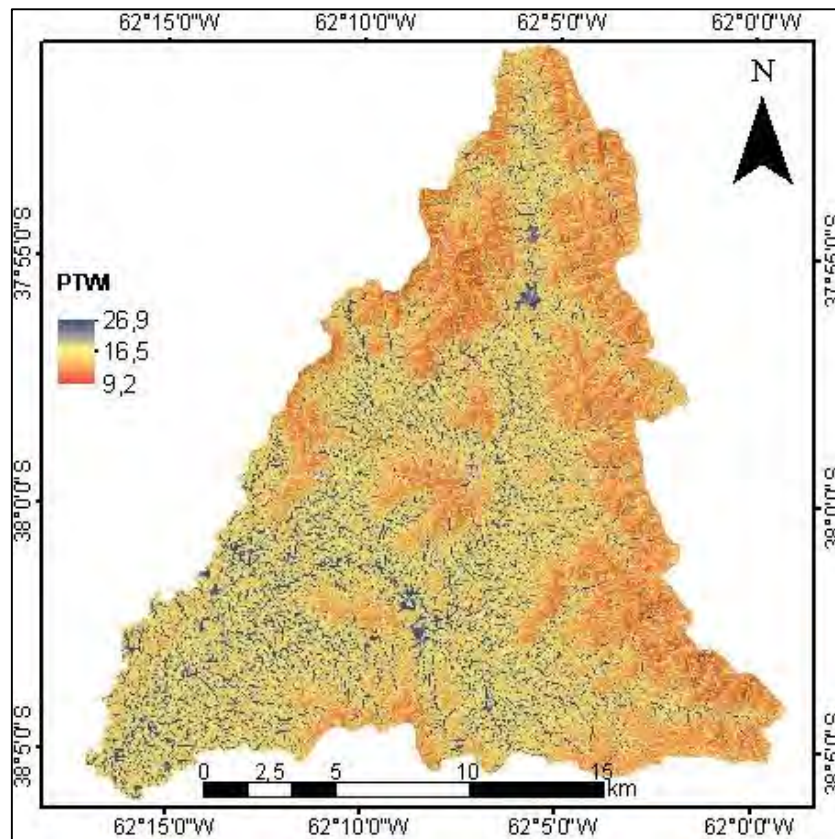


Figura 45. Índice de Humedad Topográfica de Precipitación (PTWI) en la CARSCH.

Fuente: Elaboración propia.

Al tratarse de una cuenca correspondiente a una zona de recarga serrana, los dos índices topográficos muestran similitud en las áreas de acumulación de humedad, formando pequeños polígonos distribuidos por los valles transversales. Varias líneas azul intenso se observan sobre todo en las nacientes de los valles longitudinales.

### c) Orientación de ladera

El sistema serrano se extiende en una dirección Noroeste – Sureste. Esta condición determina que las laderas con orientación Sur a Suroeste presentan menor insolación que las expuestas hacia el Norte a Noreste. De acuerdo a la Figura 46 el tipo de orientación dominante en la CARSCH es Sur que representa el 36% de la cuenca, seguida de Norte con 34% y en menor porcentaje las orientaciones Este y Oeste con 9 y 18 % respectivamente. 3% de la superficie se corresponde con zonas planas de orientación cenital.

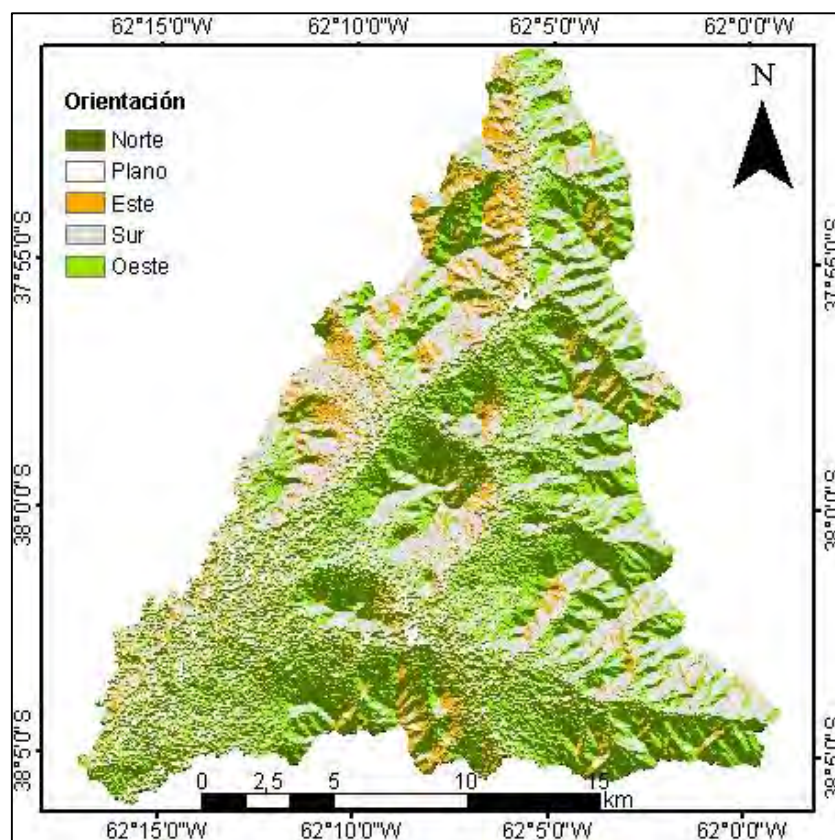


Figura 46. Mapa de orientación de laderas.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el Inventario de humedales de la Provincia de Buenos Aires (2019), las zonas de humedal del área de estudio pertenecen al “Sistema de Paisajes Serranos de Ventania (8aVIII), asociados a surgentes y arroyos de pendiente en valles interserranos. Cubetas”. La Figura 47 muestra la distribución potencial de los humedales en la CARSCH y perfiles topográficos (en m/m) de las zonas más representativas, lograda como resultado de la superposición de la siguiente información:

- ❖ Áreas con índices TWI, PTWI, cercanos al valor máximo ya que la posibilidad de desarrollar humedales es mayor (Figuras 44 y 45), representando con énfasis en los polígonos que se observan.
- ❖ Suelos con malas características de drenaje que condicionan su capacidad de uso, en base a la descripción de suelo del INTA en escala 1:50000 (Ítem 5.4.), las series potenciales de formar humedales son: AoCM, FA2 y Tor 1.
  - Serie no diferenciada AoCM. Está formada por suelos 100% hidromórficos, su capacidad de uso no es apta para agricultura y requiere cuidados progresivamente más intensos sus limitantes son exceso de agua pobre drenaje, humedad excesiva, napa freática alta: (VIIws), cuyo Índice de productividad es de 5.0 (no agrícola).
  - Serie FA2 igualmente formada por suelos hidromórficos, tiene una capacidad de uso IIIws. Es decir que tiene limitaciones por exceso de agua, pobre drenaje. De índice de productividad de 58,0 a 48,0 considerada de moderada a baja.

- Serie Tor1, posee una condición de drenaje moderada, capacidad de uso IIIsc. Es decir que requiere grados crecientes de cuidado y protección. Las principales limitaciones son el clima y bajo nivel de fertilidad como lo muestra su bajo índice de productividad (52).

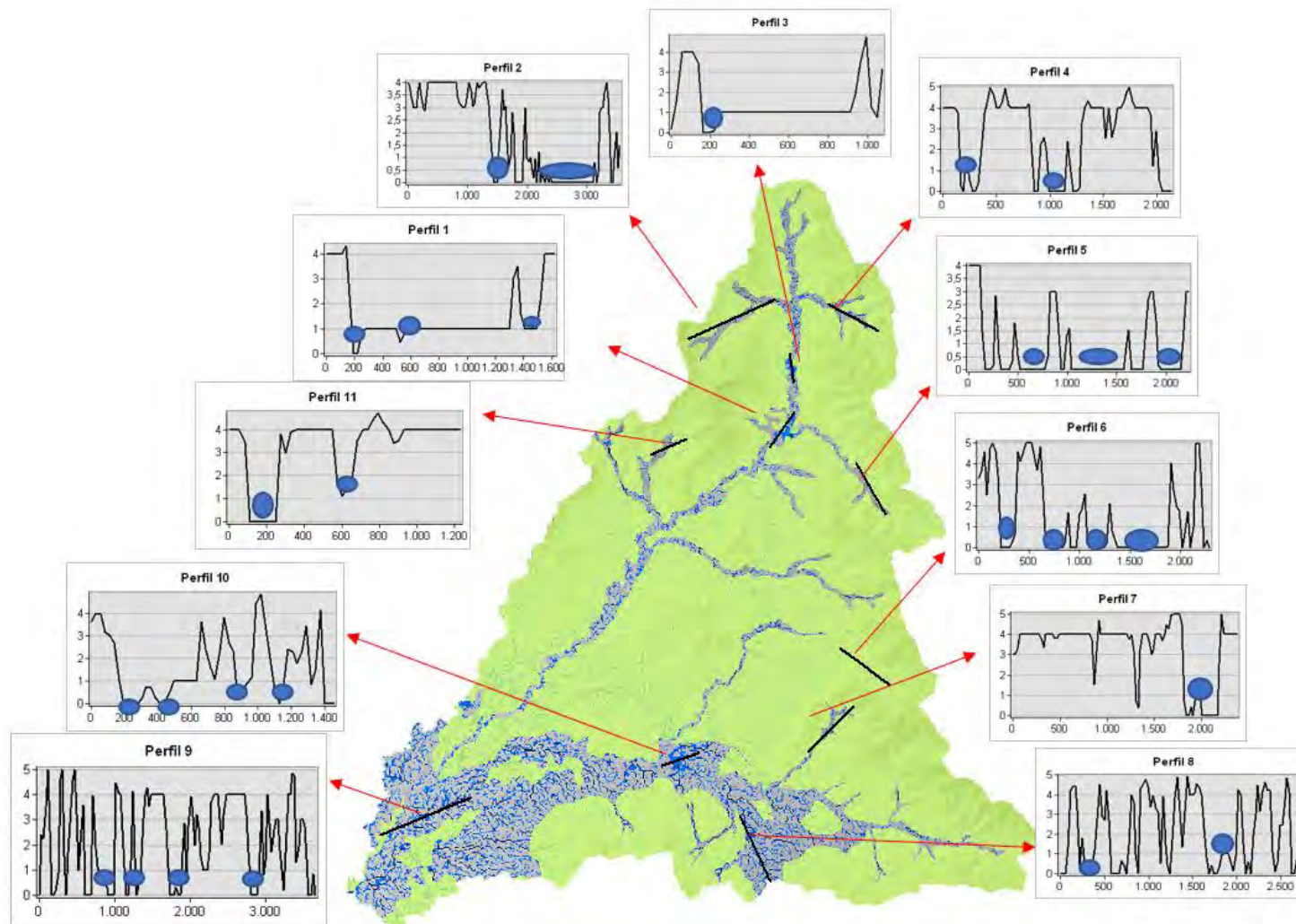


Figura 47. Localización potencial de zonas de humedal según perfiles topográficos (m/m).

Círculos azules muestran áreas de mayor acumulación de agua.

Fuente: Elaboración propia.

La escala del mapa de suelos del INTA al ser 1:50.000, constituye la principal limitante para una mejor delimitación. Como se observa en las Figuras 45 y 46 varias áreas presentan valores altos y medios de índices de humedad, pero corresponden a suelos clasificados como roca (R) y Tor1 (Figura 48). En el caso de este último incluso se observa gran cantidad de pequeños polígonos con altas probabilidades de acumulación de agua.

### 5.8.2. Análisis histórico para determinar cambios áreas de humedal

A partir de los resultados alcanzados por medio de la identificación de las zonas potenciales de humedal en la CARSCH, se obtuvo que el área de ocupación es de 76 km<sup>2</sup>.

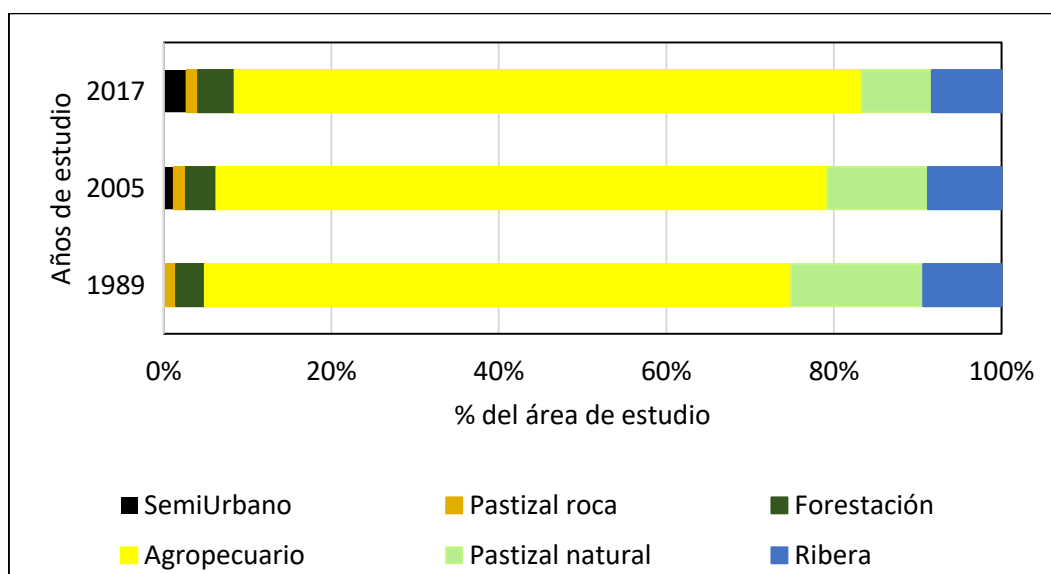
La Tabla 13 muestra el cambio progresivo que han experimentado estas zonas en los últimos 30 años, sobre todo en lo que se refiere a cobertura natural como pastizal natural, riberas y pastizal natural con roca

Tabla 13. Cambio de uso de suelo en zonas potenciales de humedal.

