



FCA
Facultad de Ciencias
Agropecuarias



FACULTAD
DE CIENCIAS
ECONÓMICAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Agropecuarias
Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales
Facultad de Ciencias Económicas

Escuela para Graduados FCA UNC

TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Para optar al Grado Académico de
Especialista en Gestión de Cuencas Hidrográficas

ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE NUTRIENTES EN LA CUENCA DEL EMBALSE LOS MOLINOS MEDIANTE EL USO DEL MODELO SWAT

Ing. Angel Alfredo Quelas

Directora: Mg., Ing., Mariana Renee Pagot

Córdoba, 2021



FCA
Facultad de Ciencias
Agropecuarias



FACULTAD
DE CIENCIAS
ECONÓMICAS

ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE NUTRIENTES EN LA CUENCA DEL EMBALSE LOS MOLINOS MEDIANTE EL USO DEL MODELO SWAT

Ing. Angel Alfredo Quelas

Directora: Mg., Ing., Mariana Renee Pagot

Aprobada en estilo y contenido por la Comisión Académica de la EGCH

Tribunal Examinador de TFI

- Miembro del Tribunal Evaluador: Lic. Econ. (Mag) Silvia Aisa
- Miembro del Tribunal Evaluador: Dra. Ing. Agr. Franca Giannini Kurina
- Miembro del Tribunal Evaluador: Ing. Agr. (MSc) Luis Luque

Presentación formal académica: Córdoba, noviembre de 2021

La Especialización en Gestión de Cuencas Hidrográficas es una instancia de capacitación integral para atender la problemática que urge en las cuencas hidrográficas, principalmente en los ambientes modificados e intervenidos por el hombre. Este programa de posgrado y formación conjunta surgió del trabajo integrado entre las Facultades de Ciencias Agropecuarias, Ciencias Exactas Físicas y Naturales y de Ciencias Económicas de la Universidad Nacional de Córdoba, y cuenta con el apoyo del Gobierno de la Provincia de Córdoba a través del Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ministerio de Servicios Públicos y Ministerio de Obras Públicas, a través del Convenio Marco de Cooperación Académica (RD N° 447/2021) y sus respectivos Convenios Específicos (RD N° 475/2021, 465/2021 y 474/2021).

La Especialización en Gestión de Cuencas Hidrográficas fue acreditada por CONEAU con Res. 517/19 y Res. Ministerio de Educación de la Nación (ME) 938/2020



AGRADECIMIENTOS

En primera instancia a la Directora de la Especialidad Dra. Susana Hang por su permanente motivación para que cumpla con todos y cada uno de los objetivos de esta Especialización.

A mi tutora Mg. Ing. Mariana Renee Pagot por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados.

A los docentes que me guiaron, acompañaron y compartieron sus saberes durante este proceso.

Por último, pero no por eso menos importante, a mi familia que me apoyó e hizo posible que este trabajo se realice con éxito.”

RESUMEN

El embalse Los Molinos enfrenta serios problemas de eutrofización y es la fuente de provisión de agua para una población de más de dos millones de habitantes. Las actividades antrópicas como el desarrollo urbano, las prácticas de agricultura y ganadería que existen en su cuenca de aporte, podrían incrementar el ingreso de nutrientes al lago. Estos, especialmente compuestos de Nitrógeno y Fósforo, favorecen las floraciones algales que es un síntoma de este problema. Una mejor comprensión de los factores que influyen en la eutrofización de los espejos de agua es necesaria para la aplicación de medidas correctoras, por este motivo es que los modelos basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) forman parte de las herramientas de apoyo para la toma de decisiones.

Este trabajo presenta la simulación hidrológica y los volúmenes de nutrientes anuales durante el periodo 2017 a 2021 en el embalse Los Molinos, mediante el uso de un modelo hidrológico a escala de cuenca. El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) fue aplicado a la cuenca de aporte al embalse Los Molinos, localizada en los departamentos Calamuchita y Santa María de la Provincia de Córdoba. Los resultados permitieron comparar variaciones anuales considerando dos escenarios de simulación basados en zonas urbanizadas en la cuenca y censos poblacionales de años 2008 y 2018, evaluando los efectos del incremento de la urbanización en el aporte de nutrientes. Los datos de entrada del modelo fueron recopilados de diversas bases de datos y los datos meteorológicos fueron generados con el motor climático incorporado en el SWAT. Los resultados de la simulación permitieron conocer los incrementos y déficits de nutrientes.

Palabras clave: Embalse – Eutrofización – SIG – SWAT – Nutrientes - Cuenca.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	11
2.	OBJETIVOS	12
3.	ÁREA DE ESTUDIO.....	13
4.	CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	14
4.1	Hidrología	14
4.2	Litología	28
4.3	Geomorfología.....	29
4.3.1	Sierra Grande Comechingones.....	30
4.3.2	Valle de Calamuchita	37
4.3.3	Sierras Chicas.....	39
4.3.4	Cartas de Suelos	42
4.4	Clima.....	54
4.5	Regiones Geográficas	56
4.5.1	Sierras de Sur.....	56
4.5.2	Valles Intermontanos	61
4.5.3	Pampas de Altura	62
4.6	Cobertura vegetal.....	62
4.7	Áreas Naturales Protegidas	65
4.8	Urbanización.....	69
4.9	EUTROFIZACIÓN	73
4.9.1	Proceso de eutrofización.....	75
4.9.2	Causas de la eutrofización.....	76
4.9.3	Estados de eutrofización	78
4.10	Calidad del agua en el Embalse Los Molinos.....	79
4.11	Monitoreo del Embalse Los Molinos.....	80
4.12	Marco Normativo	82
5.	COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO	83
5.1	Precipitación.....	83
5.2	Evapotranspiración.....	84
5.3	Intercepción.....	85
5.4	Infiltración	86
5.5	Escorrentía.....	86
5.6	Agua Subterránea.....	86
6.	EROSIÓN HÍDRICA.....	87
6.1	Causas erosión hídrica.....	88
6.2	Tipos de erosión hídrica	88

6.2.1	Erosión laminar.....	88
6.2.2	Erosión en surcos.....	89
6.2.3	Erosión en cárcavas.....	89
6.2.4	Erosión en cauces.....	90
6.2.5	Movimientos en masas (Erosión de profundidad).....	90
7.	TRANSPORTE DE CONTAMINANTES.....	90
7.1	Transporte de nutrientes.....	90
7.1.1	Ciclo del Nitrógeno.....	91
7.1.1.1	Formas del nitrógeno en el suelo.....	92
7.1.1.2	Procesos de transformación del nitrógeno.....	92
7.1.2	Fósforo.....	94
7.1.2.1	Factores de transporte del fósforo.....	96
7.1.3	Transporte de metales pesados.....	97
8.	APLICACIÓN DEL SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT).....	99
9.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAT.....	100
10.	CARACTERÍSTICAS DEL MODELO SWAT.....	100
10.1	Componentes del modelo.....	101
10.1.1	Clima.....	101
10.1.2	Hidrología.....	101
10.1.3	Uso Del Suelo/Crecimiento De Cultivos.....	102
10.1.4	Erosión.....	102
10.1.5	Nutrientes.....	102
10.1.6	Pesticidas.....	103
10.1.7	Prácticas De Manejo Agrícola.....	103
10.2	Proceso de modelización en SWAT.....	104
10.3	Base teórica del modelo SWAT.....	105
10.3.1	Ecuación de balance hídrico.....	105
10.3.2	Precipitación.....	105
10.3.3	Escorrentía superficial.....	106
10.3.4	Grupos hidrológicos de suelos.....	107
10.3.5	Parámetro de retención del suelo S.....	108
10.3.6	Ajuste de pendientes.....	108
10.3.7	Pérdidas de transmisión.....	109
10.3.8	Evapotranspiración.....	110
10.3.9	Nutrientes.....	110
10.3.9.1	Cuantificación del nitrógeno en el suelo.....	110

10.3.9.2	Transformaciones del nitrógeno en el suelo	112
10.3.9.3	Cuantificación del fósforo en el suelo	113
10.3.9.4	Pesticidas	114
10.3.10	Erosión de suelos y transporte de sedimentos	115
10.3.10.1	Ecuación Universal De Pérdida De Suelos: USLE (Universal Soil Loss Equation) .	115
10.3.10.2	Ecuación Universal Modificada de la Pérdida de Suelo: MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation).....	117
10.3.10.3	Esquema del cálculo de la erosión en SWAT	117
10.3.10.4	TRANSPORTE DE PESTICIDAS.....	118
10.3.10.5	TRANSPORTE DE METALES PESADOS	119
11.	SIMULACIÓN DE LA CUENCA EMBALSE LOS MOLINOS	119
11.1	Datos de partida y configuración del modelo	119
11.1.1	Datos de partida	119
11.1.2	Delimitación de la cuenca y definición de las HRUs.....	121
12.	RESULTADOS.....	126
12.1	Control a nivel de Cuenca.....	127
12.2	Control a nivel de Embalse	128
12.2.1	Balance hídrico	130
12.2.2	Nutrientes.....	131
13.	DIAGNÓSTICO PRESUNTIVO	134
14.	CONCLUSIONES	137

Lista de Tablas

Tabla 1: Subcuencas de los ríos tributarios al Embalse Los Molinos	14
Tabla 2: Datos de la Cuenca Laguna de Mar Chiquita	16
Tabla 3: Datos de la Cuenca Río Segundo	17
Tabla 4: Nomenclatura de cuencas	18
Tabla 5: Áreas y longitudes de subcuencas (datos tomados del APRHI).....	19
Tabla 6: Subcuencas determinadas mediante QGIS (resolución DEM 5m)	26
Tabla 7: Parámetros de las subcuencas	27
Tabla 8: Litología de la cuenca	29
Tabla 9: Unidades de Capacidad de uso, aptitud agrícola e índice de productividad.....	43
Tabla 10: Ley de bosques – Actividades permitidas.....	68
Tabla 11: Censo año 2008	72
Tabla 12: Censo año 2010	72
Tabla 13: Criterios para definir los tres estados tróficos	79
Tabla 14: Relaciones entre TSI, Clo, P, DS (disco de Secchi) y la clase trófica.....	79
Tabla 15: Cobertura y usos del suelo	121
Tabla 16: Áreas de cobertura y uso del suelo	121
Tabla 17: Distribución SWAT de Uso del Suelo (2018).....	123
Tabla 18: Distribución de pendientes.....	124
Tabla 19: Clasificación SWAT de suelos (2018)	125
Tabla 20: Balance hídrico con datos del censo del año 2008.....	130
Tabla 21: Balance hídrico con datos del censo del año 2018.....	130
Tabla 22: Balance hídrico – Variación porcentual de escenarios considerando censos 2008 y 2018	131
Tabla 23: Nutrientes año 2008.....	131
Tabla 24: Nutrientes año 2018.....	132
Tabla 25: Nutrientes – Porcentajes comparativos entre los escenarios simulados.....	133

Lista de Figuras

Figura 1 Localización del Embalse Los Molinos	13
Figura 2 Departamentos y radios urbanos consolidados (año 2015).....	14
Figura 3 Principales cursos de agua	15
Figura 4 Cuenca embalse Los Molinos	17
Figura 5 Subcuencas embalse Los Molinos	18
Figura 6 Cuenca 2-16-A y subcuencas	22
Figura 7 Subcuenca LM-01	22
Figura 8 Subcuenca LM-02	23
Figura 9 Subcuenca LM-03	23
Figura 10 Subcuenca LM-04	24
Figura 11 Subcuenca LM-05	24
Figura 12 Subcuenca LM-06	25
Figura 13 Subcuenca LM-07	25
Figura 14 Subcuenca LM-08	26
Figura 16 Caudales medios mensuales para el período 1981-2003.....	27
Figura 17 Litología	28
Figura 18 Geomorfología de la Provincia	29
Figura 19: Geomorfología de la zona de estudio	30
Figura 20: Fallas geológicas	31
Figura 21 Altimetría de la cuenca.....	35
Figura 22 Cartas de suelos – Unidades cartográficas.....	43
Figura 23 Temperatura media anual.....	54
Figura 24 Precipitaciones medias anuales	55
Figura 25 Regiones naturales	56
Figura 26 Cobertura vegetal.....	63
Figura 27 Áreas naturales protegidas (Parque Nacional y Reserva Recreativa)	65
Figura 28 Áreas naturales protegidas (Reserva Hídrica y Reserva Recreativa).....	66
Figura 29 Áreas naturales protegidas (Ley de bosques)	67
Figura 30 Asentamientos urbanos	70
Figura 31 Lugares de disposición de residuos sólidos urbanos.....	70
Figura 32 Planilla censal del año 1914	73
Figura 33 Subcuencas del modelo.....	122
Figura 34 Usos y coberturas del suelo.....	123
Figura 35 Mapa de pendientes.....	124
Figura 36 Clasificación de suelos.....	125
Figura 37 Unidades de respuesta hidrológica (HRU).....	126
Figura 38 Balance hidrológico año 2008	127
Figura 39 Balance hidrológico año 2018	128
Figura 40 Balance hidrológico y nutrientes para el año 2021 con datos del censo del año 2008	129
Figura 41 Balance hidrológico y nutrientes para el año 2021 con datos del censo del año 2018	129
Figura 42 Nutrientes modelación año 2008.....	132
Figura 43 Nutrientes modelación año 2018.....	133
Figura 44 Variaciones porcentuales de nutrientes.....	134
Figura 45 Tendencias de las variaciones porcentuales de nutrientes.....	135

Estimación de la carga de nutrientes en la cuenca del embalse los molinos mediante el uso del modelo SWAT

1. INTRODUCCIÓN

El embalse Los Molinos está emplazado en la región semiárida central de Argentina y representa una importante fuente de abastecimiento de agua para aproximadamente un tercio de los habitantes de la ciudad de Córdoba.