Uso de suelo	Área(km <sup>2</sup> )		
	1989	2005	2017
Semiurbano	0,00	0,90	2,05
Pastizal natural con roca	1,11	1,11	1,06
Forestación	2,60	2,74	3,28
Agropecuario	52,98	55,22	56,66
Pastizal natural	11,90	9,07	6,32
Ribera	7,08	6,63	6,30

Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 12, se distingue de mejor manera que las principales actividades que ejercen presión sobre este tipo de ecosistemas son las actividades agropecuarias que se expanden sobre las vaguadas y desde el año 2005 el uso de suelo semi urbano que se ubica en las cercanías de las márgenes del arroyo Ventana.



Gráfica 12. Cuantificación del cambio de uso de suelo para el periodo 1988-2017.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 48 se observa ejemplos de cambio de uso de suelo en zonas potenciales de humedal: a, b, c y d corresponden a valles interserranos ocupados por actividades agrícolas; e y f corresponden a riberas de arroyos en los que la actividad agrícola y de urbanización han avanzado sobre la llanura de inundación.

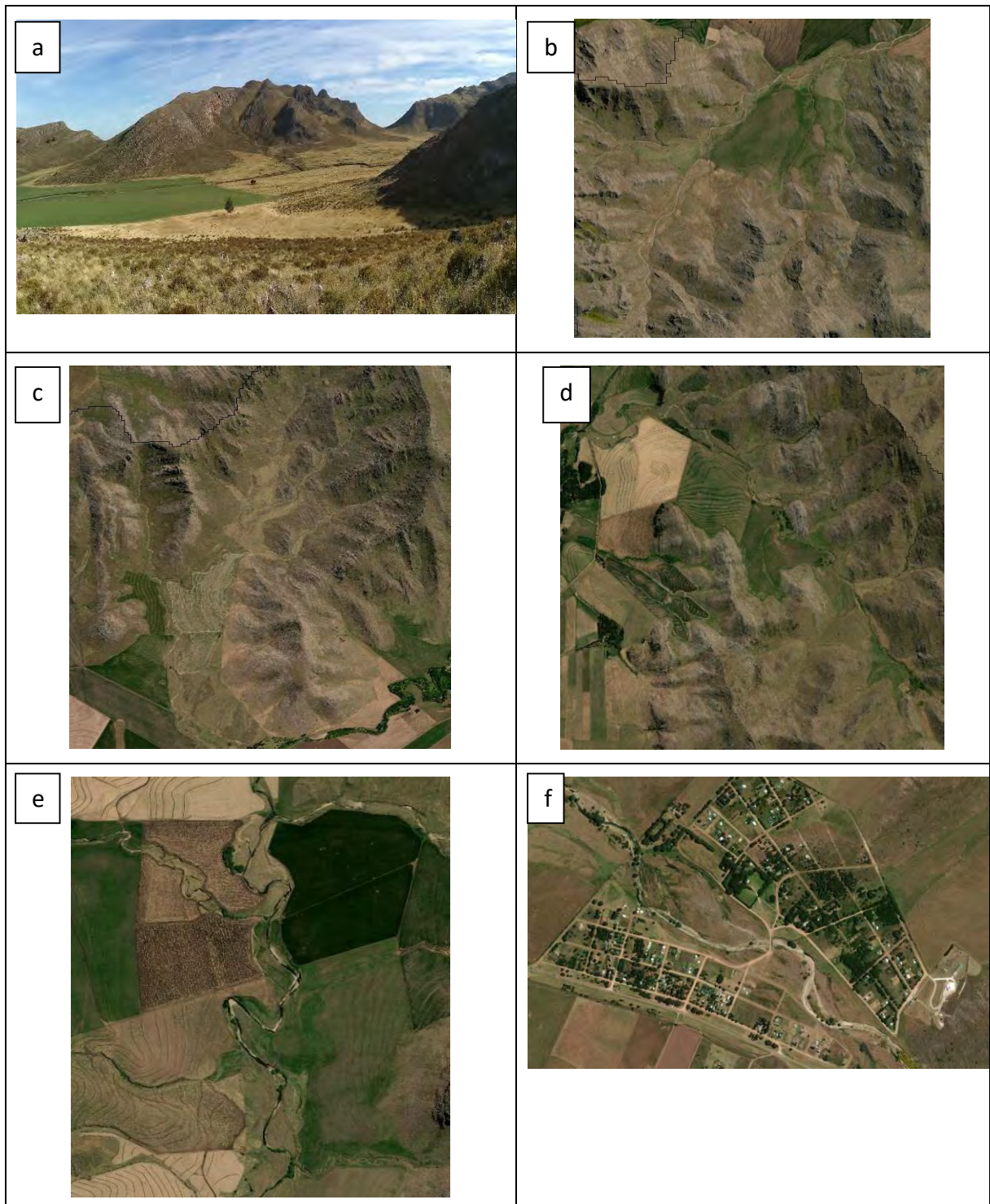


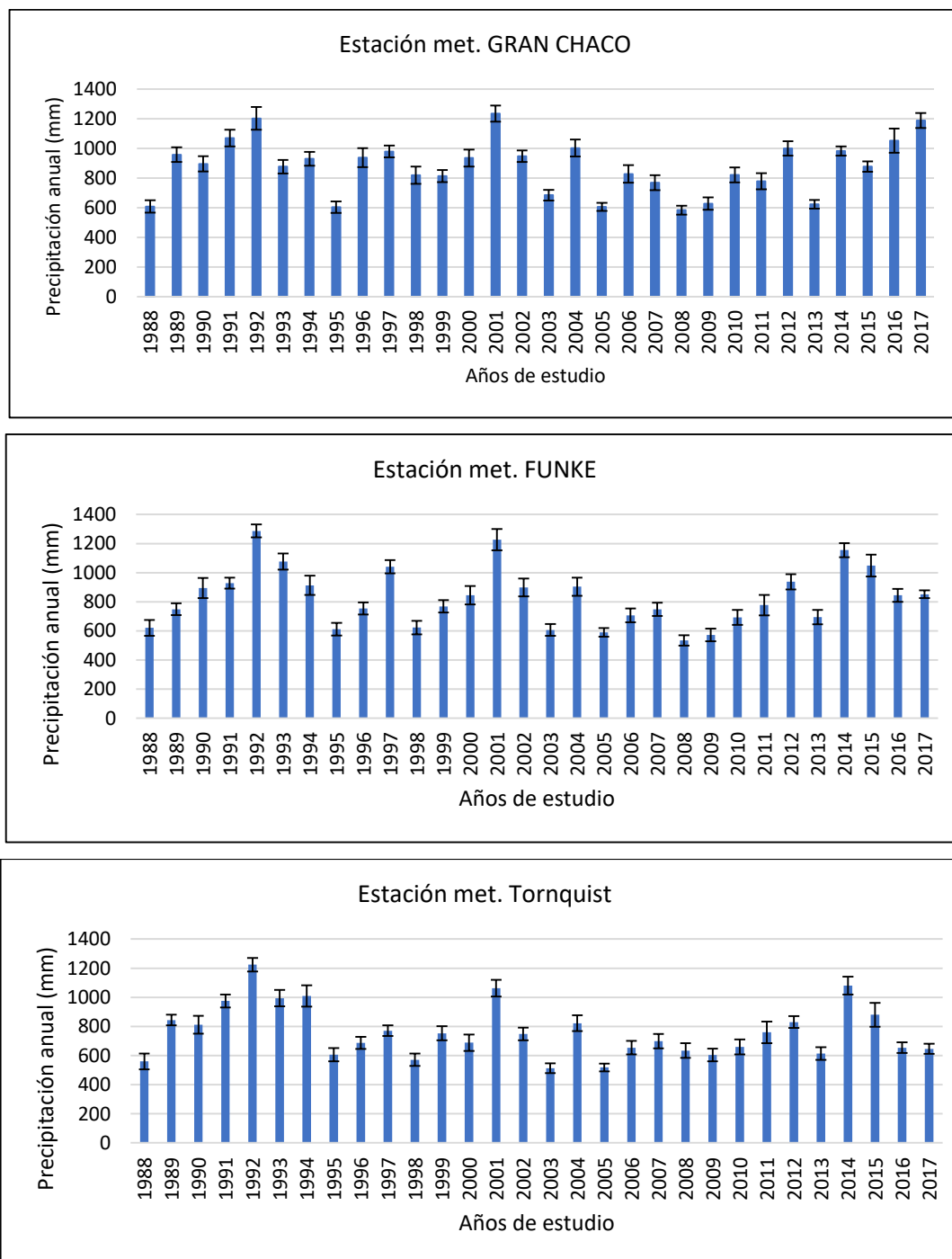
Figura 48. Localización potencial de zonas de humedal.

Fuente: Reconocimiento a partir de imágenes satelitales de Google Earth.

### 5.8.3. Servicios ecosistémicos de regulación hídrica de las áreas de humedal

#### 5.8.3.1. Índices espectrales

Para el análisis de índices espectrales se decidió realizar una comparación entre años secos y húmedos para cada uno de los tres periodos en que se dividió el estudio de cambio de uso de suelo. La Gráfica 13 muestra la variación en los valores de precipitación media anual y desviación estándar de las tres estaciones meteorológicas que se ubican dentro o muy cerca del área de estudio.



Gráfica 13. Precipitación anual y desviación estándar para el periodo 1988-2017.

Fuente: Elaboración propia.



De las gráficas anteriores se seleccionó como años de referencia de años secos 1988,2005, y 2017, a pesar de que este último no muestra comportamientos similares en todas las estaciones. Como años húmedos se tomó 1992, 2001 y 2017. Las imágenes utilizadas para este análisis se corresponden.

**a) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)**

En general la Figura 49 muestra que el área de estudio al estar localizada en una región semiárida no presenta valores muy altos de NDVI-I. La zona con valores más bajos de NDVI-I se localiza principalmente en las sierras debido a la escasa vegetación y roca aflorante, al contrario de las áreas catalogadas como potenciales de humedal que siempre presentan los valores más altos de NDVI-I.

Para los años de baja precipitación el NDVI-I presenta una variación entre -0,04 en 1988 y 0,7 en el año 2005; con una media de 0,31. Respecto a la zona potencial de humedal existe una variación entre 0,02 y 0,7, con una media de 0,37. En los años húmedos existió un incremento en el vigor de la vegetación al presentar una media de 0,38 para la cuenca y 0,4 para humedales.

En la anterior comparación no se tomó en cuenta los años 2014 y 2017, por presentar un comportamiento distinto en las precipitaciones ya que, en la estación Gran Chaco la tendencia de los dos años es contraria a las estaciones FUNKE y Tornquist (Gráfica 13), de acuerdo con la desviación estándar el año 2014 es menos homogéneo. Todas estas condiciones se ven reflejadas en las zonificaciones del NDVI-I, ya que el 2017 presenta el valor más bajo (-0,04), pero también el valor más alto (0,81) de NDVI-I, a diferencia del año 2014 que muestra en parte superior de la cuenca una acumulación de altos valores de NDVI-I y en el resto existe mayor heterogeneidad y valores de 0,3 a 0,4 de NDVI-I. Referente a zonas de humedal la variación de NDVI-I es muy parecida con una media de 0,4 (Anexo 8.4).

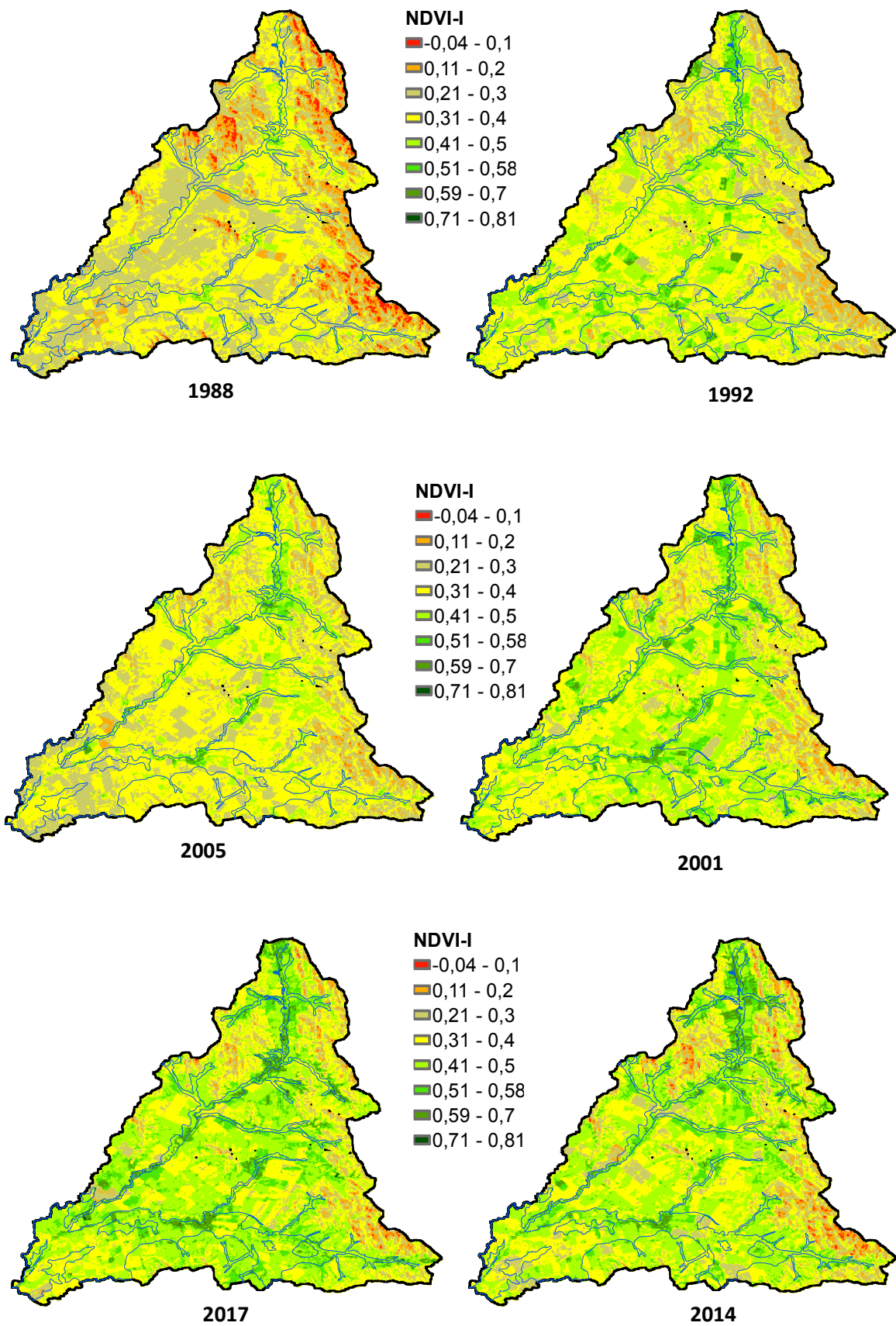
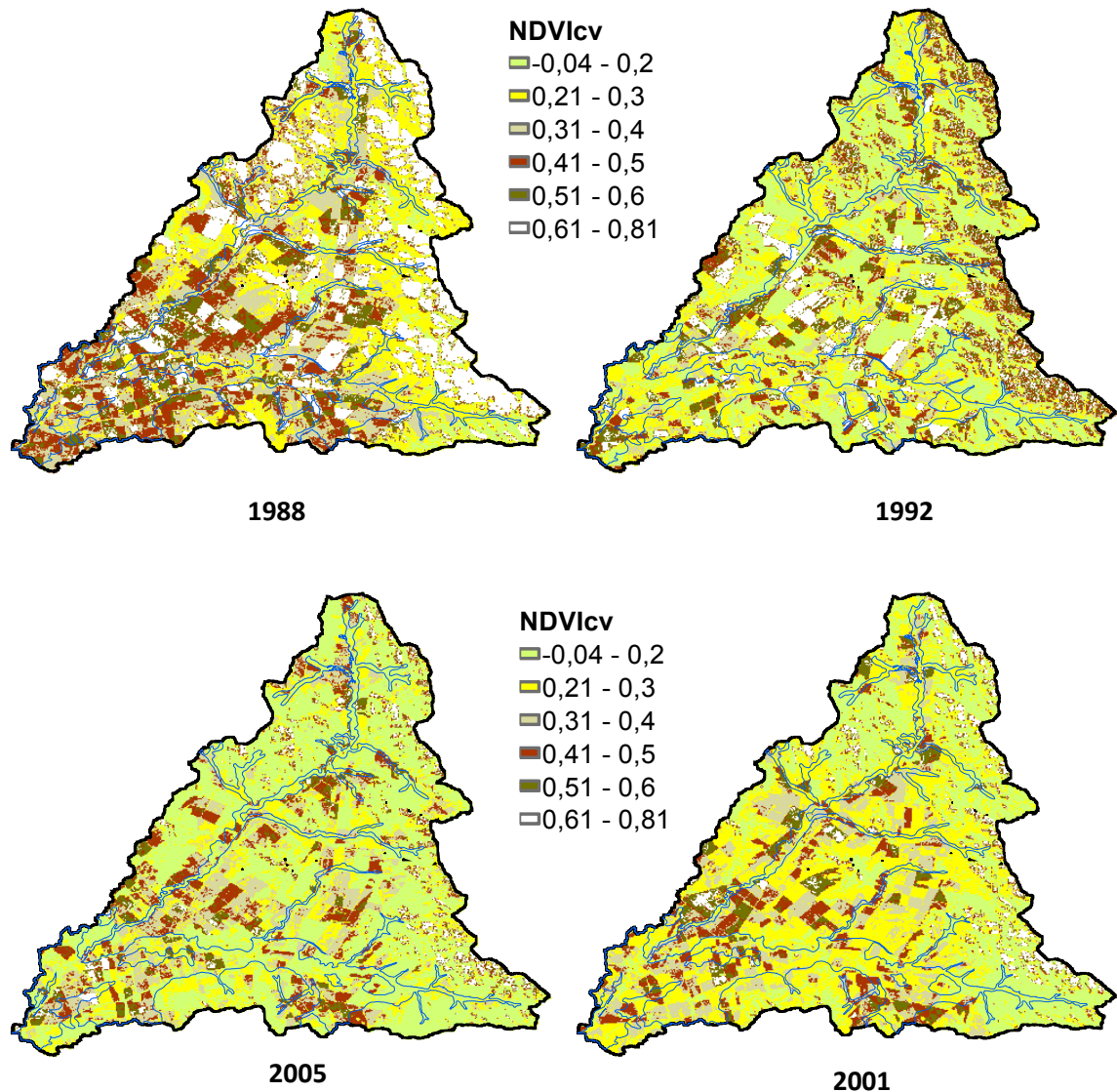
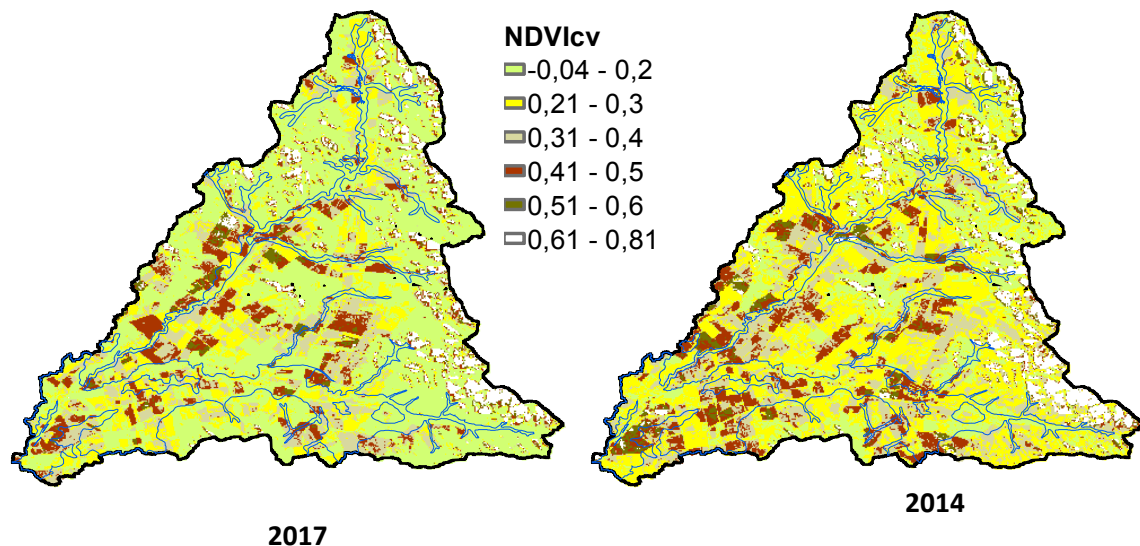


Figura 49. Variabilidad de NDVI-I en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 50 muestra que el NDVIcv es sensible principalmente a los cambios de uso de suelo ya que en todo momento las zonas de cobertura natural presentan baja estacionalidad que en las áreas en las que se realiza actividades agropecuarias y condicionalmente estas áreas se corresponden con las zonas catalogadas como potenciales de humedal. Prueba de ello respecto a la zona de humedal la variación promedio de NDVI-I fue de 0,26 en el año 2005 superior a la variabilidad de la cuenca que fue de 0,24 en el mismo año y como se observa en la Gráfica 12 en ese periodo se produjo el mayor cambio de cobertura. En general los años secos presentan más variabilidad que los húmedos, concentrándose principalmente en las zonas serranas y profundizándose a menor precipitación (Anexo 8.4).





**NDVIcv**  
 -0,04 - 0,2  
 0,21 - 0,3  
 0,31 - 0,4  
 0,41 - 0,5  
 0,51 - 0,6  
 0,61 - 0,81

Figura 50. Variabilidad del NDVIcv en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos. Fuente: Elaboración propia.

**b) Índice diferencial de agua normalizado (NDWI)**

En la Figura 51 se muestra la variabilidad del NDWI promedio para cada año de referencia. En general el área de estudio muestra valores bajos de humedad relacionados con estrés hídrico (Clayton et al., 2018) debido a la presencia de valores negativos en todos los años principalmente en las zonas serranas. Únicamente las áreas potenciales de humedal presentan valores elevados de humedad que en años secos va desde -0,2 a 0,6 con un valor promedio de 0,03; mientras que para años considerados húmedos varió entre -0,16 a 0,6 y una media de 0,14. A diferencia de toda la cuenca que en el periodo seco muestra un bajo NDWI promedio de 0,008 y en años húmedos una media de 0,12 (Anexo 8.4).

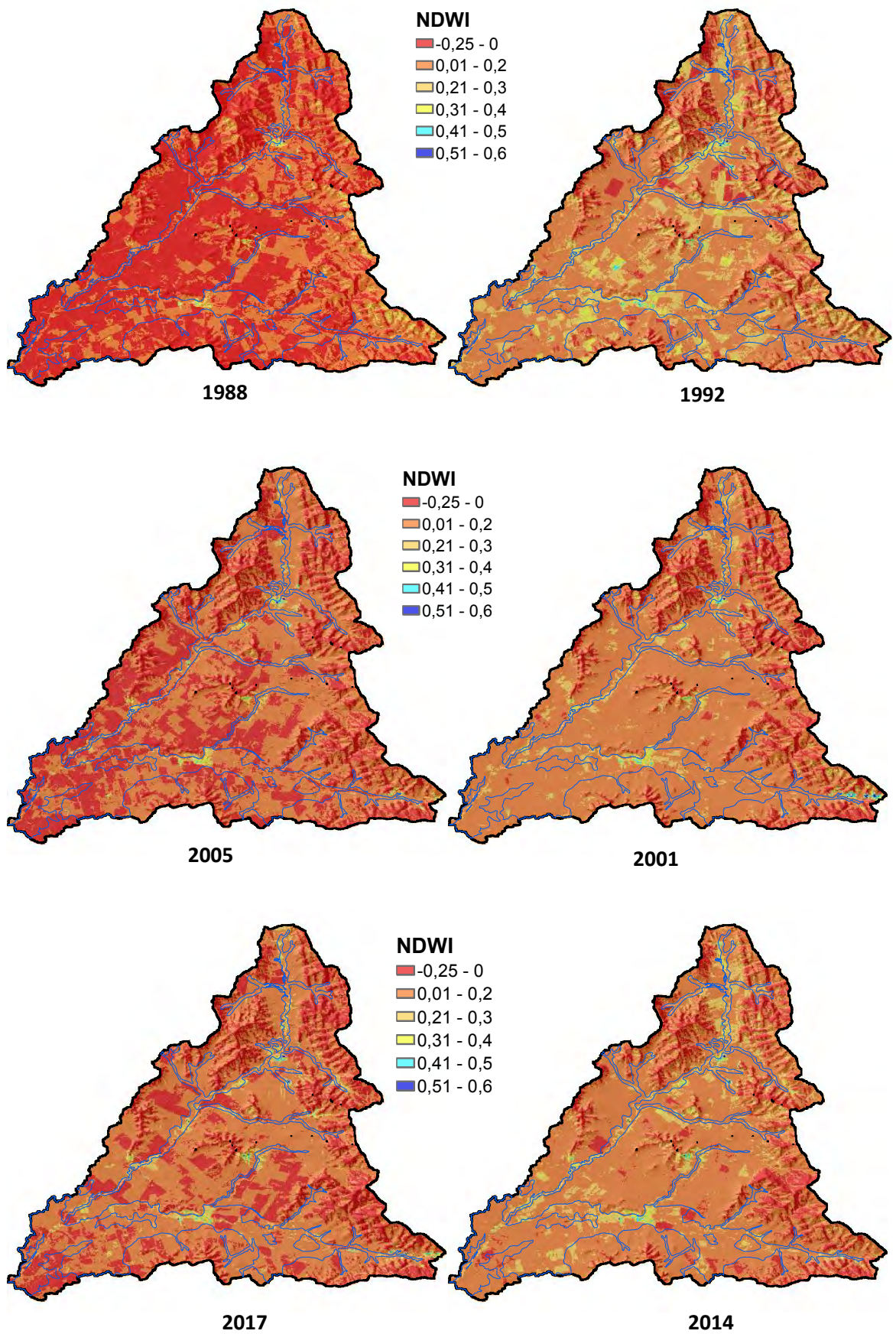


Figura 51. Variabilidad del NDWI en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 52 muestra la estacionalidad del contenido de humedad en la CARSCH y en zonas consideradas potenciales de humedal. La CARSCH muestra una tendencia a incrementar su variabilidad expresada a través de la desviación estándar sin tomar en cuenta el año 1988 que fue muy seco con presencia de incendios forestales por lo cual la desviación estándar fue de 0,14; pero en el resto de años analizados la desviación estándar paso de una media de 0,09 en 1992 a 0,12 en el 2017 (Anexo 8.4).