Entre su uso multipropósito se destaca el control de las crecidas, riego, producción de energía eléctrica, desarrollo de actividades deportivas y turismo regional.

El dique Los Molinos, es una represa que forma el segundo embalse de agua más grande de la provincia de Córdoba, Argentina, después del Embalse Rio III, y es el octavo dique construido en la provincia. Partiendo desde la ciudad de Córdoba, a esta región se accede por la Ruta Provincial N° 5.

El embalse Los Molinos tiene una profundidad máxima de 57 m y una superficie de 2147,7 hectáreas, almacena 307 hm³ de agua, que proviene de una cuenca hidrográfica que abarca un área aproximada a las 90549 hectáreas (datos según APRHI). Esta cuenca tiene una precipitación media anual de 600 mm.

El dique es una estructura de hormigón de tipo arco-gravedad, de 60 m de altura desde sus cimientos y 240 m de largo de coronación.

Su construcción se inició en 1949 y su inauguración fue en octubre de 1953. El objetivo básico del mismo es regular el caudal del río y la producción de electricidad. Su punto de salida está localizado en coordenadas 31° 49' 06" de latitud S y 64° 30' 11" de longitud O.

Anteriormente a la construcción del dique, los ríos San Pedro, Espinillo, Del Medio y Los Reartes, generaban en el verano un incremento de caudal que provocaba

inundaciones en las localidades que están aguas abajo, como Río Segundo, Pilar, Villa del Rosario, Despeñaderos y Villa Concepción del Tío.

Actualmente se encuentran algunos asentamientos urbanos en el perillago que presentan un marcado incremento en el desarrollo de su trazado con el consecuente cambio en el uso de suelos.

Antecedentes como Bazán et al., (2005) indican que, desde finales del siglo 20, se observa un deterioro de la calidad del agua, signos de eutroficación y periódicos florecimientos algales.

Teniendo en cuenta que el agua de este embalse abastece a un tercio de la población de la ciudad de Córdoba y considerando el creciente deterioro ambiental que marcan diversos estudios realizados sobre la calidad del agua de Los Molinos, como Bazán et al., (2005) y Cossavella (2001), se propone relevar las causas que lo generan, brindando herramientas técnicas que permitan la gestión y aplicación de metodologías apropiadas para su mitigación y/o remediación.

2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es estimar la carga de nutrientes en la cuenca del embalse Los Molinos mediante la aplicación del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) con el objeto de lograr el cálculo de los volúmenes de nutrientes, contenido de compuestos de nitrógeno y contenido de fósforo en las aguas del embalse.

Los objetivos específicos que se logran durante el desarrollo de este trabajo son:

- Relevar y analizar los factores climáticos como: la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, horas de sol y velocidad y dirección del viento.

- Generar y analizar mapas de la topografía, cobertura vegetal y tipoy uso de suelo según su extensión, actividad económica, morfología, composición, cobertura vegetal, clima y su red hídrica.
- Generar modelos SWAT en la cuenca de estudio con la información recolectada.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El embalse Los Molinos se encuentra al sudoeste de la ciudad de Córdoba (fig. 1), en el sector sur del Departamento Santa María, pedanía Potrero de Garay, en el Valle de Calamuchita, ubicado a 769 m s.n.m. Está limitado por diversos cordones de las Sierras Chicas y las Sierras Grandes, y su salida se realiza por el río Los Molinos, que luego se une con el río Anizacate, y forman el río Segundo (río Xanaes), desembocando en la Laguna Mar Chiquita (Mar de Ansenúza), al este de la provincia de Córdoba.

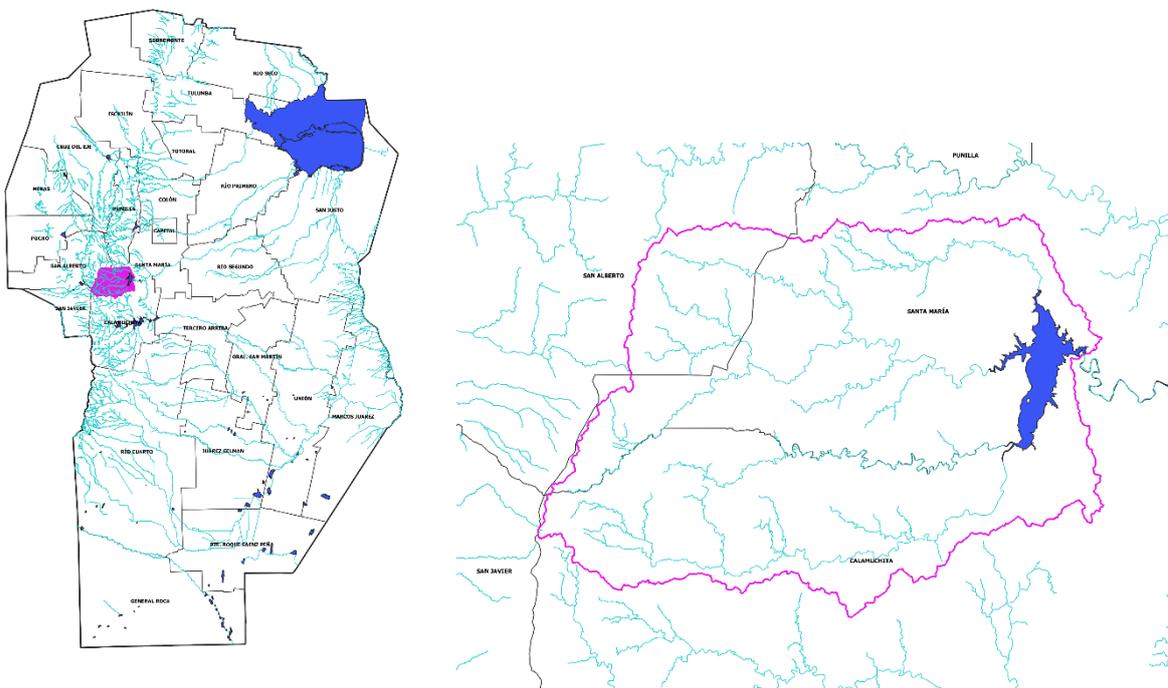


Figura 1 Localización del Embalse Los Molinos

En el perímetro del embalse al noroeste se ubica la localidad de Potrero de Garay y Villa Ciudad de América, en la costa occidental encontramos Villa La Merced y en el

extremo sur el caserío Solar de los Molinos además del Puesto Muchita, conurbados con la población de Los Reartes (fig. 2).

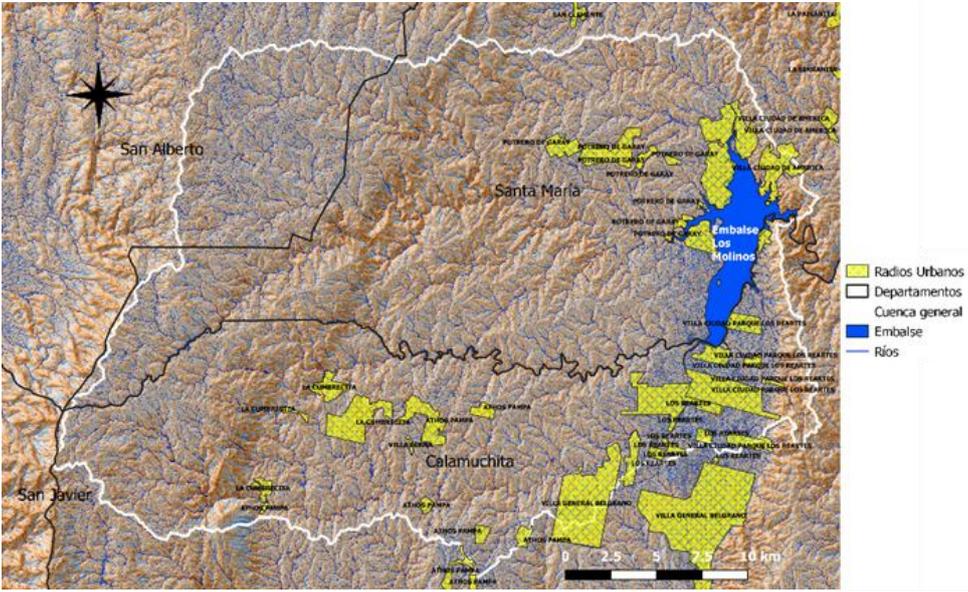


Figura 2 Departamentos y radios urbanos consolidados (año 2015)

4. CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

4.1 Hidrología

La cuenca del Embalse Los Molinos comprende un área de 905.49 km² (datos según APRHI). Los ríos tributarios al embalse son de norte a sur: San Pedro, Los Espinillos, Del Medio y Los Reartes. Las subcuencas de estos ríos tributarios se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Subcuencas de los ríos tributarios al Embalse Los Molinos

Subcuencas	Superficie (km ²)
Los Reartes	223.40
Del Medio	131.00
Los Espinillos	339.60
San Pedro	96.00

En la fig. 3 se observan estos cursos de agua que aportan al embalse. Esta figura se generó en base al procesamiento del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con 5 m

de resolución espacial disponible en la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

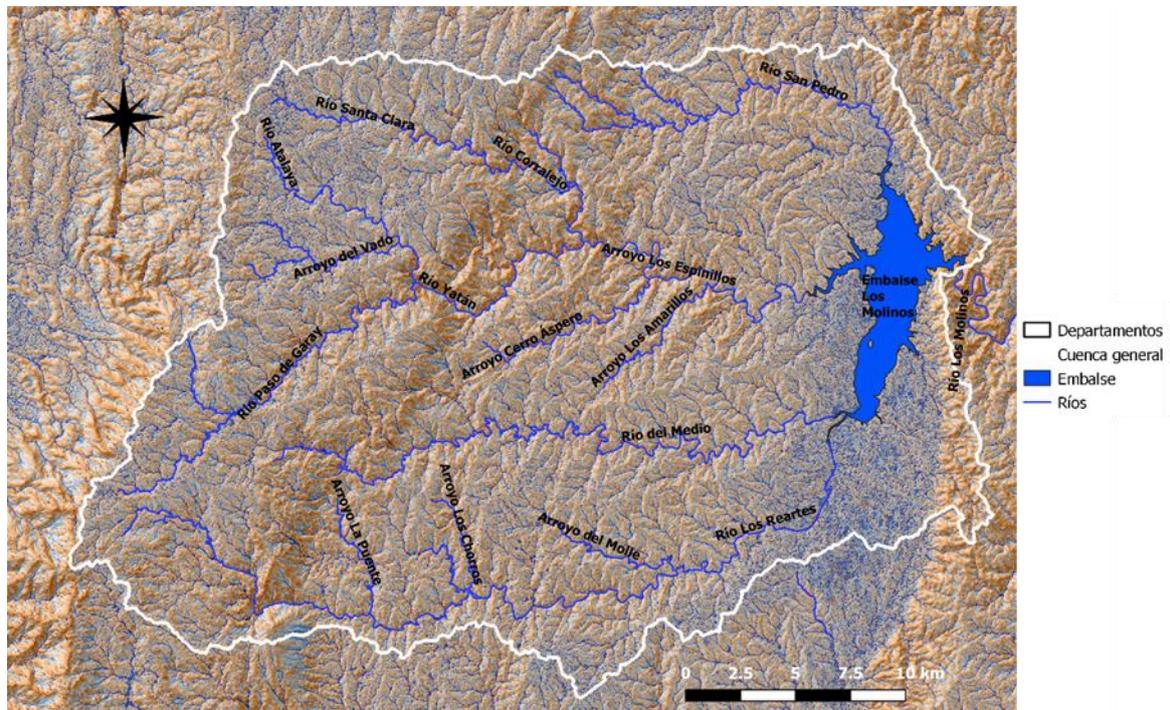


Figura 3 Principales cursos de agua

El río San Pedro, tiene sus nacientes en el borde oriental de la Cumbre de Achala, al sur de la Cuesta del Ángel. Presenta un recorrido con dirección noreste y recibe el aporte desde el norte, de los arroyos el Sauce y Santa María. Luego cambia su dirección hacia el este y recibe las aguas del arroyo Potrerillo. Con dirección hacia el sur, vierte sus aguas en el embalse de Los Molinos.

El río Los Espinillos, es el más caudaloso de los tributarios al embalse. Aporta las aguas de los ríos Corralero y Atán, que descienden de la Cumbre de Achala. Su recorrido presenta una dirección principal hacia este.

El río Del Medio extiende sus cabeceras hasta el sector de la Cumbre de Achala comprendido entre el Alto Grande y el Alto del Chicharrón, donde se convierte en el colector principal y se encauza con dirección general hacia el este.

El río Los Reartes tiene su origen por el aporte de las aguas que bajan de las Cumbres de Achala (entre los cerros de La Ventana y Negro). Luego se dirige al sudeste por el borde oriental de la Pampa de Achala en la quebrada, el Abra del río Los Reartes. Recolecta las aguas del arroyo de La Puente y continúa con rumbo al noreste. Antes de finalizar su recorrido colecta las aguas que bajan de la pendiente occidental de la Cumbre del Hinojo, encauzadas en arroyitos como Las Higueras, Seco y Del Tala. La descarga del embalse se hace por el río Los Molinos, que fluye hasta unirse al río Anisacate, tras atravesar por un pequeño valle la baja sierra llamada Cumbres de los Hinojos, ubicada en la parte sur de las Sierras Chicas e inmediatamente al este del lago. Tanto este río como el Anisacate, son los principales afluentes del río Segundo o Xanaes, que tributa a la laguna de Mar Chiquita o Ansenzuza.

En el ámbito regional, la cuenca de aporte al embalse Los Molinos forma parte de la Unidad de Gestión Hídrica, catalogada por la Administración Provincial de Recursos Hídricos (APRHI) como 2-16, llamada "Río Segundo" que a su vez forma parte de la cuenca Laguna Mar Chiquita (Mar de Ansenzuza) que abarca un área total de 126238 km² y tiene un perímetro de 2687 km (Tablas 2 y 3).

Tabla 2: Datos de la Cuenca Laguna de Mar Chiquita

Código	02
Nombre de la Cuenca	Laguna Mar Chiquita (Mar de Ansenzuza)
Superficie (km ²)	53643.85
Perímetro (km)	1601.31
Altura máxima (m)	2593.00
Altura mínima (m)	55.00
Sup. de cuerpos de agua (km ²)	5479.47
Long. de cursos de agua (km)	8955.49

Tabla 3: Datos de la Cuenca Río Segundo

Código	02
Nombre de la Cuenca	Río Segundo (Xanaes)
Superficie (km ²)	4710.07
Perímetro (km)	956.17
Altura máxima (m)	2593.00
Altura mínima (m)	69.00
Sup. de cuerpos de agua (km ²)	1.29
Long. de cursos de agua (km)	2537.02

El área de trabajo se encuentra delimitada por la cuenca que forman los afluentes del embalse y que pertenecen a la Cuenca Alta 2-16-A.

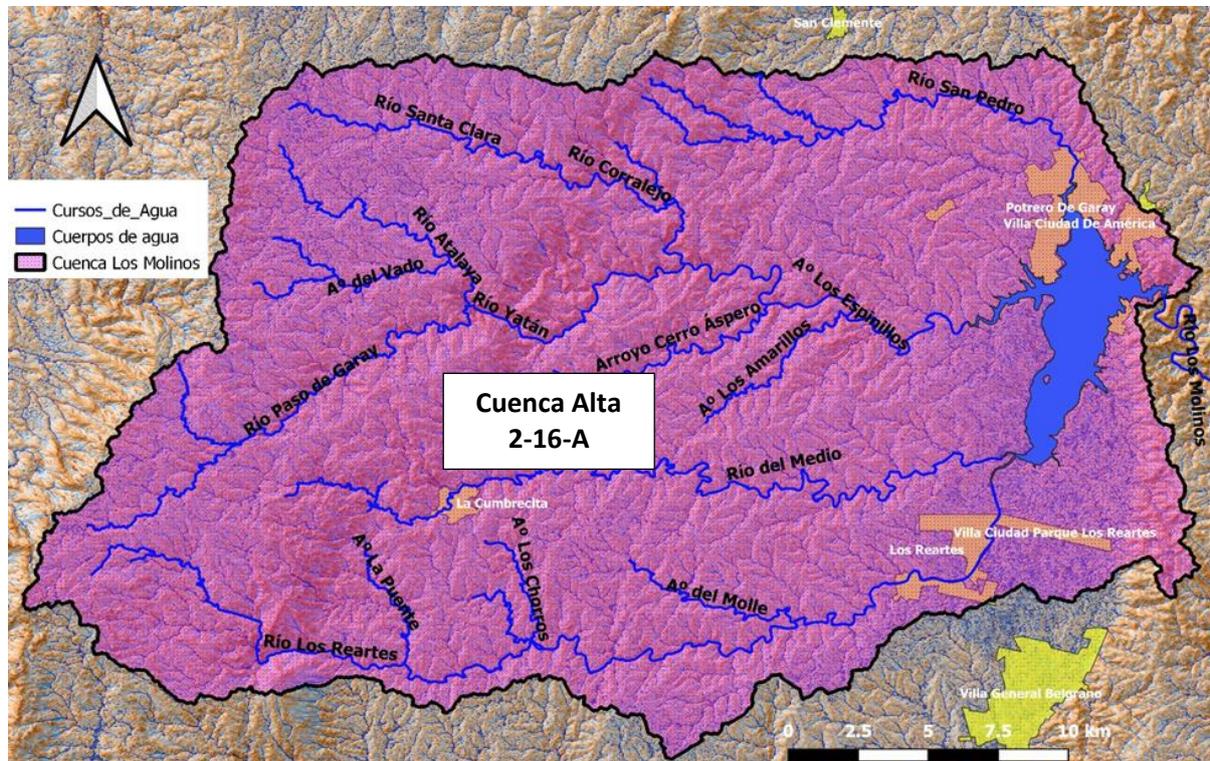


Figura 4 Cuenca embalse Los Molinos

A su vez, esta cuenca se encuentra subdividida por el ARPHI en ocho subcuencas de acuerdo a lo detallado en la fig. 5, tomando como fuente los datos provistos por la

Administración Provincial de Recursos Hídricos (APRHI) de la provincia de Córdoba.

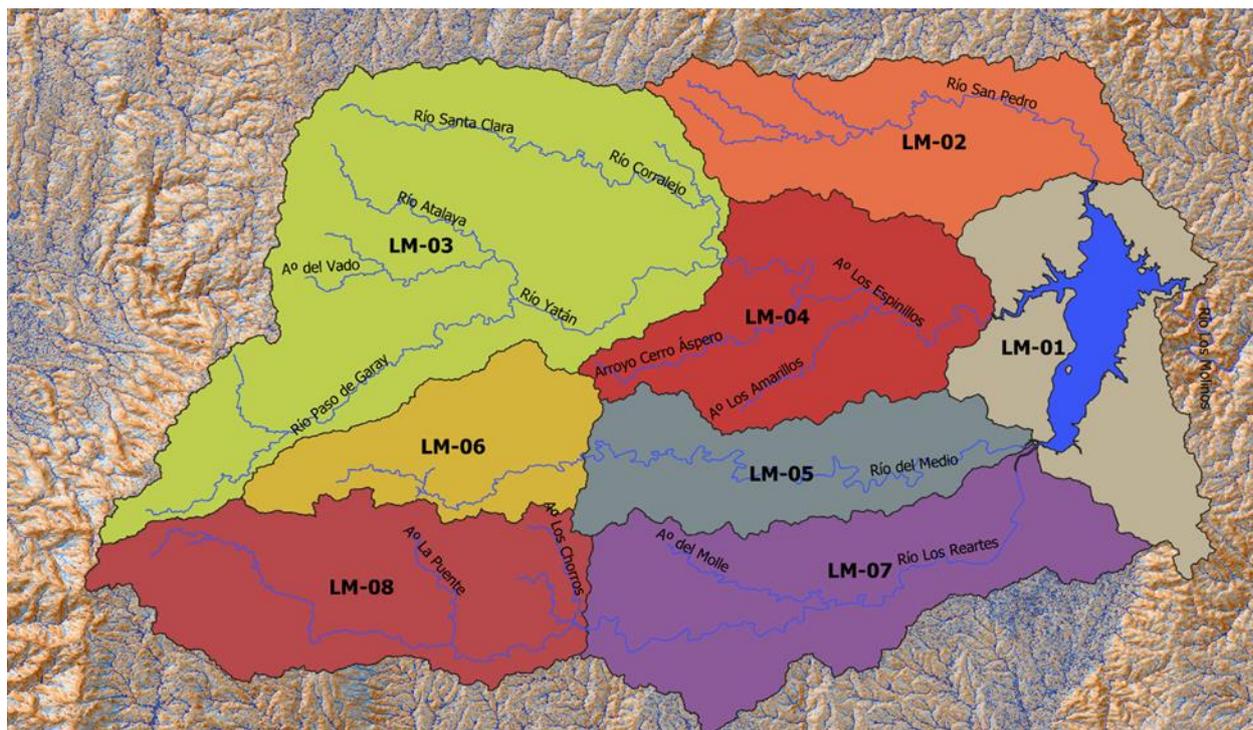


Figura 5 Subcuencas embalse Los Molinos

En las tablas 4 y 5 se detallan cauce principal, Unidad de Gestión Hídrica y cuenca a la que pertenecen, área, longitud, subcuenca y nombre.

Tabla 4: Nomenclatura de cuencas

CODIGO DE CUENCA	RIO PRINCIPAL	UGH	CUENCA
LM-01		Cuenca Alta (2-16-A)	Laguna Mar Chiquita
LM-02	R. San Pedro	Cuenca Alta (2-16-A)	Laguna Mar Chiquita
LM-03	R. de los Espinillos	Cuenca Alta (2-16-A)	Laguna Mar Chiquita
LM-04	R. de los Espinillos	Cuenca Alta (2-16-A)	Laguna Mar Chiquita
LM-05	R. del Medio	Cuenca Alta (2-16-A)	Laguna Mar Chiquita
LM-06	R. del Medio	Cuenca Alta (2-16-A)	Laguna Mar Chiquita
LM-07	R. de los Reartes	Cuenca Alta (2-16-A)	Laguna Mar Chiquita
LM-08	R. de los Reartes	Cuenca Alta (2-16-A)	Laguna Mar Chiquita

Tabla 5: Áreas y longitudes de subcuencas (datos tomados del APRHI)

CODIGO DE CUENCA	AREA	LONGITUD DE CUENCA	SUBCUENCA
LM-01	10185.30 Ha	83.07 km	Río Segundo (Xanaes)
LM-02	9476.21 Ha	70.34 km	Río Segundo (Xanaes)
LM-03	23404.10 Ha	111.44 km	Río Segundo (Xanaes)
LM-04	10116.39 Ha	67.09 km	Río Segundo (Xanaes)
LM-05	7382.13 Ha	69.26 km	Río Segundo (Xanaes)
LM-06	6017.30 Ha	54.64 km	Río Segundo (Xanaes)
LM-07	12365.07 Ha	91.73 km	Río Segundo (Xanaes)
LM-08	11602.76 Ha	73.48 km	Río Segundo (Xanaes)
Suma:	90549.26		

La cuenca y las subcuencas de aporte al embalse se calcularon mediante el programa QGis (<https://www.qgis.org/es/site/>) a partir del MDE-Ar del IGN basados en datos de Alos Palsar y del Instituto Geográfico Nacional en base al criterio adoptado por el APRHI sobre la selección de los sitios de cierre de cada subcuenca.

Una vez determinados los límites de la cuenca general y de las subcuencas, junto con las vías naturales de escurrimiento, se definieron distintos parámetros que permiten caracterizarlas.

Longitud axial de la cuenca:

La: Es el equivalente a la distancia entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca

Ancho promedio:

Ap: Es la relación entre la superficie de la cuenca y su longitud axial.

Ap: A/La

Ap: Ancho promedio en Km.

A: Área en Km²

La: Longitud axial de la cuenca en Km.

Factor de forma:

IF: Los parámetros de forma se explicitan a efectos de comparación eventual con otras cuencas. Este Factor o Índice de forma (IF) regula la concentración del escurrimiento superficial. Es un factor adimensional que expresa la tendencia de la cuenca a generar crecidas.

El índice de forma (IF) indica que tan alargada o que tan redondeada es una cuenca. Cuando el IF es cercano a 1, se está ante una cuenca de forma redondeada, y en los casos en que IF es menor a 1, se caracteriza por ser una cuenca alargada en el sentido del escurrimiento.