Respecto a las zonas de humedal la variabilidad es ligeramente menor al resto de la cuenca ya que presenta una media de 0,11 para años secos y húmedos en este caso incluido el año 1988.

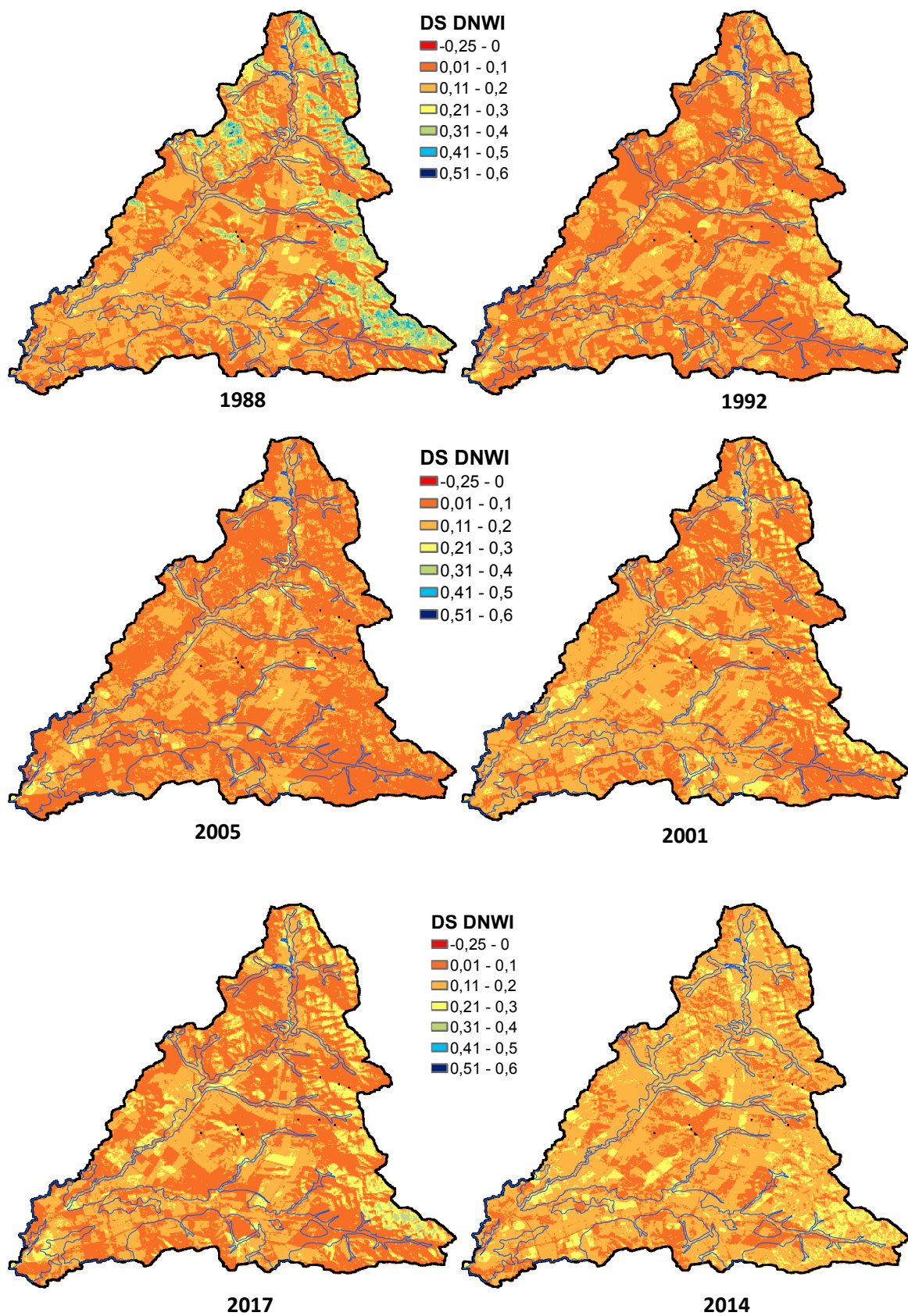


Figura 52. Desviación estándar de NDWI en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos.

Fuente: Elaboración propia.

### c) Evapotranspiración (ET)

La Figura 53 confirma lo expresado por Hu, Niu, Chen, Li, & Zhang (2017), quienes consideran que una mayor ET puede resultar en la existencia de humedales. En este caso se observa que las zonas potencialmente de humedal que aparecen sombreadas presentan mayor ET en años secos un promedio de 24,2 mm y años húmedos una media de 35,1 mm (Anexo 8.4); como resultados de una mayor producción de biomasa. Sin embargo, al comparar estos dos escenarios existe una tendencia a disminución de los valores de ET que concuerdan con los cambios de uso de suelo que se muestran en el ítem 5.5. Cobertura y uso de suelo.

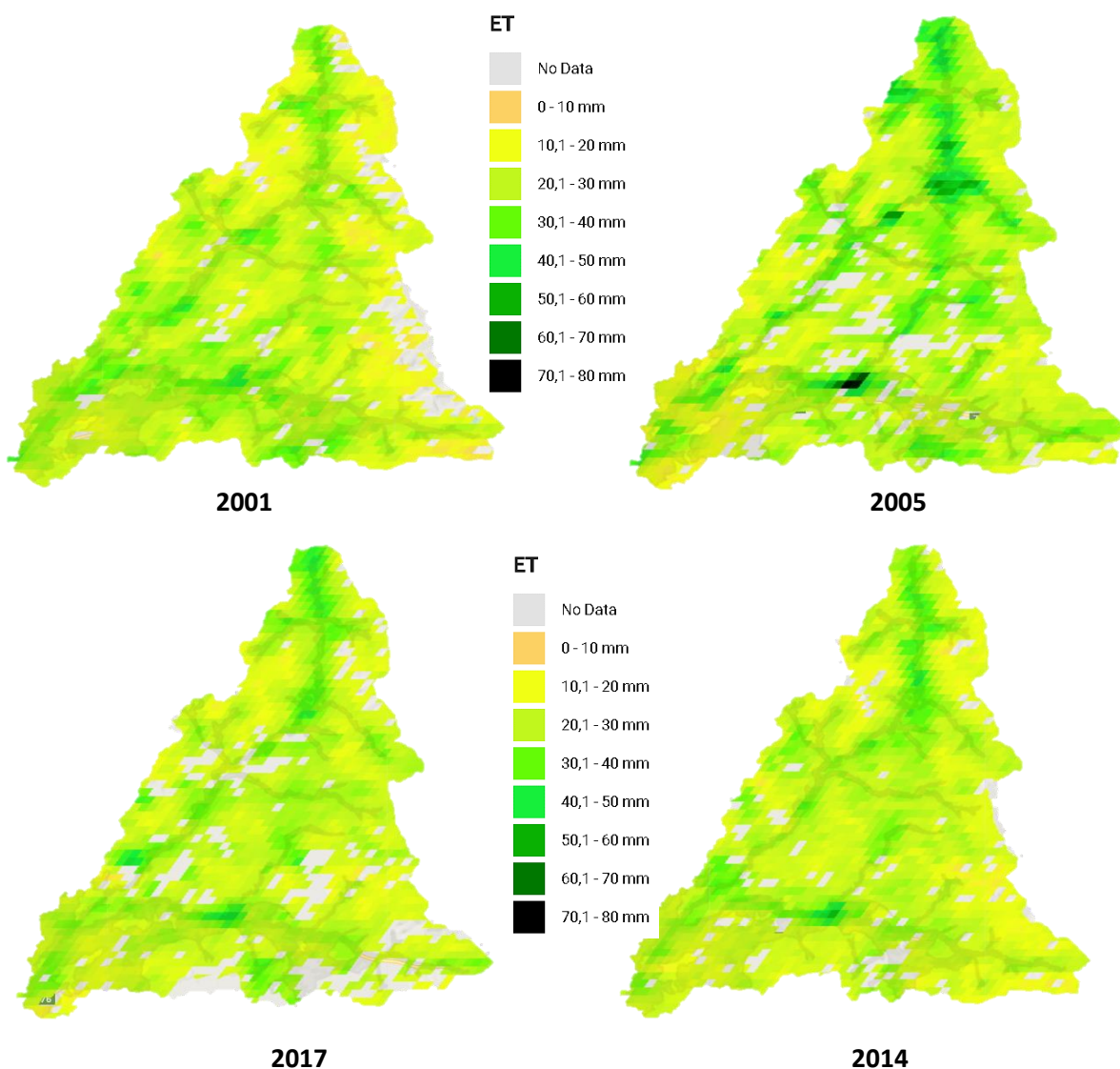


Figura 53. Variabilidad de evapotranspiración (ET) en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos.

Fuente: Elaboración propia.



#### **d) Índice de provisión de servicios Ecosistémico (IPSE)**

La Figura 54 muestra la distribución espacial de las estimaciones de los servicios Ecosistémicos a través de IPSE. Estos servicios están relacionados con secuestro de carbono y dinámica del agua ya que considera a estas variables como dependientes de la variabilidad del NDVI (Paruelo et al., 2016). Debido a que el IPSE compila la variabilidad temporal del NDVI-I en cierta forma está caracterizando a la cubierta vegetal la cual según varios autores redistribuye las precipitaciones en 3 flujos que son: translocación (flujo disperso), escorrentía cortical (flujo concentrado) e intercepción (flujo de evaporación), los dos primeros conforman la lluvia neta es decir la que logra penetrar el suelo y la tercera es la lluvia que es devuelta a la atmosfera sin llegar al suelo (Pascual et al., 2017).

En la CARSCH el IPSE presenta una media de 0,24 para años secos y 0,27 para años húmedos. Las áreas de mayor IPSE, superior a 0,46 lo presentan las zonas potenciales de humedal y valores de menor IPSE se concentra en las sierras debido a la baja cobertura vegetal. De acuerdo con el anexo 8.4 se observa que entre los años 1988 a 2005 existen varias zonas con IPSE menor a 0,15 y que se han recuperado en los años 2014 y 2015 coincidiendo en parte con áreas en las que se ha aplicado algún tipo de práctica de conservación de suelo (Figura 39).

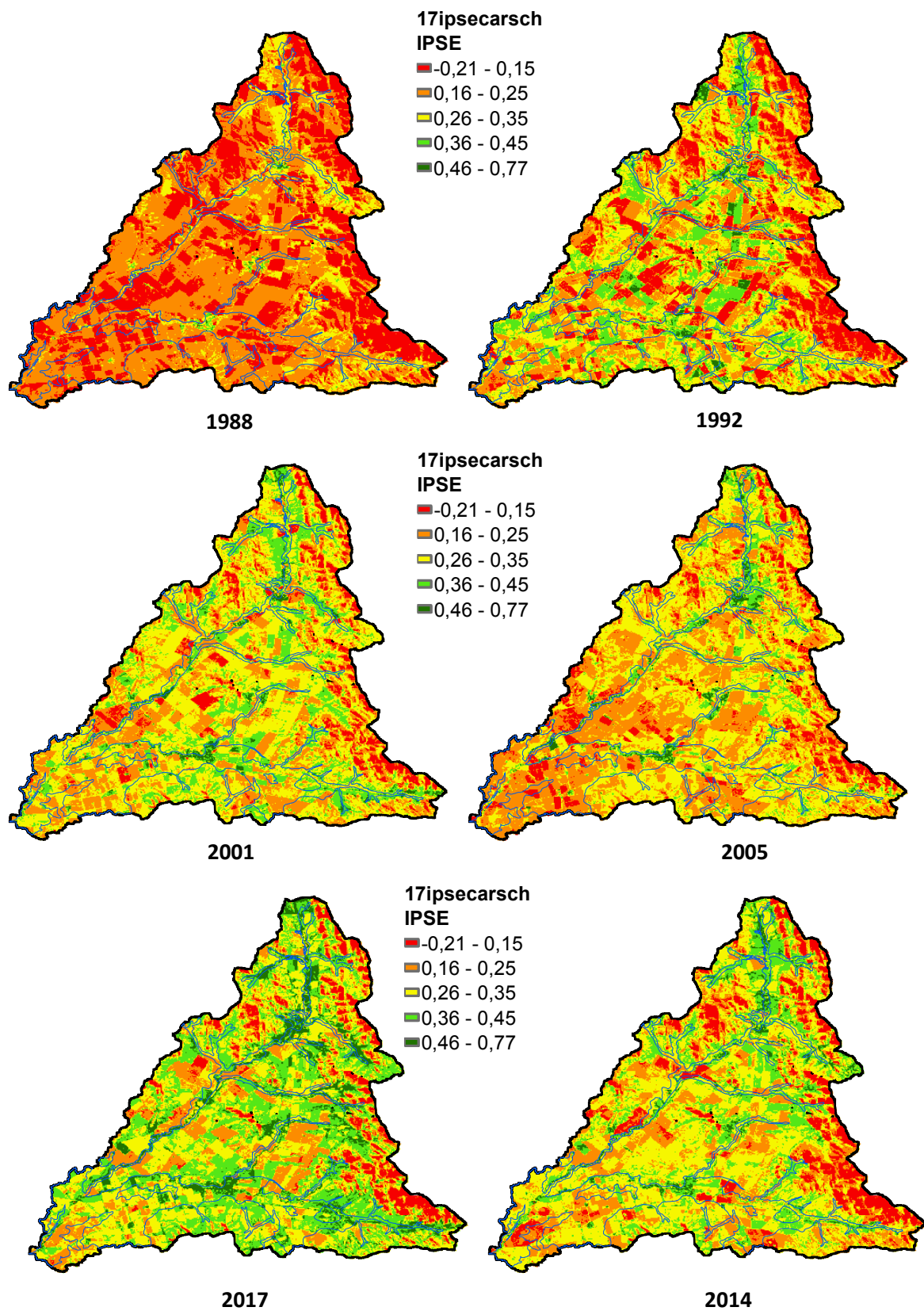


Figura 54. Variabilidad de IPSE en la CARSCH y en zonas potenciales de humedal. Años secos a la izquierda y derecha años húmedos.

Fuente: Elaboración propia.

## 6. CONCLUSIONES

Se realizó un primer reconocimiento y delimitación de zonas potenciales de humedal a partir de un análisis climático y morfológico de la cuenca alta del río Sauce Chico (CARSCH). Se integró aspectos tradicionalmente cubiertos por distintos estudios realizados tanto en la CARSCH como en sus inmediaciones. Los resultados de este análisis a escala de cuenca permitieron evaluar la situación temporal y espacial de los espacios potenciales de humedal, así como los servicios ecosistémicos principalmente de regulación que proporcionan. Para este proceso se incluyó el uso de imágenes satelitales e índices que derivan de ellas.

De la caracterización legal sobre las políticas hídricas existentes en las distintas escalas administrativas, principalmente sobre aquellas que protejan a los ecosistemas de humedal. Se determinó que la compleja organización político-administrativa de la Argentina incide notablemente en la administración de los recursos principalmente el agua y más aún sobre los ecosistemas de humedal, ya sea por superposición de instituciones, o la falta de áreas de acción claramente delimitadas. Cabe resaltar que en 1971 se firmó la convención Ramsar pero fue hasta el año 2017 que la Argentina cuenta con un libro que muestra Las Regiones de Humedales del país, que de alguna forma aglutina todos los esfuerzos particulares que se han realizado sobre estos ecosistemas y constituye una aproximación al inventario nacional de humedales. Realidad que no está lejos de la de otros países en América Latina.

En el caso de la provincia de Buenos Aires, el Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS) dio a conocer en junio de 2019, el primer informe de Sistemas de Humedales con miras al Inventario de humedales de la provincia. Como se puede ver existe un avance lento en términos de legislación que no va a la par de velocidad de degradación de los mismos.

La variabilidad climática mostró una disminución pluvial de Norte a Sur y del sistema serrano hacia el oeste. En los 30 años de caracterización se observó una tendencia a la disminución de los niveles de precipitación como lo muestra la Gráfica 7, que en los últimos 10 años (2008-2017) muestra escenarios de consumo de reserva útil y mayor frecuencia de eventos torrenciales y sequías, ya sea por agua excedente y en otros déficits.

Los análisis de los factores morfológicos de la CARSCH determinaron que se trata de una cuenca casi triangular con un relieve que varía entre muy plano y muy escarpado, cerca del 37% de superficie tiene una pendiente mayor al 12%. Estas condiciones dan origen a un patrón de drenaje dendrítico con mayor frecuencia de cauces de orden 1, que le confieren a la cuenca un comportamiento torrencioso en épocas de lluvia con arrastre de sedimentos. Este proceso de transporte de sedimentos se ve potenciado por la presencia de áreas con elevadas pendientes (8,5% de la superficie tiene una pendiente mayor al 50%) con roca aflorante asociado a materiales loessicos o eólicos y aluviales.

Si a las condiciones naturales de la CARSCH previamente descritas, le sumamos que en los últimos 30 años la actividad agropecuaria ha avanzado sobre áreas que poseen relictos de vegetación natural principalmente sobre valles longitudinales y zonas periserranas. Este incremento es de 3,08 km<sup>2</sup> al comparar 1989 de 2017 para una tormenta modal de 95mm. Esta situación eleva la pérdida de suelo por erosión pluvial a pesar de que entre los años 2005 y 2017 ha existido un auge en la aplicación de medidas conservacionistas como siembra en curvas de nivel.

La caracterización morfométrica, climática, de suelos y uso/cobertura de la CARSCH, mostró la heterogeneidad espacial y temporal del área de estudio que constituye una pequeña muestra del Sistema de Paisajes Serranos de Ventania como ha sido catalogado en el inventario provincial de humedales.

Los problemas ambientales detectados, como disminución de precipitaciones provocando balances hídricos negativos con eventos de exceso, pérdida de suelo por erosión hídrica superficial, pérdida de la cobertura vegetal nativa tanto en zonas de humedal como en áreas de pendiente escarpada, podrían atenuarse con el adecuado manejo y gestión considerando todos sus componentes bióticos y abióticos entre los que se incluyen sus características jurídicas, climáticas, geomorfológicas, cobertura /uso de suelo y la forma en como estos se relacionan. En este sentido se realizó la delimitación de zonas potenciales de humedal en base a modelos topográficos como ser los índices TWI y TPWI como un primer acercamiento, ya que muestran las áreas potenciales a acumular escorrentía tomando en cuenta la precipitación y topografía. Sobre esta base se consideró suelos con características edáficas pobres. La orientación de ladera también es un factor que contribuye a la formación de humedales, ya que en zonas áridas y semiáridas la disponibilidad de agua se ve afectada por la radiación solar que incide sobre la vegetación.

En la CARSCH se identificó un área potencial de humedal de aproximadamente 76 km<sup>2</sup>, que en los 30 años de estudio ha experimentado cambios en su cobertura natural por un avance de actividades agropecuarias y áreas semi urbanizadas. Los cambios principalmente se detectan entre 1989 y 2005. Las áreas más afectadas son vaguadas, llanuras de inundación y los valles longitudinales que acumulan el escurrimiento proveniente de las sierras.

Una manera de cuantificar el impacto ambiental de no conservar estos ecosistemas, es mediante índices espectrales que caracterizan el área de estudio por el comportamiento espectral de los distintos componentes de la cuenca y en especial de las zonas potenciales de humedal. De los múltiples índices que actualmente existen se seleccionó aquellos que caracterizan la fenología de la vegetación que guarda estrecha relación con la disponibilidad hidrológica, ciclo de carbono, contenido de humedad y evapotranspiración, finalmente como una forma de poder agrupar parte de esta variabilidad espacial y temporal se determinó el Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos (IPSE).

En general al considerar los promedios anuales de cada uno de los índices espectrales NDVI-I, NDVIcv, ET, NDWI se observa que al ser una cuenca semiárida los valores no son muy elevados, la mayor generación de biomasa se produce en las zonas delimitadas como potencial de humedal sea en años de mayor o menos precipitación ya que es corroborado por presentar valores máximos de NDVI-I de 0,76 y ET de 80 mm, de igual forma sucede con el contenido de humedad que presenta máximos de 0,58; lo cual resulta coherente considerando los otros factores. En consecuencia, el IPSE muestra algo similar con valores máximos superiores a 0,6. Además se observa el efecto de las prácticas de conservación aplicadas entre los años 2005 y 2014 reflejada por una recuperación en los valores de NDVI-I que en 1988 el valor promedio fue de 0,31 y en el 2017 de 0,42.

El índice de humedad NDWI muestra una gran variabilidad en toda la cuenca. En años considerados húmedos el valor promedio es de 0,10 y en secos de 0,02 en ambos casos con valores negativos y máximos superiores a 0,5. El rango de variación del DWI en la cuenca en 1988 fue de 0,75 y en el 2017 de 0,86. Esta tendencia a incrementarse el rango de variación podría ser un indicador que la cuenca cada vez acumula menos humedad. Sin embargo, en las zonas potenciales de humedal el rango de variación ha sido entre 0,78 y 0,80 con mayor extensión de zonas con valores máximos de NDWI. En el año 2014 que se presentaron eventos extremos aislados y como resultado en ese año se dio lugar sequías extremas en unos meses como lo reporta en su página web la Confederación de Asociaciones Rurales de la Provincia de Buenos Aires (CARBAP), pero a su vez ese mismo año se originó una gran inundación que genero cuantiosas pérdidas económicas como lo reportó el medio de comunicación La Nueva Provincia LNP el 31/10/14.

Las zonas potenciales de humedal resultan un componente muy importante para la cuenca en estudio como lo muestran el análisis de los índices espectrales que muestran que estas áreas

abarcan los valores máximos de actividad fotosintética proporcional a la cantidad de biomasa, también menor estacionalidad o variabilidad, de la misma forma sucede con el DWI. Esto demuestra su importancia en la provisión de servicios ecosistémicos de regulación ya que favorecen la infiltración, disminuyen la escorrentía, por lo tanto, ayudan a retención de los suelos que se pierden el incremento de la erosión hídrica superficial en toda la cuenca, sirven de almacén de carbono. Al estar ubicadas entre las cadenas de serranías Curamalal y Ventana no solo sirve de protección para los cauces al atenuar los eventos de inundación o sequía, sino de conexión entre estos ambientes naturales.

**Agradecimiento:**

Este trabajo fue financiado por el Proyecto N° 11/A286 denominado “Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense” de la Universidad Nacional de La Plata, del Programa de Incentivos a la Investigación del Ministerio de Educación de la Nación Argentina.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Albouy, R. & Bonorino, G. (1997). Hidrogeología de la cuenca superior del Río Sauce Chico. Sierras Australes. Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica de Argentina*. 52(1), 81-92. Recuperado de <https://books.google.com.ar/books?id=R-A33RuUAiUC&pg=PA92&ots=ZyUch3nIp9&dq=Contribuci%C3%B3n%20al%20mapa%20geohidrol%C3%B3gico%20de%20la%20provincia%20de%20Buenos%20Aires&pg=PA81#v=onepage&q&f=true>

Alconada, M. (2008). *Procesos de inundación en el sector de médanos longitudinales del noroeste de la provincia de Buenos Aires. Argentina. su relación con vegetación. suelo. agua y clima. Opciones de desarrollo* (Tesis doctoral). Recuperado de [https://repositorio.unam.mx/contenidos?c=r6XQLZ&q=Procesos . de . inundaci%C3%B3n . en . el . sector . de . m%C3%A9danos . longitudinales . del . noroeste . de . la . provincia . de . Buenos . Aires . . Argentina . . su . relaci%C3%B3n . con . vegetaci%C3%B3n . suelo . . agua . y . clima . . Opciones . de . desarrollo.&t=search\\_0&as=0&d=false&a=2&v=1](https://repositorio.unam.mx/contenidos?c=r6XQLZ&q=Procesos . de . inundaci%C3%B3n . en . el . sector . de . m%C3%A9danos . longitudinales . del . noroeste . de . la . provincia . de . Buenos . Aires . . Argentina . . su . relaci%C3%B3n . con . vegetaci%C3%B3n . suelo . . agua . y . clima . . Opciones . de . desarrollo.&t=search_0&as=0&d=false&a=2&v=1)

Andrade, M., Iezzi, L., & Laporta, P. (2009). Sequías en el sudoeste bonaerense: Vulnerabilidad e incertidumbre. *E-Revista Geograficando*, 5(5), 214-230. Recuperado de [http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/art\\_revistas/pr.4450/pr.4450.pdf](http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/art_revistas/pr.4450/pr.4450.pdf)

Ángeles, G. & Gil, V. (2006). Identificación del grado de transformación antrópica y riesgo ambiental en cuencas fluviales serranas. El caso de la cuenca del arroyo El Belisario (Argentina). *E-Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (6), 139,146. Recuperado de <http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/92>

Arbeláez, A., Vélez, M. & SMITH, R. (1997). Diseño hidrológico con información escasa un caso de estudio: Río San Carlos. *Revista Avances en Recursos Hidráulicos*. N°4. pp 1-20. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/6048/>

Avila, L., Fulvio, C., Minoli, I. & Morando, M. (2012). A new species of Homonota (Reptilia : Squamata: Gekkota: Phyllodactylidae). *E-Zootaxa*, 3431, 19-22. Recuperado de <https://biotaxa.org/Zootaxa/article/view/zootaxa.3709.2.4/0>

Babbar-Sebens, M., Barr, R., Tedesco, L. & Milo, A. (2013). Spatial identification and optimization of upland wetlands in agricultural watersheds. *E-Ecological Engineering*, 52, 130-142. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.085

Basterrechea, M., Dourojeanni, L., García, L., Novara, J. & Rodríguez, R. (1996). *Lineamientos para la preparación de proyectos de manejo de cuencas hidrográficas*. Inter-American Development Bank. Inter-American Development Bank (Ed.). Recuperado de <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15939/lineamientos-para-la-preparacion-de-proyectos-de-manejo-de-cuencas-hidrograficas>

Benzaquen, L., Blanco, D., Bo, R., Kandus, P., Lingua, G., Minotti P. & Quintana R. (2017). Regiones de Humedales de la Argentina. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Fundación Humedales/Wetlands International, Universidad Nacional de San Martín & Universidad de Buenos Aires, (pp 21-22). Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/regioneshumedbaja2.pdf>

Beven, K. & Kirkby, M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *E-Hydrological Sciences Journal*. 24(1), 43-69. 10.1080/02626667909491834

Bransby, W. (1922). Flood discharge and the dimensions of Spillways in India. *Journal The Engineer*. 321-322. Recuperado de [https://drive.google.com/file/d/0Byy0dkN8g\\_n7YzBOOFRjbmZJS1E/view](https://drive.google.com/file/d/0Byy0dkN8g_n7YzBOOFRjbmZJS1E/view)

Bruno, J., Gaspari, F., Presutti, M., Oroná, C. & Cornelly, I. (1999). *Manejo Integral de las Cuencas Hidrográficas del Partido de Tornquist. Estudio de Prefactibilidad*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina, p.120.