IF: A_p/L_a

IF: Factor de forma, adimensional.

A_p : Ancho promedio en Km.

L_a : Longitud axial de la cuenca en Km.

Longitud del curso principal:

L: Consiste en definir la longitud del curso (o línea de escurrimiento) principal de la cuenca (Serenó *et al.*, 1997). La medida se determinó a partir de las vías de escurrimiento.

Pendiente media del cauce principal:

Sc: Esta se obtiene a partir del desnivel topográficos sobre el cauce principal y su longitud.

$Sc = ((H_{\text{máx.}} - H_{\text{mín.}}) / L) * 100$

Sc: Pendiente media del cauce principal en %.

H máx.: Cota máxima en m.

H mín.: Cota mínima en m.

L: Longitud del cauce principal en m.

Pendiente media de la cuenca:

Sa: En base a un mapa con curvas de nivel trazadas con una equidistancia (Eq), este índice puede ser estimado por la expresión:

$$Sa = ((Eq * Lcn) / A) * 100 \quad (4)$$

Sa: Pendiente media de la cuenca en %.

Eq: Equidistancia de las curvas de nivel en m.

Lcn: Sumatoria de todas las curvas de nivel en m.

A: Área en m².

Las sumatorias de todas las curvas de nivel de cada cuenca se realizó a partir del programa QGIS.

Tiempo de concentración:

Tc: Es el tiempo que tarda la gota hidrológicamente más lejana en viajar hasta el punto de salida de la cuenca.

Existen numerosas fórmulas para el cálculo del tiempo de concentración. En el presente trabajo se utilizó la de Bransby Williams descrita a continuación.

$$Tc = 58 L / (A^{0.1} * Sc^{0.2})$$

L: Longitud del canal en m.

A: Área en Km²

Sc: Pendiente media del cauce principal en m/Km.

Fuente: (Sereno, 1997).

En base a la redeterminación efectuada se observa en las fig. 6 la cuenca denominada 2-16-A y en las fig. 7 a 14 las ocho subcuencas que la conforman.

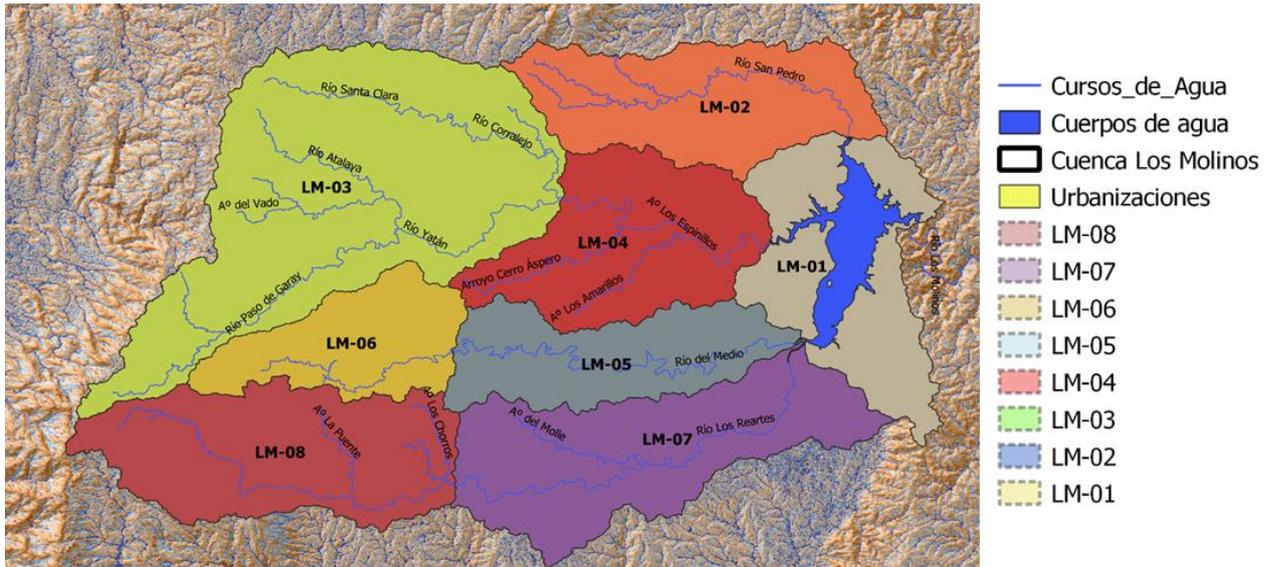


Figura 6 Cuenca 2-16-A y subcuencas

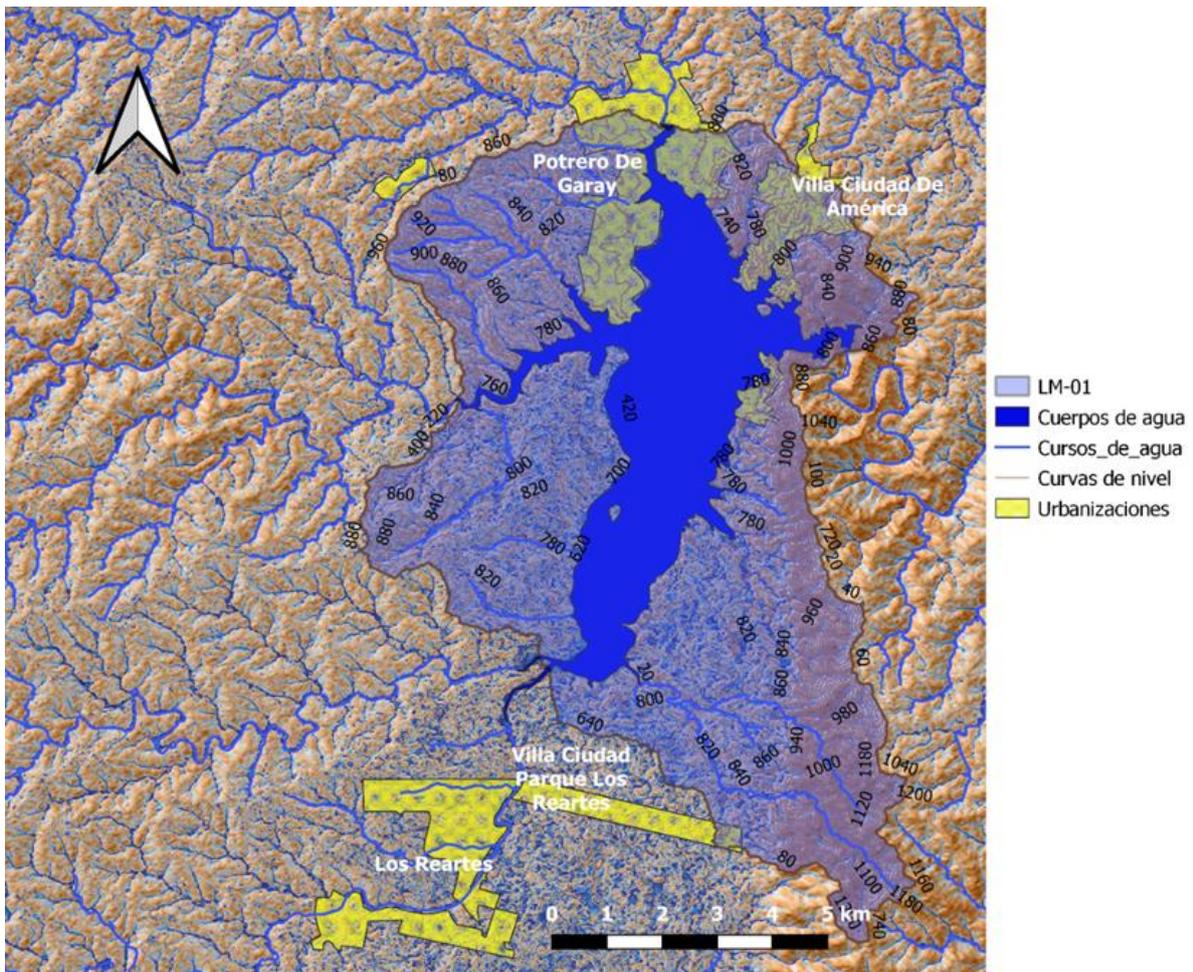


Figura 7 Subcuenca LM-01

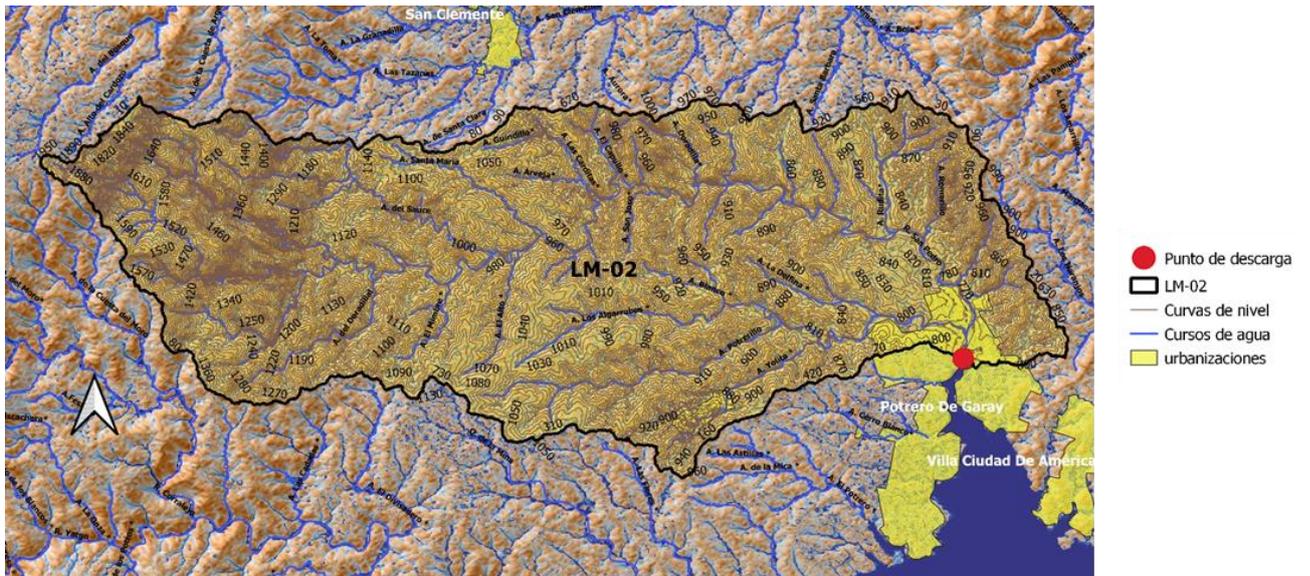


Figura 8 Subcuenca LM-02

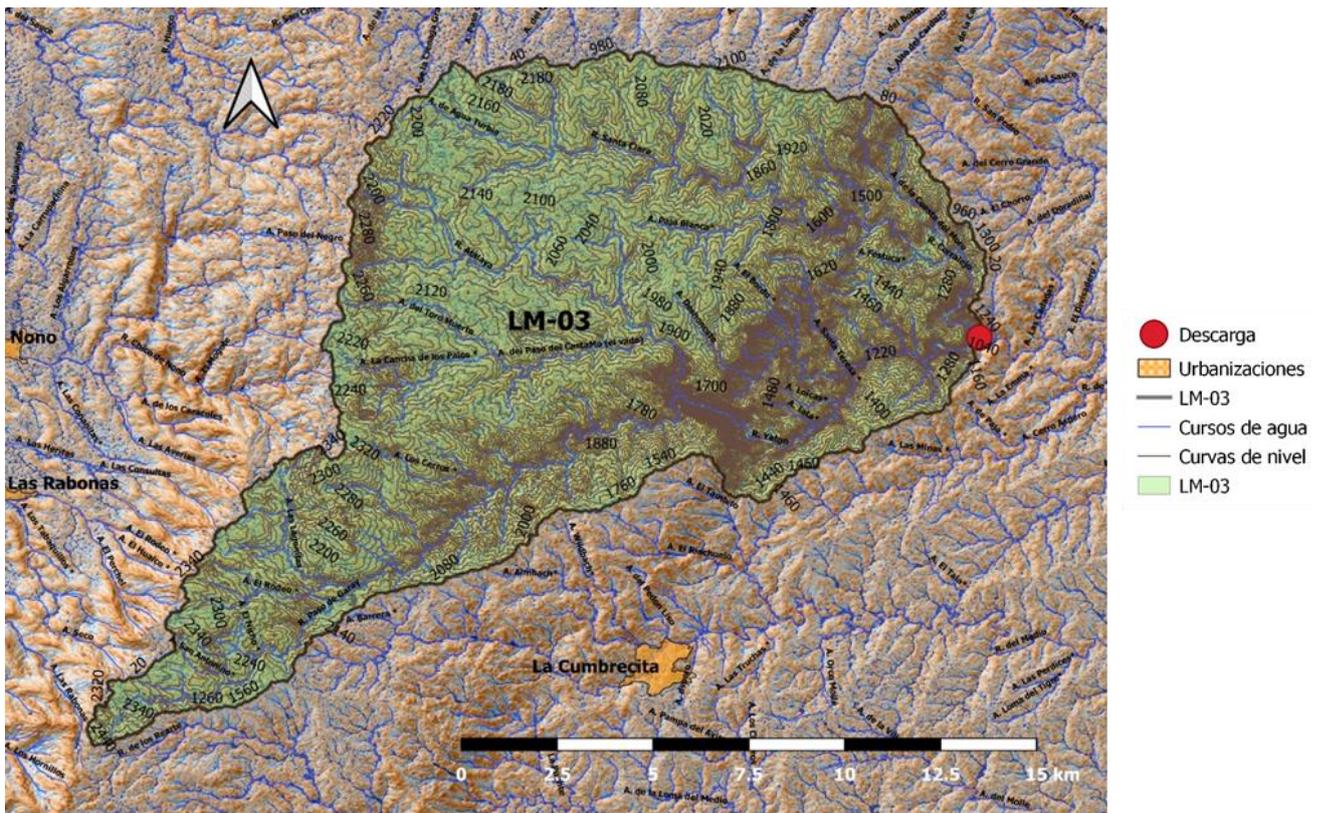


Figura 9 Subcuenca LM-03

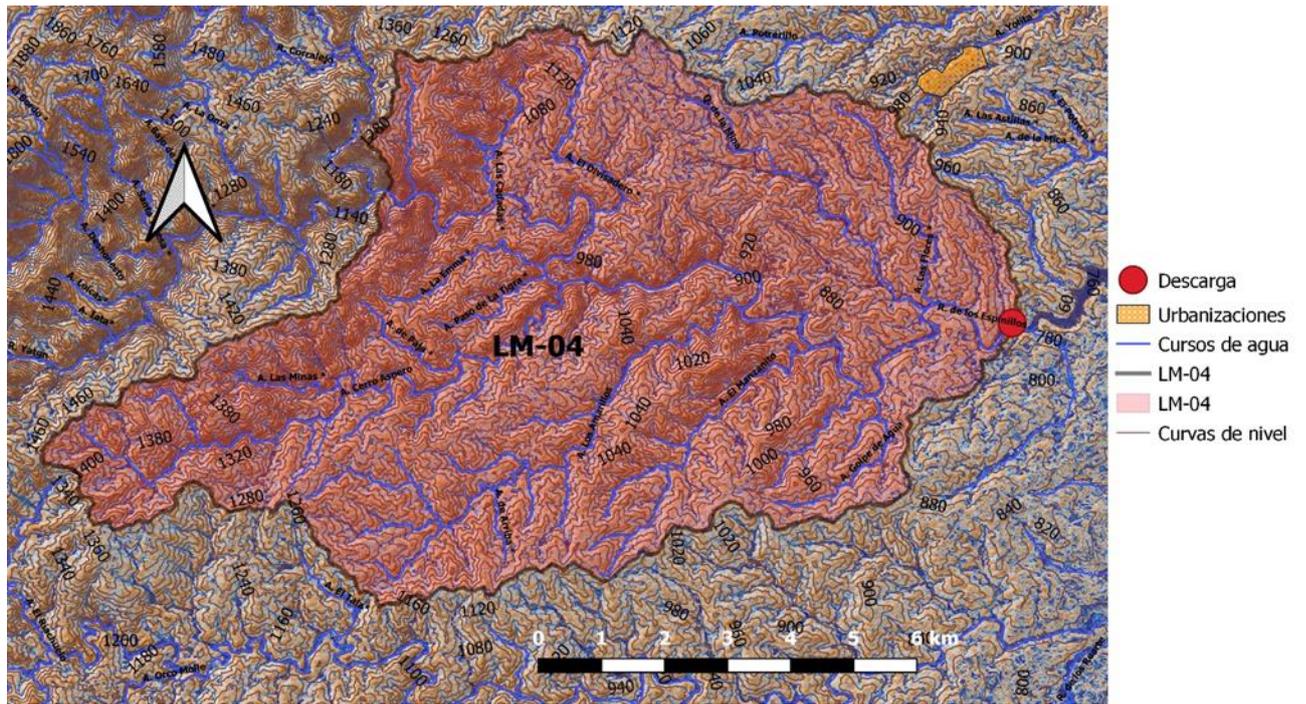


Figura 10 Subcuenca LM-04

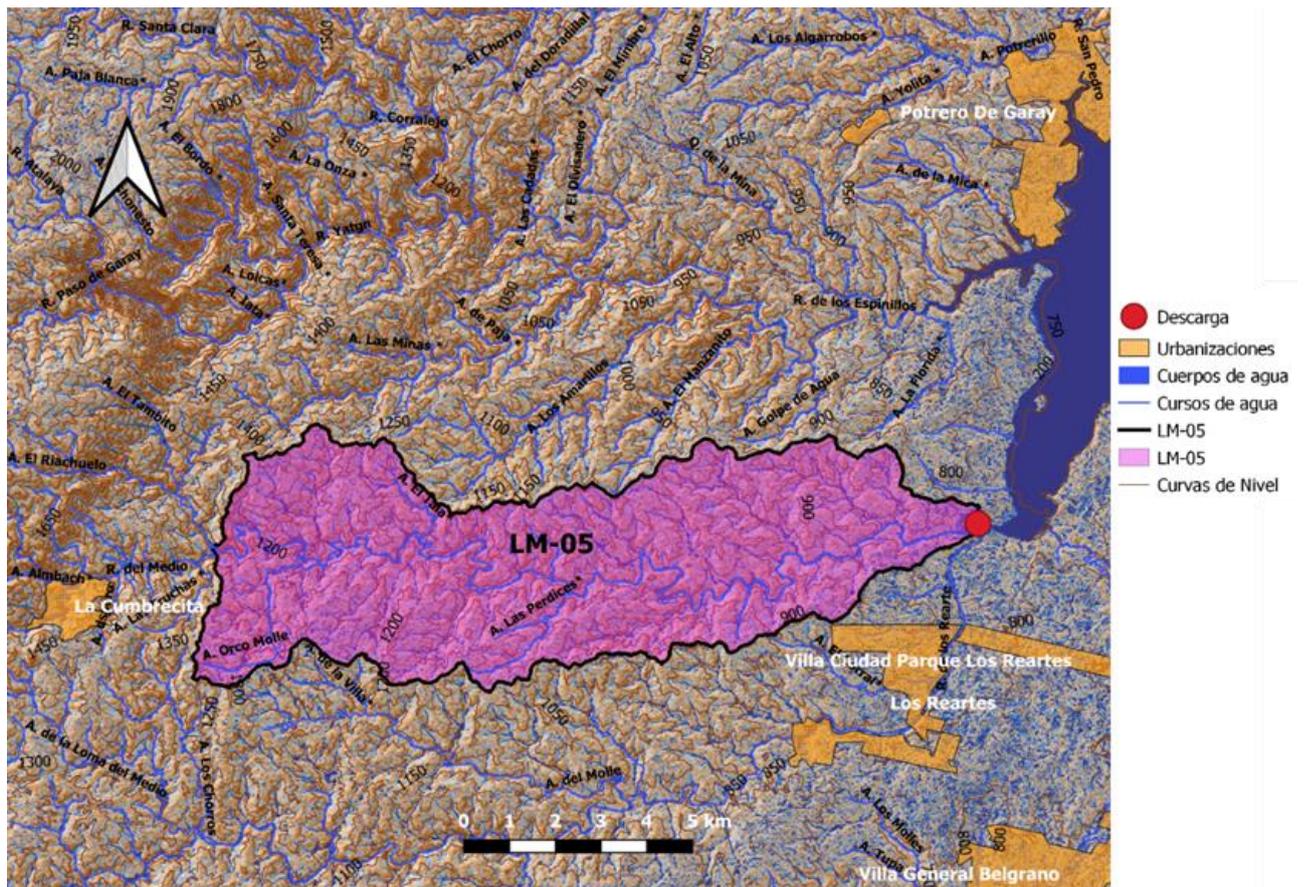


Figura 11 Subcuenca LM-05

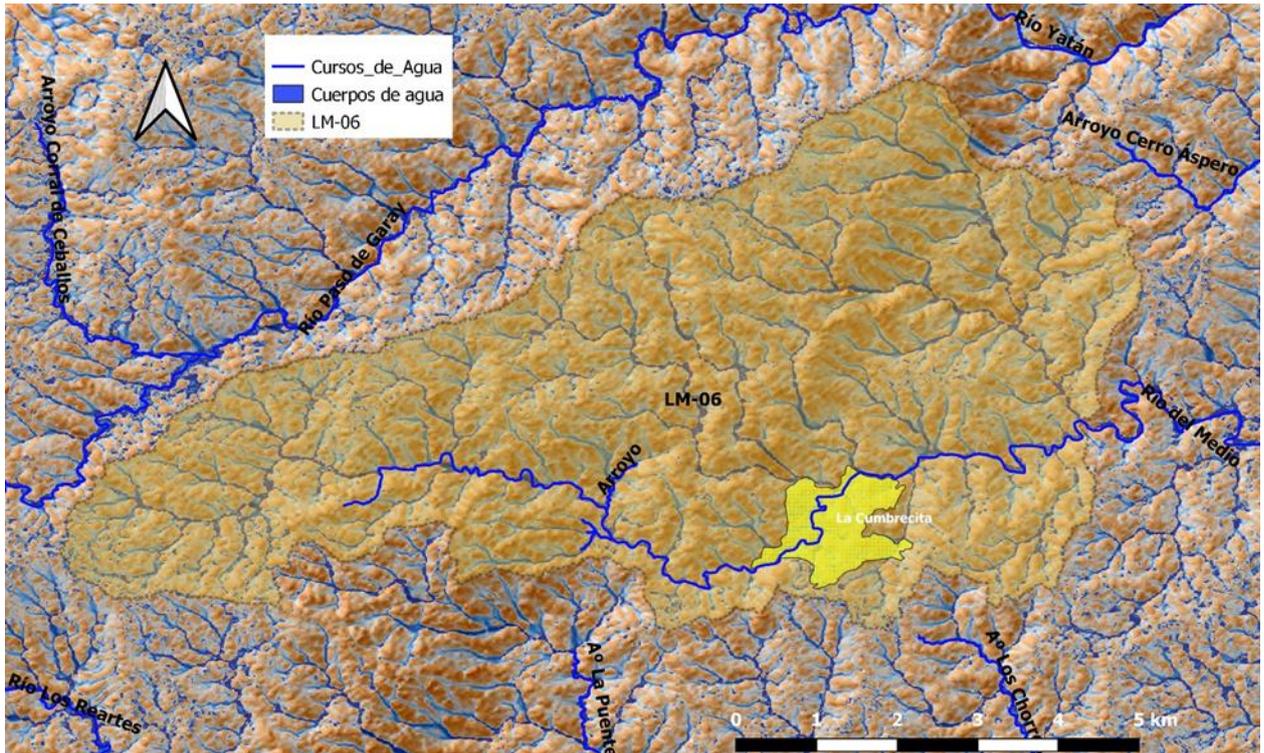


Figura 12 Subcuenca LM-06

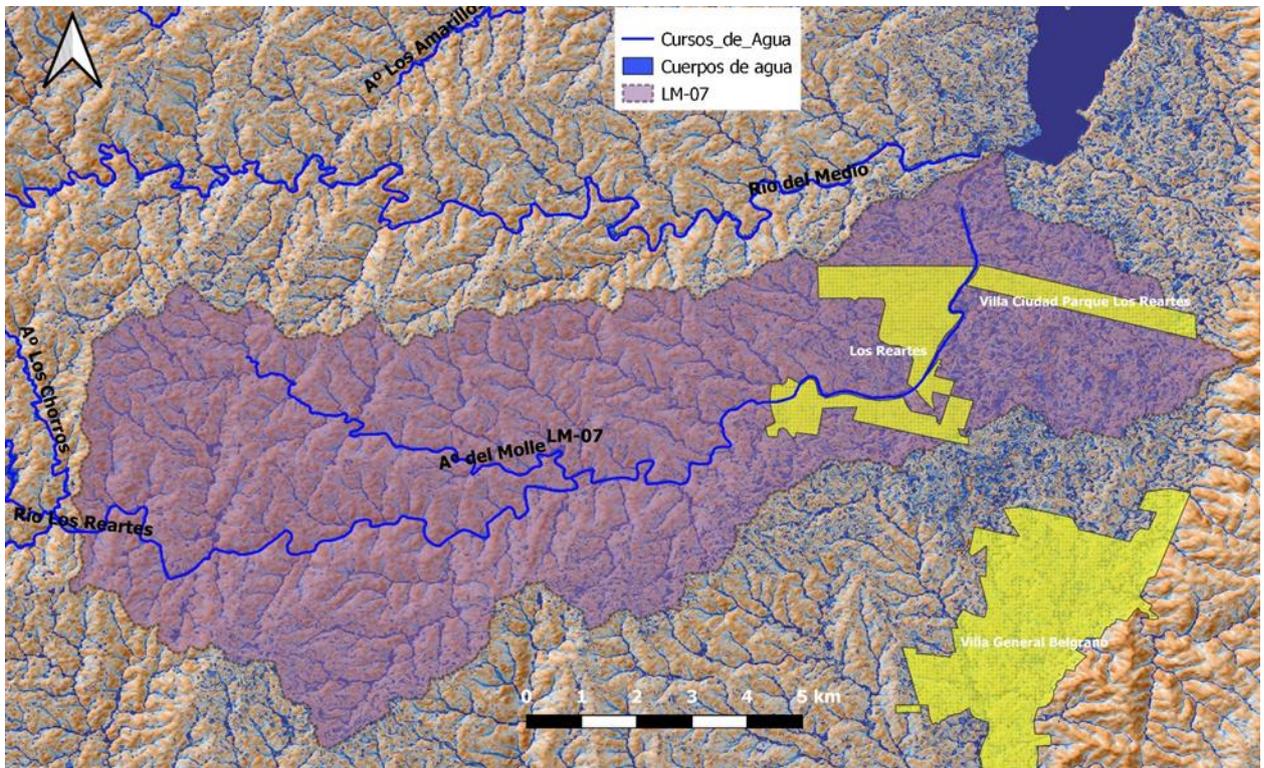


Figura 13 Subcuenca LM-07

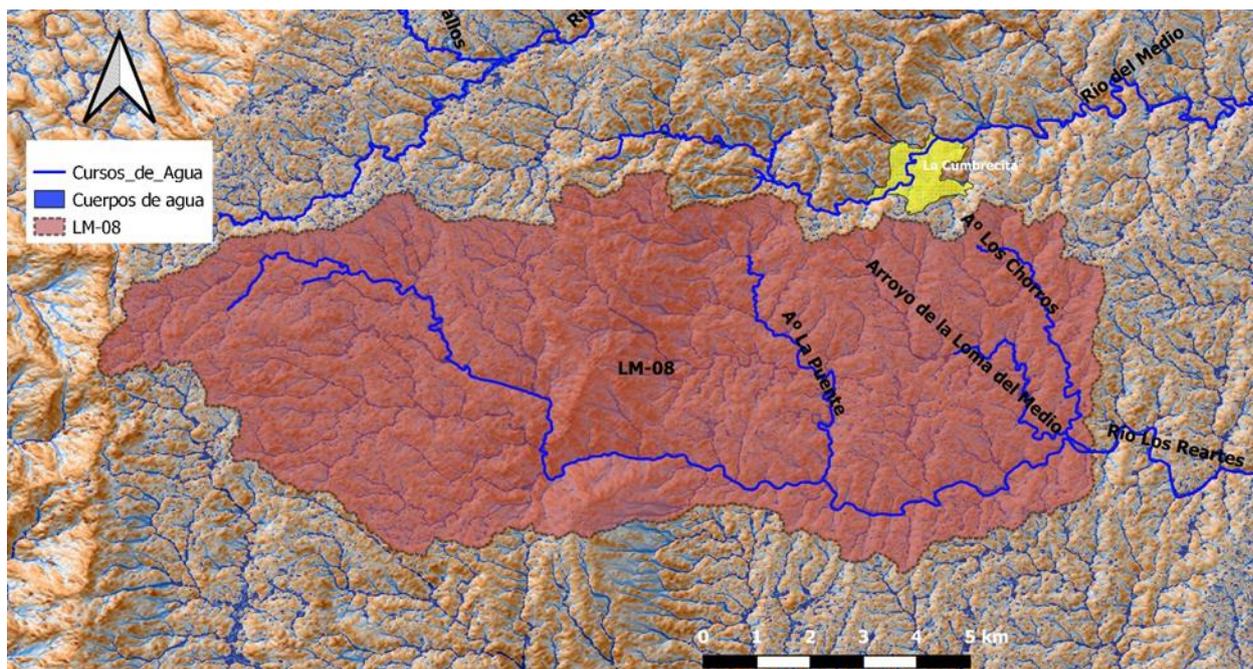


Figura 14 Subcuenca LM-08

En las tablas 6 y 7 se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes satelitales mediante el programa QGIS:

Tabla 6: Subcuencas determinadas mediante QGIS (resolución DEM 5m)

Subcuencas	Area	Longitud Axial (La)	Ancho Promedio (Ap)	Factor de Forma (IF)	Longitud del Curso Principal (L)	H máxima (m)	H mínima (m)
LM-01	8.94 Km2						
LM-02	95.28 Km2	17.55 Km	5.43 Km	0.30927764	9549.00 m	1963	769
LM-03	234.24 Km2	26.34 Km	8.89 Km	0.33757844	41098.00 m	2460	960
LM-04	115.68 Km2	17.82 Km	6.49 Km	0.36417599	20202.00 m	1400	769
LM-05	87.61 Km2	20.41 Km	4.29 Km	0.21027974	35466.00 m	1300	769
LM-06	71.84 Km2	15.13 Km	4.75 Km	0.31386978	15693.00 m	2200	1150
LM-07	144.67 Km2	21.65 Km	6.68 Km	0.30858253	28963.00 m	1200	769
LM-08	137.22 Km2	22.14 Km	6.20 Km	0.27995636	26823.00 m	2600	950
SUMA	895.48 Km2	141.05 Km2					

Tabla 7: Parámetros de las subcuencas

Subcuencas	Pendiente Media del Cauce Principal (Sc)	Equidistancia (m)	Sumatoria de curvas de nivel (m)	Pendiente Media de la Cuenca (Sa)	Longitud del Canal (km)	Tiempo de Concentración
LM-01		20.00 Km				
LM-02	12.50 Km2	20.00 Km	173.74 Km	36.4685139	9.55 m	211.8733949
LM-03	3.65 Km2	20.00 Km	280.41 Km	23.9419118	41.10 m	1066.175828
LM-04	3.12 Km2	20.00 Km			20.20 m	580.1871018
LM-05	1.50 Km2	20.00 Km			35.47 m	1213.184592
LM-06	6.69 Km2	20.00 Km			15.69 m	405.8824829
LM-07	1.49 Km2	20.00 Km			28.96 m	943.4264657
LM-08	6.15 Km2	20.00 Km			26.82 m	661.3013214

Los datos disponibles en Langa Sánchez et al. (2009), referidos a caudales de cada tributario corresponden a una serie diaria que comprende desde enero de 1981 hasta diciembre del 2003. Con estos datos se calculó la serie mensual de cada río para el periodo analizado (fig. 16). Estos caudales se obtuvieron a partir del caudal erogado por la presa ubicada en el Embalse de Los Molinos y el porcentaje de aportación de las cuencas que conforman cada río (Langa Sánchez et al., 2009). Como se muestra en la fig. 16, el mayor aporte de agua lo produce el Río Los Espinillos, siguiendo en volumen de caudal erogado el Río Los Reartes.