Cabrera A. (1968). *Flora de la Provincia de Buenos Aires*. Colección Científica INTA. Tomo IV (1).

California Department of Public Works. (1960). *California Culvert Practice*. Sacramento (Ed.). 2nd.

Campo, A., Aldalur, N., & Fernández, S. (2011). Morfometría fluvial aplicada a una cuenca urbana en Ingeniero White, República Argentina. *Investigaciones geográficas*, (77). Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112012000100002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100002)

Campo, A., Gil, V., Gentili, J., Volonté, A. & Duval, V. (2011). Inventario de eventos climáticos-meteorológicos extremos. Suroeste bonaerense (1995-2010). *E- Párrafos Geográficos*, 1, 102-116. Recuperado de [http://igeopat.org/parrafosgeograficos/images/RevistasPG/2011\\_V10\\_1/15-7.pdf](http://igeopat.org/parrafosgeograficos/images/RevistasPG/2011_V10_1/15-7.pdf)

Campo, A., Gil, V., Ybarra, G. & Volonté, A. (2016). Tipificación Morfológica De Cursos Principales. Cuenca Del Arroyo El Negro, Sistema De Ventania, Argentina. *E-Boletín Geográfico*, (38), 49-60. Recuperado de [bibliocentral.uncoma.edu.ar/revele/index.php/geografia/index](http://bibliocentral.uncoma.edu.ar/revele/index.php/geografia/index)

Campo, A., Rosell, P., Benedetti, G. & Gil, V. (abril, 2012). Geografía Física del suroeste bonaerense. Trabajo presentado en *IX Jornadas Nacionales de Geografía Física*. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

Campo, A., Silva, A. & Gil, V. (2016). Aplicación de cartografía temática para identificación y análisis de exposición al peligro de inundación por crecidas repentinas. Sierra de la Ventana, Buenos Aires Argentina. *E- Revista Geográfica del Sur*, 73-86. Recuperado de <http://www.revgeosur.udec.cl/?p=114>

Casado, A. & Campo, A. (2019). Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *E-Cuadernos Geográficos*, 58(1), 6-26. doi: 10.30827/cuadgeo.v58i1.6751

Céliz, Y. & Maidana, E. (septiembre, 2019). Transformaciones ambientales en interfases antrópicas: análisis del área metropolitana de Córdoba a través de Google Earth Engine. Trabajo presentado en *CAI, Congreso Argentino de Agroinformática 48JAIIO*. Salta, Argentina.

- Chow, V., Maidment, D. & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGrawHill (Ed.), Bogotá. 584.
- Clark, C. (1945). Storage and the Unit Hydrograph. *American Society of Civil Engineers*. Vol 69. pp 1333-1360.
- Clayton, B., Leidjane, M., Machado, J., Villar, A., Gusmão, L. & Borba, D. (2018). Avaliação de índices de vegetação e características fisiográficas no Sertão Pernambucano. *E-Revista Brasileira de Medio Ambiente*, 4(1), 97-107. Recuperado de <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/104/119>
- Confederación de Asociaciones Rurales de la Provincia de Buenos Aires (CARBAP). Recuperado de <http://www.carbap.org/Sitio/AccGremialPub/Emergencia.asp>
- Comisión Nacional de Actividades Espaciales CONAE. (2013). Índices espectrales derivados de imágenes satelitales. Recuperado de <https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf>
- Cortés, S., Piovano, E. & Gurvich, D. (octubre, 2014). Ecohidrología en cuencas de montaña sometidas a diferentes usos del suelo: presentación de un estudio que se está desarrollando en las Sierras de Córdoba. Trabajo presentado en *2do. Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.
- Cruz, B. (2015). Modelización hidrológica de la cuenca alta del río Sauce Chico. [Dataset]. Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. FCAYF de la Universidad Nacional de la Plata.
- Cruz, B., Gaspari, F., Rodríguez, A., Carrillo, F. & Téllez, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *E- Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26-32. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67441039004>
- Delgado, I. (2009). *Estudio de la dinámica del ciclo hidrológico en sitios forestados, en el sistema serrano bonaerense de Ventania, Argentina* (Tesis de maestría). FCAYF de la Universidad Nacional de la Plata.
- Díaz, C., Mamadou Bâ, K., Iturbe, A., Esteller, M., & Reyna, F. (1999). Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *Ciencias Exactas y Aplicadas*, 6(2).
- Díaz, A., Gaspari, F. & Georgieff, S. (2017). Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina. *Acta geológica lilloana*. 29(1), 4-19.
- Espósito, M., Zalba, P., Ribet, D., Blanco, M. & Amiotti, N. (2016). Efectos del riego con aguas de elevados contenidos de As sobre la disponibilidad de micronutrientes. Trabajo presentado en el *XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Farfán, F., Urbina, L., Ferreira, S. & Brandan, M. (2010). Caracterización y red de drenaje de la Subcuenca del Río Tin-Tin, PN. Los Cardones, Salta. *E- Revista Ciencia*, 5 (16), 8-20. Recuperado de <http://www.exactas.unca.edu.ar/revista/v160/pdf/ciencial6-1.pdf>
- Fernández, S., Sequeira, M., Espósito, M. & Paolini, J. (2015). Estudio del comportamiento fluviométrico e hidrológico superficial de una cuenca del sur de la Región Pampeana con datos



limnigráficos diarios instantáneos: caracterización hídrica para los fines del riego. *E-Cuadernos de Curiham*, (Vol. 21), 42-53. Recuperado de <https://rephip.unr.edu.ar/handle/2133/7137>

Ferrér, M., Rodríguez, J. & Estrela, T. (1995). Generación automática del Número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del agua*, 2(4),45. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/39431260\\_Generacion\\_automatica\\_del\\_numero\\_de\\_curva\\_con\\_sistemas\\_de\\_informacion\\_geografica](https://www.researchgate.net/publication/39431260_Generacion_automatica_del_numero_de_curva_con_sistemas_de_informacion_geografica)

Frangi, J. & Bottino, O. (1995). Comunidades Vegetales de Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Plata*, 71(1), 93-113.

Fundación de la Universidad Nacional del Sur FUNS (2011). *Prefactibilidad e sistematización y aprovechamiento de la cuenca del Río Sauce Chico*. FUNS. Recuperado de <http://biblioteca.cfi.org.ar/documento/prefactibilidad-de-sistematizacion-y-aprovechamiento-de-la-cuenca-del-rio-sauce-chico-provincia-de-buenos-aires/>

Gaspari, F. (2007). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (S.I.G.)* (Tesis de maestría). Universidad Internacional de Andalucía sede Iberoamericana Santa María de la Rábida. España.

Gaspari, F., & Bruno, J. (2003). Diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napostá Grande. *E-Revista Ecología Austral*, (13), 111,118. Recuperado de [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/ecologiaaustral/document/ecologiaaustral\\_v013\\_n01\\_p109](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/ecologiaaustral/document/ecologiaaustral_v013_n01_p109)

Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, I. & Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Universidad de La Plata (Ed.). 1ª ed. La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Gessler, P., Moore, I., Mckenzie, N. & Ryan, P. (1995). Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *E-International Journal of Geographical Information Systems*.9(4), 421-432. doi: 10.1080/02693799508902047

Gil, V., (2009). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al Peligro de crecidas* (Tesis de doctoral). Recuperado de [http://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/123456789/2069/1/TESIS\\_GIL.pdf](http://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/123456789/2069/1/TESIS_GIL.pdf)

Gil, V., Gentili, J., Campo, A., Jelinski, G. & Crisafulli, M. (octubre, 2016). Evaluación del peligro potencial de crecidas en cuencas serranas. Sistema de Ventania, provincia de Buenos Aires. Trabajo presentado en el 3er. *Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.

Gobierno de la Provincia de Buenos Aires. (2018). *Normas de la Provincia de Buenos Aires*. Recuperado de <http://www.gob.gba.gov.ar/dijl/#116/00>

Gonzalez, J. & Raventos, B. (1992). Efectos de la exposición de ladera y pendiente en la evaluación de la demanda atmosférica potencial. Un ejemplo de cálculo en el semiárido aragonés (La Violada, Huesca). *E- Cuadernos I. Geográfica*, 18, 29-46. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=81498>

González, M. (enero, 1984). Características geomorfológicas de la porción continental que rodea que rodea a la bahía blanca. Trabajo presentado en el *IX Congreso Geológico Argentino*, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.

Hauri, B. (2006). *Determinación de la erosión hídrica superficial asociada al uso del suelo en la cuenca hidrográfica del arroyo Belisario, Tornquist, Buenos Aires* (Tesis de maestría). FCAyF de la Universidad Nacional de la Plata.

Horton, R. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 38(6), 275-370.

Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L. & Zhang, H. (2017). Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *E- Journal Science of the Total Environment*, 586, 319-327. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2015). *Tal vez tu no sepas lo que es una cuenca*. Recuperado de [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/tal-vez-tu-no-sepas-cuenca/files/assets/basic-html/index.html#5](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/tal-vez-tu-no-sepas-cuenca/files/assets/basic-html/index.html#5)

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA, (1990). *Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000 y 1:1.000.000*. CIRN. Instituto de Evaluación de Tierras. Buenos Aires. Tomo I.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. (2018). *Cartas de suelos de la Provincia de Buenos Aires*. Recuperado de <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm>

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. (2019). *Cartas de suelos actualizada del Suroeste de la Provincia de Buenos Aires*. [Comunicación personal].

Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Analisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*. XIX, 41-60. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/39036417.pdf>

Khurana, D., Rawat, G., Raina, R., Sharma, R. & P, J. (2019). GIS-Based Morphometric Analysis and Prioritization of Upper Ravi Catchment, Himachal Pradesh, India. *E- Advances in Water Resources Engineering and Management*, 39, 163-185. doi: 10.1007/978-981-13-8181-2\_13

La Nueva Provincia LNP, 31/10/14. "El agua bajaba con una fuerza impresionante", dijo un productor de Cerri. Recuperado de <https://www.lanueva.com/nota/2014-10-31-0-59-0--el-agua-bajaba-con-una-fuerza-impresionante-dijo-un-productor-de-cerri>

Lizzi, J., Garbulsky, M. F. & Golluscio, R. (2007). Mapeo indirecto de la vegetación de Sierra de la Ventana, provincia de Buenos Aires. *E-Revista Ecología Austral*, 17 (2), 217-230. Recuperado de [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/greenstone3/exa/collection/ecologiaaustral/document/ecologiaaustral\\_v017\\_n02\\_p217](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/greenstone3/exa/collection/ecologiaaustral/document/ecologiaaustral_v017_n02_p217)

López, V., Zedillo, P., Soonyoo, A., González, E. & Cano, Z. (2012). Efecto de la orientación de la ladera sobre la estructura poblacional y ecomorfología de *Neobuxbaumia Tetetzo*

(cactaceae). *E- Botanical Sciences*, 90(4), 453-457. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/bs/v90n4/v90n4a5.pdf>

Mandale, V. & Bansod, R. (2019). Quantitative Morphometric Analysis of the Adula Watershed, in Ahmednagar Maharashtra Using the ESRI- ArcGIS Tool. *E-Current Journal of Applied Science and Technology*. 36(5), 1-10. doi: 10.9734/cjast/2019/v36i530252

Mármol, L., (2008). Introducción al manejo de cuencas hidrográficas y corrección de torrentes. Facultad de Ciencias Naturales: Universidad de Salta.

Martínez, B., Gil, V., Carbone, M. & Simeón, C. (2016). Caracterización Del patrón hidromorfológico del arroyo de la Ventana en su tramo medio alto. *E-Estudios Geográficos*, 281, 521-541. doi: 10.3989/estgeogr.201617

Michalijos, M. & Zapperi, P. (2015). Análisis morfométrico aplicado a la caracterización de redes fluviales para la gestión de peligro de incendios forestales. *E- Revista del Departamento de Geografía*, 15, 53-70. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/65070>

Ministerio de Justicia y Derechos Humano de la Presidencia de la Nación Argentina. (2018). *Informacion legislativa (InfoLEG)*. Recuperado de <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/0-4999/804/norma.htm>

Moretto, B., Gentili, J., Ortuño, M. & Campo, A. (2018). El agua: recurso y peligro. Análisis normativo-institucional para la vertiente norte del Sistema de Ventania (Argentina). *E- Geográfica digital*, 16, 29. doi: 10.30972/geo.16313598

National Research Council. (1995). *Wetlands: Characteristics and Bundaries*. Washington, DC. doi: 10.17226/4766. Recuperado de <http://nap.edu/4766>

Navarro, E. & Cano, D. (2017). Análisis morfométrico comparativo de los tramos superiores de las cuencas de los arroyos Sauce Chico, Napostá y Sauce Grande, Sierras Australes, uso de técnicas digitales. Trabajo presentado en el *IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017*. Quilmes, Buenos Aires, Argentina.