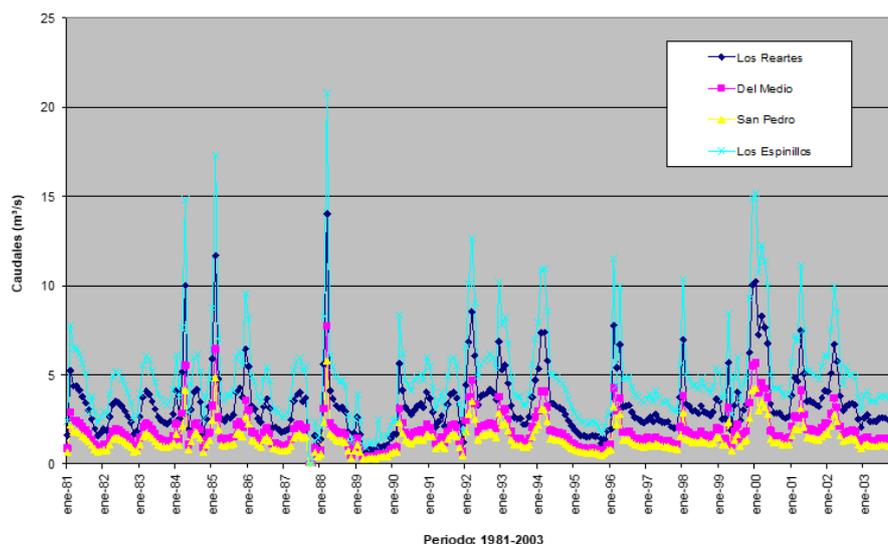


Figura 16 Caudales medios mensuales para el período 1981-2003

Tabla 8: Litología de la cuenca

	Litotipo Primario	Litotipo Secundario	Unidad Litológica	Edad
01	Granitos, Grandioritas y Tonalitas	Granitos	Granitoides Porfídicos Medios (Granitos porfíricos. Dos micas. Leucogranitos)	Devónico Medio Superior - Carbonífero Inferior
02	Pegmatitas	Pegmatitas	Pegmatitas homogéneas o zoneadas derivadas del Batolito de Achala	Devónico - Carbonífero Inferior
03	Sedimentos Fluvioeólicos	Loess y aluviones	Formación Charbonier, Formación Toro Muerto	Pleistoceno Medio - Superior
04	Sedimentos Continentales	Limos y arenas	Formación Brochero	Plioceno
05	Sedimentos Fluvioeólicos	Arenas y Limos	Formación Guanaco Muerto, Formación Chuña, Formación Mina Clavero	Pleistoceno Superior - Holoceno
06	Hornfels	Hornfels	Hornfels Villa Alpina y Characato (Complejo Intrusivo Achala)	Devónico - Carbonífero
07	Gneises	Gneises	Gneis Sierra Chica	Proterozoico Superior - Cámbrico Inferior
08	Pegmatitas	Pegmatitas	Pegmatitas homogéneas o zoneadas derivadas del Batolito de Achala	Devónico - Carbonífero Inferior
09	Rocas Máficas y Ultramáficas	Rocas Ultramáficas	Rocas Ultramáficas	Proterozoico Superior - Cámbrico Inferior

4.3 Geomorfología

La zona de estudio abarca parte de tres formaciones geológicas de la Provincia de Córdoba como se presenta en la fig. 18.

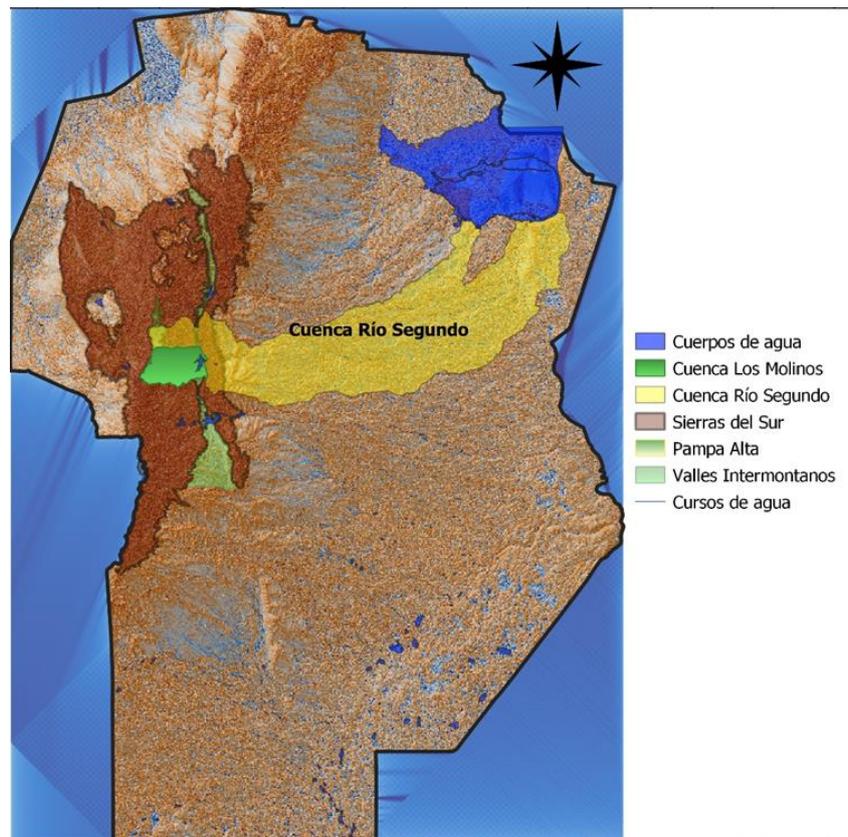


Figura 18 Geomorfología de la Provincia

inversas buzantes hacia el oeste y este, respectivamente, que en su zona central produce un escalonamiento, más o menos simétrico, de bloques de basamento progresivamente más elevados hacia el centro de la unidad (Carignano et al., 1999 y citas allí contenidas). Estos bloques tienen una suave inclinación al este y están truncados por superficies de erosión (pampa de Achala, pampa de San Luis, pampa de Olaen, Potrero de Gero, etc.). Al igual que Sierra Norte-Ambargasta, esta unidad sería un antiguo horst que habría permanecido elevado desde principios del Mesozoico (durante el cual sufrió la tectónica distensiva cretácica), y que en el Cenozoico fue afectado por la tectónica compresiva andina, la cual lo ascendió y basculó hasta su posición actual (Carignano et al., 1999).

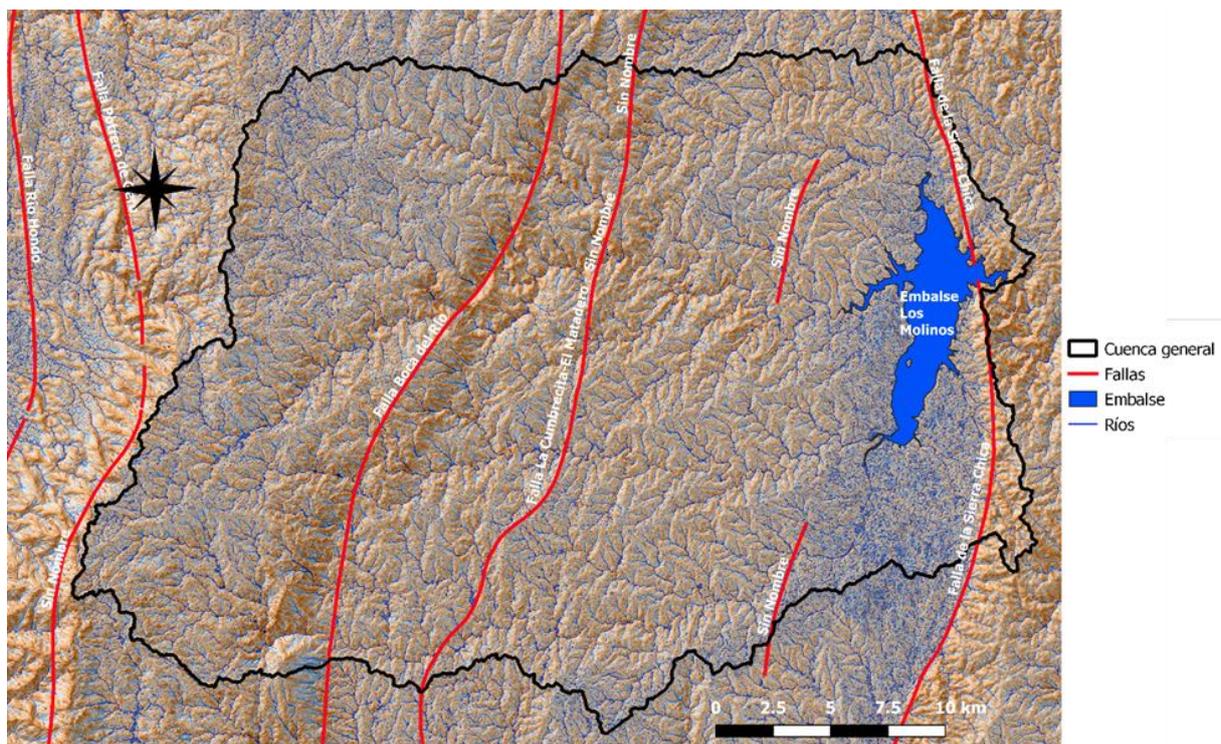


Figura 20: Fallas geológicas

El fallamiento cenozoico aquí tiene importante participación morfogenética, lo que se aprecia en el entallamiento actual del sistema fluvial y en el típico perfil asimétrico de las serranías que componen sus extremos sur y norte (Comechingones, Gaspar, Perchel y Cuniputu). No obstante, la Sierra Grande es un bloque de basamento

aplanado, levemente inclinado al este, de bajas pendientes y forma ligeramente arqueada, coronado por extensas planicies escalonadas, labradas sobre rocas graníticas y metamórficas, que ocupan casi el 75% de su extensión.

Estas planicies están formadas por amplias lomas y colinas homogéneas de basamento, con cumbres aplanadas, ligeramente convexas y laderas suavemente convexas; entre las que se extiende un sistema de amplios valles. Cumbres y fondos de valles mantienen una marcada regularidad de alturas, lo que permite reconstruir la posición de diferentes superficies subhorizontales, que están separadas por escarpes discretos y de escasa altura. Estas escarpas tienen bajas pendientes y trazas sinuosas, encontrándose muy disectadas y, en la zona norte, contornean los cursos principales de la red de drenaje. En la zona central esas superficies están limitadas al este y oeste por escarpes muy abruptos, que forman frentes de 300 a 500 m de resalto. Por mucho tiempo, esos escarpes fueron considerados escarpas de fallas, aun cuando no se tuviera evidencia directa de fallas asociadas con ellas. Actualmente se considera que son escarpes compuestos (erosivos y de falla) producto de la superposición de eventos morfogénicos mesozoicos y cenozoicos (Carignano et al., 1999 y citas allí contenidas). Los dos escarpes más prominentes descienden gradualmente desde el centro hacia el norte y sur y se conectan con los escarpes que bordean la sierra por sus extremos. El escarpe superior se localiza altitudinalmente entre los 1700 y 2000 m s.n.m., y el inferior entre los 1500 y 1300 m s.n.m. Estos se encuentran disectados por grandes quebradas transversales, algunas de las cuales son cabeceras de las cuencas de los ríos más importantes de la provincia.

Los modelos digitales de terreno y los perfiles topográficos muestran cuatro niveles de superficies de erosión, ubicados aproximadamente entre 2200 - 1800 m s.n.m., 1700 - 1500 m s.n.m., 1300 - 950 m s.n.m. y 800 - 600 m s.n.m., ordenados en forma

aproximadamente concéntrica al núcleo de la sierra, con una simetría en la gradación, ubicándose los menos erosionados en el interior de la sierra (Carignano et al., 1999). Sobre la parte más elevada de la Sierra Grande (Pampa de Achala y sectores periféricos), entre los 2200 y 1900 m s.n.m., se localiza el primer nivel y más antiguo: una planicie regional, combada hacia los bordes, que en su interior tiene valles muy amplios de fondo plano y poca profundidad. Allí, es notorio el poco encajamiento de la red de drenaje en los órdenes bajos, respecto de los órdenes altos que se encuentran a la salida de esos valles, y que han excavado profundamente al granito. Los amplios interfluvios se presentan como lomas de formas regulares, redondeadas y bajas, con vertientes suaves y ligeramente convexas, donde se observa el predominio de una morfología abochada (apilamiento de rocas núcleo) con cerros residuales tipo bornhardt y muchas oquedades ocasionadas por desintegración de una superficie de roca meteorizada. Es llamativa la regularidad topográfica en esta superficie cumbral del granito y la continuidad que tiene hacia las áreas metamórficas vecinas. Toda la morfología señalada indica que esta superficie podría ser un etchplain al igual que las paleosuperficies más altas de Sierra Norte-Ambargasta.

Bordeando el núcleo de la Sierra Grande, siempre en una posición topográfica más baja que la Pampa de Achala y el macizo del cerro Los Gigantes (aproximadamente entre 1700-1500 y 1300-950 m s.n.m.), se ubican dos superficies de erosión más jóvenes que la anterior (Carignano et al., 1999), que se encuentran escalonadas a su vez entre sí, estando separadas por escarpes bien definidos con los que se relacionan mediante una superficie más o menos cóncava. Estas superficies poseen una notoria uniformidad morfológica, caracterizada por cerros y lomas elongados, con laderas convexas suaves, de cimas redondeadas o algo achatadas. En las zonas centro y sur tienen vertientes rectilíneas o ligeramente convexas; mientras que en el área centro-

norte, las laderas presentan una convexidad más evidente e inclinaciones algo menores. Esta gran regularidad de las superficies, con frecuencia, es interrumpida por elevaciones rocosas correspondientes a rocas acastilladas (tors, koppiescastles) y montes islas.

En algunos sitios de las superficies mencionadas precedentemente, se han preservado restos de importantes perfiles de meteorización (Carignano et al., 1999). Al sur de la Sierra de Comechingones se encuentra el batolito de Cerro Áspero, que en su borde sur presenta un relieve negativo respecto de su encajonante metamórfico. Esto habría sido producido por erosión diferencial entre ambas rocas, pues la superficie presenta numerosas evidencias morfológicas de ser la raíz de un frente de meteorización que penetró más profundamente en el granito. Según Carignano et al. (1999) estas superficies serían pediplanicies, según los criterios establecidos por King (1953), que estarían separadas por escarpes generados por erosión retrocedente hacia el interior del macizo montañoso (retroceso por pedimentación), según las teorías de Penck (1924) y King (1953). El origen de estos escarpes retrocedentes estaría en las fallas normales generadas por el rifting cretácico.

En algunos casos, dichos escarpes están magnificados por la tectónica andina que reactivó fallas ubicadas en su media ladera o generó nuevas fracturas cerca de su base, ampliando el resalto original (Carignano et al., 1999 y citas allí contenidas). Un cuarto nivel de erosión más discreta y de menor desarrollo se localiza en la periferia de la sierra (entre 800-600 m s.n.m.).

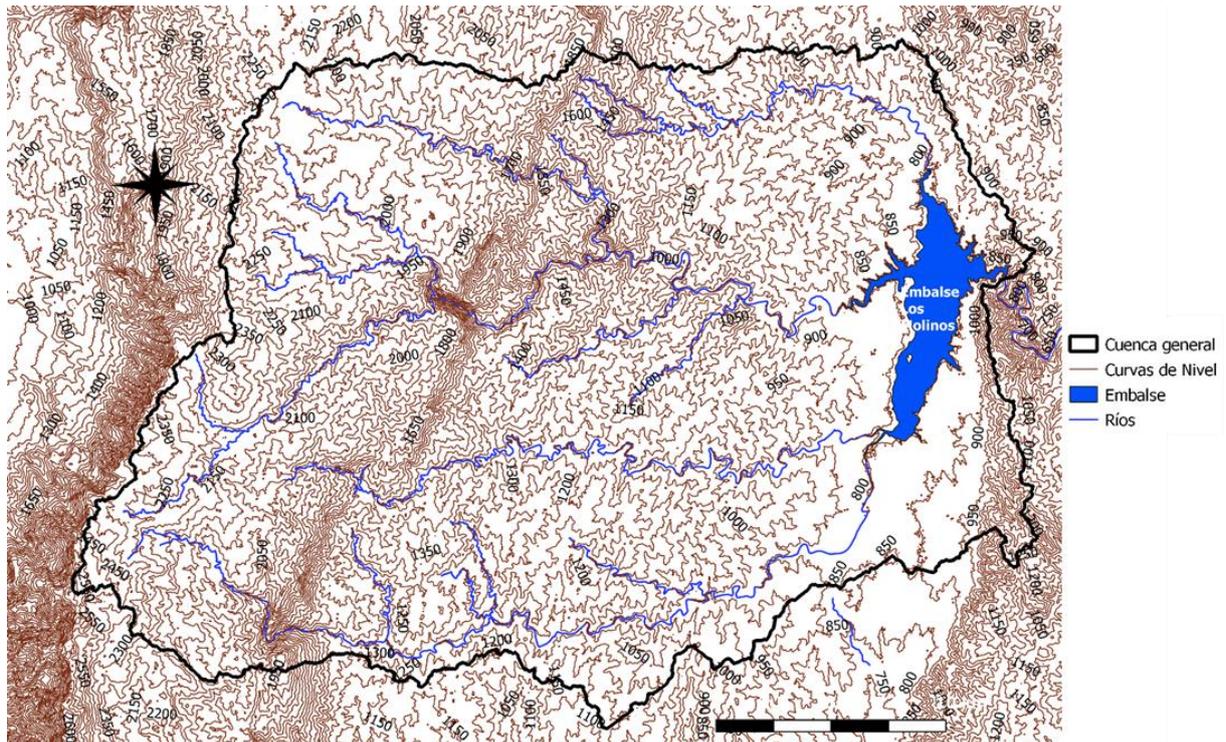


Figura 21 Altimetría de la cuenca

Las características geomorfológicas descritas precedentemente cambian un poco en la Sierra de Comechingones, al sur de la latitud del cerro Champaquí. Esta sierra constituye el relieve más prominente en el sector sur del cordón Sierra Grande-Comechingones y, a diferencia de la sierra Grande, tiene un marcado perfil asimétrico, en el que se destaca como elemento morfológico dominante la gran escarpa de falla occidental, coincidente con el frente de levantamiento andino de la sierra. Sobre esa escarpa por disección fluvial se han formado espolones muy notorios que, en la gran mayoría de los casos, presentan interfluvios agudos con un relieve relativo entre estos y el fondo de los valles bastante significativo. Además, sobre esos espolones pueden reconocerse caras libres de fracturas subverticales, cuya exposición es propiciada generalmente por desprendimientos gravitacionales. También es factible observar morfologías de aspecto triangular en la unión montaña-piedemonte, a semejanza de espolones facetados.