Oficina de Riesgo Agropecuario ORA. (2019). *Zonas homogéneas de capacidad de producción*. Recuperado de [http://www.ora.gob.ar/riesgo\\_zonas.php](http://www.ora.gob.ar/riesgo_zonas.php)

Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible OPS. (2019). *Inventario de Humedales de la Provincia de Buenos Aires. Nivel 2: Sistemas de Paisajes de Humedales – Primer Informe*, 1ª Ed, La Plata. Buenos Aires, Argentina.

Palmeri, L. & Trepel, M. (2002). A GIS-Based score system for siting and sizing of created or restored wetlands: two case studies. *E-Water Sources Management*, 16, 307-328. doi: 10.1023/A:1021947026234

Paruelo, J. (2008). La Caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *E-Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 17(3),4-22. Recuperado de <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=575>

Paruelo, J., Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, M. L. & Gallego, F. (2016). An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *E-Ecological Indicators*, 71, 145-154. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.06.054

Pascual, M., Fernández, E., Quintana, G. & J. del Arco, M. (2017). Efecto de la inclinación y pedregosidad sobre el reparto del agua de lluvia, su cuantificación y aplicación al estudio de la vegetación en zonas áridas. *E-Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 92, 51-63. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0188461117300286>

Pérez, C. (1995). *Productividad en pastizales serranos a lo largo del gradiente altitudinal* (Tesis doctoral). Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/4660>

Picardi, M. & Giacchero, A. (2015). Productividad de la tierra agrícola en el sudoeste bonaerense. *E- Estudios Económicos*, 32(65). Recuperado de [http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2525-12952015002200004&lng=en&nrm=iso](http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2525-12952015002200004&lng=en&nrm=iso)

Pilgrim, H. & McDermott, G. (1982). Design flood estimation for small catchments in new South Wales. *Australian Water Resources Council Technical Paper*, 73. Recuperado de <https://www.dropbox.com/s/tv2dnr5hv9oz03d/McDermott-Pilgrim-1982-AWRCTechPaperNo73.pdf?dl=0>

Ramos, V., Chemale, F., Naipauer, M. & Pazos, P. (2014). A provenance study of the Paleozoic Ventania System (Argentina): Transient complex sources from Western and Eastern Gondwana. *E- Gondwana Research*, 26, 720-740. doi: 10.1016/j.gr.2013.07.008

Ramsar Convention on Wetlands. (2015). Humedales: ¿por qué cuidarlos?. E-Ficha informativa (1), 1-2. Recuperado de: [https://www.ramsar.org/es/search?search\\_api\\_views\\_fulltext=FICHA+INFORMATIVA](https://www.ramsar.org/es/search?search_api_views_fulltext=FICHA+INFORMATIVA)

Ramsar Convention on Wetlands. (2018). Status and Trends. N. Dudley (Ed.), *Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People*, 5. Recuperado de [https://www.besnet.world/sites/default/files//mediafile/RAMSAR%20BGWO\\_ENGLISH\\_WEB.pdf](https://www.besnet.world/sites/default/files//mediafile/RAMSAR%20BGWO_ENGLISH_WEB.pdf)

Rodríguez, M., Armendáriz, L. & Capítulo, A. (2017). A new genus and species of Ingolfiellidae (Crustacea, Ingolfiellida) from the hyporheic zone in the Sierra de la Ventana, and its biogeographic relevance. *E- Zootaxa*, 1-5. doi: 10.11646/zootaxa.4290.1.5

Rouse, J., Haas, R., Schell, J. & Deering, D. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (Eds). Trabajo presentado en Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, D.C., pp. 309-317.

Sánchez, J. (2018). *Evapotranspiración*. Recuperado de <http://hidrologia.usal.es/temas.html>

Schulz, G., Irigoien, J., Morales, C., & Paladino, I. (abril, 2012). Aplicación del Índice de Productividad Unificado para la Hoja Lajitas, Salta. Trabajo presentado en *XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina. (2017). *Informe del estado del ambiente*. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/noticias/informe-del-estado-del-ambiente>.

Secretaría de Infraestructura y política hídrica. (2017). *Plan Nacional del Agua*. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/interior/secretaria-de-infraestructura-y-politica-hidrica/politica-hidrica>

Sfeir, A., Oliva, C. & Devoto, M. (2013). Distribución del registro monumental presente en el sistema serrano de Ventania y su relación con las poblaciones actuales. *E- Anuario de Arqueología*, (5), 428-430. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/61705269.pdf>

Snyder, F. (1938). Syntethic Unit Graphs. Transaction of the American Geophysical Union. *E-Hydrology*. Estados Unidos. doi: 10.1029/TR019i001p00447

Telefe Bahía Blanca TBB, 27/02/13. *Cerri, inundación del arroyo Sauce Chico en 1973*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=bxFJn0FoyfI>.

Témez, J. (1991). Extended and improved Rational Method. Trabajo presentado en el *XXIV Congress*. Madrid, España.

Thanh Noi, P., & Kappas, M. (2017). Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. *Sensors* (Basel, Switzerland), 18(1). <https://doi.org/10.3390/s18010018>

Thornthwaite, C. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.

Tomezzoli, R. N., & Cristallini, E. O. (2004). Secciones estructurales de Las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires: Repetición de la secuencia estratigráfica a partir de fallas inversas. *Revista de La Asociacion Geologica Argentina*, 59(2), 330–340.

Torrero, M. (2009). *Río Sauce Chico: Estudio hidrográfico para un desarrollo sustentable* (Tesis doctoral). Recuperado de <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/123456789/1978/1/Torrero.pdf>

United States Department of Agriculture. (1999). *A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2nd ed. Recuperado de <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/survey/class/taxonomy/>

Valencia, C. & Zuluaga, O. (1981). *Estudio preliminar del tiempo de concentración en algunas cuencas de Antioquia* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Colombia. sede Medellín.

Vélez, J. & Botero, A. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *E-DYNA*, 78(165), 58-71. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640/39138>

Vich, A. (1999). *Aguas continentales. Formas y procesos. Manual de aplicaciones prácticas*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Alberto\\_Vich/publication/305937829\\_Aguas\\_continentalas\\_For](https://www.researchgate.net/profile/Alberto_Vich/publication/305937829_Aguas_continentalas_For)

mas\_y\_procesos\_Manual\_de\_Aplicaciones\_practicas\_Glosario\_realizado\_con\_Juana\_Susana\_Barroso/links/57a65e4108ae3f4529338422/Aguas-continentales-For

Villa Serrana, 2003. Recuperado de <https://www.sierrasdelaventana.com.ar/localidades/villa-serrana-la-gruta/>

Waikar, M., & Nilawar, P. (2014). Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system : a case study. *International Journal Multidisciplinary and Current Research*, (2012), 179–184.

Walters, M. & Babbar-Sebens, M. (2016). Using climate change scenarios to evaluate future effectiveness of potential wetlands in mitigation high flows in a Mindwestern U.S. watershed. *E-Ecological Engineering*, 89, 80-102. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.014

White, D. & Fennessy, S. (2005). Modeling the suitability of wetland restoration potential at the watershed scale. *E-Ecological Engineering*, 24, 359-377. doi: 10.1016/j.ecoleng.2005.01.012

Wilson, J., Chandrasekar, N., & Magesh, N. (2012). Morphometric Analysis of Major Sub-Morphometric Analysis of Major Sub- Watersheds in Aiyar & Karai Pottanar Basin , Central Tamil Nadu , India Using Remote Sensing & GIS Techniques. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2(May 2016), 8–15.

## 8. ANEXOS

### 8.1. SCRIPT PARA CLASIFICACIÓN DE USO DE SUELO

```
Map.centerObject(area_estudio,11);
var imagen_filtrada = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA")
    .filterBounds( area_estudio )
    .filterDate('2017-05-01', '2019-07-31')
    .filterMetadata('CLOUD_COVER','less_than',15);
print("Coleccion seleccionada", imagen_filtrada);
var stack = imagen_filtrada.median();
Map.addLayer(stack.clip(area_estudio),vis543,'MEDIANA',0);

//NDVI
var ndvi = stack.expression('float((nir - red)/(nir + red))', {
'nir': stack.select('B5'),
'red': stack.select('B4'),
});
Map.addLayer(ndvi.clip(area_estudio), {min:-1, max:+1, palette:["FFFFFF", "CE7E45",
"DF923D", "F1B555", "FCD163","99B718", "74A901", "66A000", "529400", "3E8601",
"207401", "056201", "004C00", "023B01", "012E01", "011D01", "011301"]
},"NDVI",0);
stack = stack.addBands(ndvi);

//TOPOGRAFÍA
var dem=DEM;
Map.addLayer(dem.clip(area_estudio),null,'DEM',0);
print("dem",dem);
stack = stack.addBands(dem);
print("compilado",stack);

//CLASIFICACION
var bandas_sel = ['B2','B3','B4','B5','B6','B7','B9','NDVI','b1'];
var stack= stack.select(bandas_sel);

//MÁSCARA
var maskInside1 = function(stack, urb) {
    var maskurb = ee.Image.constant(1).clip(urb).mask().not();
    return stack.updateMask(maskurb)};
var tools = require('users/fitoprincipe/geetools:tools');
var stack = tools.geometry.maskInside(stack, urb);

var samples = table5;
// ver características de FeatureCollection
print ("muestras", samples);
Map.addLayer(samples,null,'samples',0);
var seed =4000;
```

```

samples = samples.randomColumn('random',seed );
print ("samples",samples);
var set_datos = stack.sampleRegions({
  // Get the sample from the polygons FeatureCollection.
  collection: samples,
  // Keep this list of properties from the polygons.
  properties: ['ID_Class','random'],
  scale: 30});
// Separación entre Entrenamiento y validación. Identificar umbral de separación
var training = set_datos.filterMetadata('random', 'less_than', 0.85);
var testing = set_datos.filterMetadata('random', 'not_less_than', 0.85);

//RANDOM FOREST (RF)
var clasificadorRF = ee.Classifier.smileRandomForest(90);
var trainedRF = clasificadorRF.train(training, 'ID_Class', bandas_sel);

var classifiedRF = stack.select(bandas_sel).classify(trainedRF).clip(area_estudio);
Map.addLayer(classifiedRF,imageVisParam4,'Clasificacion RF',0);

//VALIDACIÓN
//RANDOM FOREST (RF)
var validationRF = testing.classify(trainedRF);
var errorMatrixRF = validationRF.errorMatrix('ID_Class', 'classification');

print('Matriz de ConfusiónRF:', errorMatrixRF);
print('Exactitud GeneralRF:', errorMatrixRF.accuracy());
print('Indice KappaRF:', errorMatrixRF.kappa());
print('Exactitudes de Usuario RF:', errorMatrixRF.consumersAccuracy());
print('Exactitudes de Productor RF:', errorMatrixRF.producersAccuracy());

Export.image.toDrive({image: classifiedRF,
description: ' classifiedRF ',
folder:'CONGRESO',
region: area_estudio,
maxPixels: 1e9,
scale: 30,
fileFormat:'GeoTIFF',
});

```

## 8.2. NUMERO DE CURVA

A través de las distintas combinaciones de cobertura vegetal y/o uso de suelo, condiciones de humedad antecedente y permeabilidad del suelo se puede realizar la estimación del NC mediante el uso de las siguientes tablas:



Número de curva para condiciones media de humedad.

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Barbecho R	>= 3	77	68	89	93
Barbecho N	>= 3	74	82	86	89
Barbecho R/N	< 3	71	78	82	86
Cultivos en hilera R	>= 3	69	79	86	89
Cultivos en hilera N	>= 3	67	76	82	86
Cultivos en hilera R/N	< 3	64	73	78	82
Cereales de invierno R	>= 3	63	75	83	86
Cereales de invierno N	>= 3	61	73	81	83
Cereales de invierno R/N	< 3	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres R	>= 3	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres N	>= 3	64	75	82	86
Rotación de cultivos pobres R/N	< 3	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos R	>= 3	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos N	>= 3	54	69	78	82
Rotación de cultivos densos R/N	< 3	52	67	76	79
Pradera pobre	>= 3	68	78	86	89
Pradera media	>= 3	49	69	78	85
Pradera buena	>= 3	42	60	74	79
Pradera muy buena	>= 3	39	55	69	77
Pradera pobre	< 3	46	67	81	88
Pradera media	< 3	39	59	75	83
Pradera buena	< 3	29	48	69	78
Pradera muy buena	< 3	17	33	67	76
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	>= 3	45	66	77	83
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	>= 3	39	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	>= 3	33	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	< 3	40	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	< 3	35	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	< 3	25	50	67	76
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy clara		56	75	86	91
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) clara		46	68	78	83
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) media		40	60	69	76
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) espesa		36	52	62	69
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy espesa		29	44	54	60
Rocas permeables	>= 3	94	94	94	94
Rocas permeables	< 3	91	91	91	91
Rocas impermeables	>= 3	96	96	96	96
Rocas impermeables	< 3	93	93	93	93

R: Cultivo sigue la línea de máxima pendiente

N: El cultivo sigue la curva de nivel.

Fuente: Ferrér, Rodríguez & Estrela (1995)

Numero de curva para condiciones media de humedad

Cobertura vegetal y/ó uso del suelo	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Barbecho	77	86	91	94
Cultivos alineados R P	72	81	88	91
Cultivos alineados R B	67	78	85	89
Cultivos alineados C P	70	79	84	88
Cultivos alineados C B	65	75	82	86
Cultivos alineados C-T P	66	74	80	82
Cultivos alineados C-T B	62	71	78	81
Cultivos no alineados o surcos pequeños R P	65	76	84	88
Cultivos no alineados o surcos pequeños R B	63	75	83	87
Cultivos no alineados o surcos pequeños C P	63	74	82	85
Cultivos no alineados o surcos pequeños C B	61	73	81	84
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T P	61	72	79	82
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T B	59	70	78	81
Cultivos densos leguminosas R P	66	77	84	88
Cultivos densos leguminosas R B	58	72	81	85
Cultivos densos leguminosas C P	64	75	83	85
Cultivos densos leguminosas C B	55	69	78	83
Cultivos densos leguminosas C-T P	63	73	80	83
Cultivos densos leguminosas C-T B	51	67	76	80
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50%	48	67	77	83
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50-75%	35	56	70	77
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta >75%	30	48	65	73
Montes con pastos P	45	66	77	83
Montes con pastos R	36	60	73	79
Montes con pastos B	25	55	70	77
Bosques MP	56	75	86	91
Bosques P	46	68	78	84
Bosques R	36	60	70	76
Bosques B	26	52	63	69
Bosques MB	15	44	54	61
Prados permanentes	30	58	71	78
Pastizal P	68	79	86	89
Pastizal R	49	69	79	84
Pastizal B	39	61	74	80
Pastizal C P	47	67	81	88
Pastizal C R	25	59	75	83
Pastizal C B	6	35	70	79
Residencial baja densidad	54	70	80	85
Residencial alta densidad	77	85	90	92
Superficies impermeables	98	98	98	98
Espejos de agua	0	0	0	0

*R: Laboreo sin prácticas de conservación*

*C: Curvas de nivel*

*C-T: Curvas de nivel y Terrazas abiertas*

*MP: Condición de infiltración muy pobre*

*P: Condición de infiltración pobre*

*M: Condición de infiltración regular*

*B: Condición de infiltración buena*

*MB: Condición de infiltración muy buena*

Fuente: Gaspari et al. (2013)

### 8.3. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO U.S.L.E.

#### 8.3.1. Parámetros requeridos

El valor del factor C (efecto de cobertura) se asume a partir de la tabla elaborada por Wischmeier. Presenta valores medios anuales del factor C.

Factor C.

Cubierta vegetal		Cubierta en contacto con el suelo						
Tipo y altura de cubierta	% recubrimiento	Tipo	Porcentaje de cobertura del suelo					
			0	20	40	60	80	95-100
Cubierta inapreciable y matorros ( $\leq 0,5$ cm)	25	G	450	200	100	042	013	003
		W	450	240	150	090	043	011
		G	360	170	090	038	012	003
		W	360	200	130	082	041	011
Plantas herbáceas y matorros ( $\leq 0,5$ cm)	50	G	260	130	070	035	012	003
		W	260	160	110	075	039	011
		G	170	100	060	031	011	003
		W	170	120	090	067	038	011
Matorral ( $\leq 2$ m)	25	G	400	130	090	040	013	003
		W	400	220	140	085	042	011
		G	340	160	085	038	012	003
		W	340	190	130	081	041	011
Matorral ( $\leq 2$ m)	50	G	340	160	085	038	012	003
		W	340	190	130	081	041	011
		G	280	140	080	036	012	003
		W	280	170	120	077	040	011
Arbolado joven, sin matorral apreciable ( $\leq 4$ m)	25	G	420	190	100	041	013	003
		W	420	230	140	087	042	011
		G	390	180	090	040	013	003
		W	390	210	140	083	042	011
Arbolado joven, sin matorral apreciable ( $\leq 4$ m)	50	G	390	180	090	040	013	003
		W	390	210	140	083	042	011
		G	360	170	090	039	012	003
		W	360	200	130	083	041	011

Valores de Factor C x 10<sup>-3</sup> para pastizales, matorrales y arbustos.

G: cubierta vegetal en contacto con el suelo, formada por pastizal de al menos 5 cm de humus.

W: cubierta vegetal en contacto con el suelo compuesta por herbáceas con restos sin descomponer.

Fuente: Gaspari et al. (2013)

Para la asignación de valores del factor P (prácticas de cultivo) se hizo uso de tablas elaboradas por el Soil Conservation Service de Estados Unidos.

Factor P

Pendiente (%)	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas	
			Terrazas de desagüe	Terrazas de infiltración
2 – 7	0,50	0,25	0,10	0,05
8 – 12	0,60	0,30	0,12	0,05
13 – 18	0,80	0,40	0,16	0,05
19 – 24	0,90	0,45	0,18	0,06

Fuente: Gaspari et al. (2013)

### 8.3.2. Resultados del factor K.

La Tabla muestra los parámetros necesarios para la estimación del factor K conocido como factor de erodabilidad del suelo. En el caso de la categoría Roca, por verificaciones a campo y en base a el estudio realizado por Gaspari (2002), se decidió tratarlo como un suelo hapludol lítico. misma área

Parámetros para determinar erodabilidad del suelo (K<sub>i</sub>).

Suelo	Arcilla	Limo	Arena muy fina	Factor M	% MO *. Factor a	Código de estructura Factor b	Código de permeabilidad Factor c	Factor de erosionabilidad Factor K <sub>i</sub> (Mg.m <sup>2</sup> *h/ha*J*cm)
AoCM	35,1	38,4	26,5	4212,01	2,12	1	6	0,42
Bo1	15,8	25,27	13,68	3279,59	1,523	3	4	0,31
CdChi	11,6	22	18,9	3615,56	2,22	3	3	0,34
CMa1	24,4	38,7	31,1	5276,88	3,7	3	4	0,47
Dfr1	18,3	24,2	38,7	5138,93	1,7	2	3	0,47
Duf	18,3	24,2	38,7	5138,93	1,7	2	3	0,47
Erz6 o TP1	16,6	45,7	16,6	5195,82	2,7	3	3	0,48
Erz7 O TP2	16,6	45,7	16,6	5195,82	2,7	3	3	0,48
FA2	27,8	32,7	39,5	5212,84	4,03	2	3	0,37
ROCA (hApludol lítico , franco)	29	29,2	39	4842,2	4,36	4	1	0,35
Npa1 o SGr1	24,6	39,2	36,2	5685,16	7,79	2	3	0,22
Npa2 o SGr2	24,6	39,2	36,2	5685,16	7,79	2	3	0,22
Tor1	11,6	22	18,9	3615,56	2,22	3	2	0,31
Tor2	24,6	39,2	36,2	5685,16	7,79	3	2	0,23
Tor3	32,4	39,2	28,4	4569,76	7,74	3	3	0,21

Fuente: Elaboración propia.

#### 8.4. ÍNDICES ESPECTRALES

La siguiente tabla muestra un resumen comparativo de los valores máximos y mínimos de los índices espectrales analizados y descritos que presenta la cuenca de estudio, así como también las zonas potenciales de humedal en años de baja y alta precipitación. Estos valores ayudan a determinar el rango en el cual varía la respuesta espectral de interés.

Resumen estadístico correspondiente a índices espectrales.

AÑOS DE BAJA PRECIPITACIÓN				AÑOS DE ALTA PRECIPITACIÓN			
Años	CUENCA			Años	CUENCA		
	NDVI-I	min	máx.		NDVI-I	min	máx.
1988	0,286	-0,049	0,692	1992	0,357	0,048	0,686
2005	0,336	0,009	0,710	2001	0,386	-0,002	0,693
2017	0,412	-0,042	0,810	2014	0,392	-0,009	0,758
PROMEDIO	0,345	-0,027	0,738	PROMEDIO	0,378	0,012	0,712
ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL				ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL			
	NDVI-I	min	máx.		NDVI-I	min	máx.
1988	0,312	0,027	0,672	1992	0,396	0,056	0,674
2005	0,353	0,009	0,698	2001	0,417	0,036	0,684
2017	0,452	0,000	0,753	2014	0,427	0,020	0,739
PROMEDIO	0,372	0,012	0,708	PROMEDIO	0,41329233	0,037238	0,698937
CUENCA				CUENCA			
	NDVIcv	min	máx.		NDVIcv	min	máx.
1988	0,480	-1405,64	250,401	1992	0,311	0,016	1,215
2005	0,255	0,014	3,287	2001	0,291	-73,841	2,962
2017	0,265	-10,582	129,100	2014	0,330	-14,279	35,306
PROMEDIO	0,334	-472,069	127,596	PROMEDIO	0,311	-29,368	13,161
ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL				ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL			
	NDVIcv	min	máx.		NDVIcv	min	máx.
1988	0,419	0,067	1,560	1992	0,3020	0,0164	1,0003
2005	0,266	0,020	2,455	2001	0,2964	0,0552	1,1304
2017	0,242	0,020	129,100	2014	0,3006	0,0271	0,9483
PROMEDIO	0,309	0,036	44,372	PROMEDIO	0,2997	0,0329	1,0263
CUENCA				CUENCA			
	NDWI	min	máx.		NDWI	min	máx.
1988	0,001	-0,26	0,57	1992	0,12	-0,22	0,57
2005	0,02	-0,23	0,61	2001	0,09	-0,25	0,56
2017	0,04	-0,25	0,60	2014	0,09	-0,25	0,61
PROMEDIO	0,02	-0,25	0,59	PROMEDIO	0,10	-0,24	0,58
ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL				ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL			
	NDWI	min	máx.		NDWI	min	máx.
1988	0,00	-0,20	0,55	1992	0,16	-0,15	0,57
2005	0,03	-0,21	0,58	2001	0,13	-0,17	0,56
2017	0,07	-0,22	0,58	2014	0,13	-0,16	0,59
PROMEDIO	0,03	-0,21	0,57	PROMEDIO	0,14	-0,16	0,57

NDVI-I: índice de vegetación de diferencia normalizada promedio anual.

NDVIcv: coeficiente de variación del NDVI.

NDWI: índice diferencial de agua normalizado.

Continuación: Resumen estadístico correspondiente a índices espectrales.

AÑOS DE BAJA PRECIPITACIÓN				AÑOS DE ALTA PRECIPITACIÓN			
CUENCA				CUENCA			
	DS NDWI	min	máx.		DS NDWI	min	máx.
1988	0,140	0,014	0,814	1992	0,099	0,002	0,348
2005	0,097	0,010	0,569	2001	0,117	0,011	0,592
2017	0,115	0,011	0,402	2014	0,140	0,015	0,329
PROMEDIO	0,117	0,012	0,595	PROMEDIO	0,119	0,009	0,423
ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL				ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL			
	DS NDWI	min	máx.		DS NDWI	min	máx.
1988	0,12	0,02	0,49	1992	0,10	0,00	0,29
2005	0,10	0,01	0,29	2001	0,12	0,02	0,27
2017	0,11	0,01	0,32	2014	0,14	0,02	0,32
PROMEDIO	0,11	0,02	0,37	PROMEDIO	0,12	0,01	0,29
CUENCA				CUENCA			
	IPSE	min	máx.		IPSE	min	máx.
1988	0,17	-0,26	0,63	1992	0,25	-0,01	0,66
2005	0,25	-0,10	0,68	2001	0,28	-0,13	0,63
2017	0,31	-0,21	0,77	2014	0,27	-0,19	0,73
PROMEDIO	0,24	-0,19	0,69	PROMEDIO	0,27	-0,11	0,67
ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL				ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL			
	IPSE	min	máx.		IPSE	min	máx.
1988	0,185	-0,075	0,627	1992	0,280	0,000	0,638
2005	0,262	-0,013	0,674	2001	0,297	-0,024	0,619
2017	0,347	-0,068	0,725	2014	0,302	-0,022	0,708
PROMEDIO	0,265	-0,052	0,675	PROMEDIO	0,293	-0,015	0,655
CUENCA				CUENCA			
	ET	min	máx.		ET	min	máx.
1988				1992			
2005	24,338	13,8	51,2	2001	32	15,4	54,4
2017	30	14,6	53	2014	29	15	57
PROMEDIO	26,9455	14,2	52,1	PROMEDIO	30,289	15,2	55,7
ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL				ZONA POTENCIAL DE HUMEDAL			
	ET	min	máx.		ET	min	máx.
1988				1992			
2005	24,22	13,80	51,20	2001	35,12	19,60	54,40
2017	31,32	14,60	53,00	2014	30,73	18,20	57,00
PROMEDIO	27,77	14,20	52,10	PROMEDIO	32,93	18,90	55,70

DS

NDWI: desviación estándar del NDWI.

IPSE: Índice de provisión de servicios ecosistémicos.

ET: evapotranspiración.

Fuente: Elaboración propia.