Sobre la ladera oriental se encuentran remanentes de las mismas paleosuperficies de la Sierra Grande, sólo que aquí están más inclinadas. El paisaje que predomina allí, guarda bastante relación con lo ya descrito en el ámbito análogo de la Sierra Grande. Las principales diferencias se relacionan con un mayor gradiente de inclinación en el bloque de Comechingones (la pendiente general del bloque alcanza en algunos sectores 5°). Las superficies de erosión regional antes mencionadas continúan sobre esta sierra, y su seguimiento puede hacerse sin mayores complicaciones. Degiovanni y Andreazzini (2013) y Andreazzini y Degiovanni (2014) describen remanentes de superficies de erosión desarrolladas sobre rocas graníticas del batolito Cerro Áspero (Sierra de Comechingones) y sobre rocas metamórficas y miloníticas presentes al norte y sur de este cuerpo intrusivo.

En las Sierras Grandes-Comechingones no hay sedimentos paleozoicos, mesozoicos o paleógenos que se puedan asociar a las superficies; sólo se encuentran sedimentos neógenos sobreyaciendo al tercero y al cuarto nivel de paleosuperficies, y siempre restringidos a los bordes de la sierra. No obstante, se infiere una edad al menos cretácica para las superficies segunda y tercera, pues diques basálticos datados en 55 ± 2 Ma que se encuentran en el Río Guasta (Gordillo y Lencinas, 1979) están cortados por la 3a superficie. Mientras que dos edades Sm-Nd de 117 ± 26 Ma y 131 ± 22 Ma, fueron obtenidas de fluoritas epitermales provenientes del batolito Cerro Áspero (mina Bubú) y del batolito de Achala (mina La Nueva), respectivamente, que están truncadas por las superficies de erosión 2a y 3a (Carignano et al., 1999). Dado que se ha determinado una interacción entre aguas meteóricas y los fluidos hidrotermales que dieron origen a esas mineralizaciones, se estima que ésta se produjo muy cerca de la base del frente de meteorización jurásico-cretácico representado por la paleosuperficie de Achala. Löbens et al. (2011), Bense et al.

(2012), mediante termocronología de baja temperatura demostraron que las sierras ya estaban elevadas al final del Cretácico, conformando un alto topográfico que era sometido a erosión; lo que refuerza la hipótesis sobre la antigüedad de las paleosuperficies.

4.3.2 Valle de Calamuchita

Entre la Sierra Chica y la Sierra Grande se alinean la mayor parte de los valles estructurales longitudinales. Su origen está en el levantamiento de la Sierra Chica y están comprendidos entre el escarpe del sistema de fallas de la Sierra Chica (bloque elevado) y la superficie estructural de la Sierra Grande (bloque hundido). La segmentación de esos valles a lo largo de la traza de la falla de la Sierra Chica está controlada por la paleotopografía de la superficie estructural de la Sierra Grande y por la presencia de altos estructurales limitados por lineamientos oblicuos que, actuando como rampas laterales, producen la segmentación general de la falla Sierra Chica.

El Valle de Calamuchita comienza en el de Los Reartes y se extiende hasta el Embalse Río Tercero, a partir del cual comienza el Valle de La Cruz, que concluye cerca de la localidad de Río de Los Sauces (al sur).

Los perfiles topográficos transversales, en sentido O-E, de todos esos valles muestran una marcada asimetría, con una vertiente oriental abrupta, integrada por el escarpe de la falla de la Sierra Chica y los abanicos aluviales acumulados al pie de la misma, y un flanco occidental que presenta pendientes menores, constituido por la superficie estructural del bloque de la Sierra Grande. Estos valles, en forma conjunta, tienen una extensión longitudinal aproximada de 200 km y 5 a 10 km de anchura. Sus alturas varían entre los 530 m s.n.m. (Embalse Río Tercero) y 1100 m s.n.m. (alrededores de La Cumbre). Los valles ubicados en los extremos sur y norte pierden altura gradualmente y se confunden con las planicies vecinas.

Los ríos antecedentes que atraviesan los diferentes segmentos de la Sierra Chica generalmente están conformados por varios tributarios que tienen sus nacientes en las Sierras Grandes, los cuales confluyen en los valles principales para luego traspasar la mencionada sierra. En Los Reartes nace el río Los Molinos y en Calamuchita, nace el río Tercero (Ctalamochita). Todos estos ríos han desarrollado una variada morfología fluvial, mayormente terrazas de corte y relleno asimétricas, con planicies aluviales restringidas. La morfología interna de los valles está controlada por las diferentes tasas de elevación que presenta cada tramo de la falla de Sierra Chica.

En el Valle de Los Reartes hay solamente un nivel de abanicos fósiles que también está muy erosionado (probablemente del Pleistoceno medio) y casi no hay evidencias de abanicos activos, excepto unos pequeños abanicos de derrubios (conos de deyección). El Valle de Calamuchita tiene un nivel de abanicos fósiles que está en un estadio incipiente de erosión (Pleistoceno tardío) y pequeños abanicos activos muy restringidos en extensión; mientras que el Valle de La Cruz tiene un nivel de abanicos fósiles restringido al pie de las laderas del valle, que no presenta evidencias significativas de erosión y está totalmente cubierto por un manto de sedimentos loessoides muy arenosos.

La edad de este conjunto de valles está vinculada directamente a la historia tectónica cenozoica del sistema de fallas de la Sierra Chica. Aunque no hay dataciones específicas sobre los primeros movimientos, la edad del valle se puede estimar a partir de los sedimentos más antiguos que hay en su interior (exceptuando los cretácicos que corresponden a un ciclo de deformación previo). En el Valle de Los Reartes hay sedimentos con abundante fauna pliocena; entretanto en el valle Calamuchita el

registro de fósiles no es más antiguo que el Pleistoceno medio y en el Valle de La Cruz se han encontrado fósiles pliocenos.

4.3.3 Sierras Chicas

Es el cordón más oriental del centro de las Sierras de Córdoba y se extiende desde los 30° 36'S hasta los 32° 38'S. Tiene una longitud de unos 250 km y una anchura variable entre 12 y 20 km. Su mayor elevación está en el Cerro Uritorco (1950 m s.n.m.) y la mínima en el piedemonte oriental, aproximadamente en los 500 m s.n.m., presentando una altura media de 1200 m s.n.m. Su extremo norte está constituido por tres sierras: cordón de Copacabana-Pajarillo-Masa (al oeste), Sierras de La Higuera (centro) e Ischilín (al este) los que convergen a un cuerpo único de sierra en el sector central, conocido como la Sierra Chica, el que continúa al sur con el nombre de Sierras Los Cóndores y Las Peñas. Este conjunto serrano es una lámina de corrimiento controlada por la falla de Sierra Chica, que se extiende desde las Salinas Grandes (en el norte) hasta las planicies próximas a Río Cuarto, continuando por el subsuelo en el alto de Levalle. Una serie de fajas miloníticas antiguas, oblicuas al rumbo general, denominadas lineamientos Carapé, Quebrada Honda y Soconcho, producen la segmentación general de la falla de la Sierra Chica en tres grandes láminas de corrimiento que dan origen a las sierras previamente mencionadas.

Litológicamente es una región muy heterogénea dominada por rocas del basamento plutónico-metamórfico, parcialmente cubierto por un complejo vulcano-sedimentario cretácico (Grupos El Pungo y Sierra Los Cóndores, Conglomerados Los Terrones, Fm. Río Copacabana y Fm. Saldán), con depósitos mayormente aluviales del Paleógeno-Neógeno y acumulaciones de sedimentos fluvio-eólicos pleistocenos. En los extremos norte y sur de la sierra se encuentran los dos afloramientos más grandes de sedimentos cretácicos de la provincia, que han sido expuestos por inversión

tectónica de la falla de Sierra Chica, y están alojados en cuencas tipo pullapart vinculadas a los lineamientos oblicuos, mientras que una parte importante de su flanco oriental próximo al sector pedemontano también conserva restos de estratos rojos cretácicos. En los lugares donde afloran los estratos rojos cretácicos se puede observar la típica morfología de rocas sedimentarias de lomas suaves redondeadas. En la Sierra Los Cóndores, donde se encuentran las coladas de basaltos más extendidas, además de las lomas redondeadas, el paisaje se caracteriza por la presencia de crestas, cuevas y cerros mesas con una inclinación predominante al noreste.

Todos los bloques de basamento que componen las Sierras Chicas muestran un perfil marcadamente asimétrico con escarpe al occidente y superficie estructural al oriente; presentando el flanco oriental una notable regularidad de cumbres, la que con una inclinación de $5-10^{\circ}$ al este, se pierde debajo de los sedimentos del piedemonte oriental. Sobre este flanco se observan restos de paleosuperficies con las mismas características que las descritas para Sierra Grande, que serían equivalentes al 3er y 4to nivel que rodean aquella sierra. En general estas paleosuperficies aparecen como una extensa planicie labrada sobre rocas metamórficas, que se encuentra muy degradada por erosión, y cuyos restos ocupan casi el 65% de su extensión (Cioccale 1999b). Los remanentes de estas paleosuperficies se observan claramente en las cumbres aplanadas de las lomas y colinas de basamento que, a pesar de su inclinación al este, mantienen una marcada regularidad de alturas.

En la mayor parte de este cordón serrano se reconoce solamente una sola paleosuperficie, pero sobre el cuerpo principal de la Sierra Chica (sector central), al norte de la quebrada del cerro Pan de Azúcar, se ha determinado la presencia de dos superficies de erosión diferentes, separadas por un escarpe muy disectado y traza

sinuosa, orientado al este (Cioccale, 1999b), que se extiende aproximadamente desde un poco al sur del paraje de Cabana (Unquillo), pasando por los parajes de Candonga y Tres Cascadas, llegando hasta la quebrada del río Pinto. Estas superficies de erosión tienen diferentes grados de disección, ubicándose la menos erosionada en la parte alta de la sierra (Cioccale, 1999b). La paleosuperficie más extendida, y más antigua, en muchos sitios tiene perfiles de meteorización donde las metamórficas están completamente transformadas en un saprolito que conserva vestigios de las estructuras metamórficas originales y donde las venas de cuarzo aún se pueden reconocer. En la zona del observatorio de Bosque Alegre aún se conserva la parte superior de este perfil, pudiendo observarse restos de un oxisol formado a expensas de la metamórfica meteorizada. Los granitoides intruidos en esas metamórficas también están muy alterados, llegando a ser una masa de regolito granítico hasta niveles muy profundos (grus). Por lo general, los cuerpos mayores de estos granitoides tienen un relieve negativo respecto de su encajonante metamórfico (Tonalita del Hongo, Granodiorita Calmayo, etc.), que evidencian la profundidad alcanzada por el frente de meteorización que se desarrolló en esta paleosuperficie.

Según Carignano et al., (1999), sobre la paleosuperficie más antigua apoyan todos los sedimentos del Cretácico superior que afloran en la sierra (megasecuencia superior, y ésta, a su vez, trunca los sedimentos del Jurásico superior-Cretácico inferior que contienen basaltos y vulcanitas (megasecuencia inferior) que se encuentran en las cuencas de Los Cóndores y El Pungo.

La 2a paleosuperficie, que se ha reconocido mayormente en la zona central y norte de la Sierra Chica, ocupa una posición topográfica más baja y bordea a la anterior. Sobre ella apoyan sedimentos paleógenos (Conglomerados cerro El Cuadrado,

Formaciones Cosquín y Villa Belgrano, etc.) y neógenos (Fm. Saguión y Calcrete de Avellaneda).

La Sierra Chica está atravesada por grandes quebradas labradas por ríos de carácter antecedente: Suquía (Primero), Anizacate, Los Molinos y Ctalamochita (Tercero) que nacen en las Sierras Grandes. Todos ellos han generado profundos valles manteniendo el diseño meandriforme original del río que se ha encajado en las rocas del basamento. Estos valles tienen un perfil transversal que evidencia claramente la existencia de dos pulsos mayores de entallamiento. El primero ha grabado sobre la paleosuperficie más antigua un amplio y profundo valle que mantiene la fisonomía del sistema meandriforme encajado, y que hacia el este se abre sobre la segunda paleosuperficie. Éste representa los dos tercios superiores del total de la profundidad de las quebradas. El segundo pulso de entallamiento se reconoce en la marcada incisión en forma de “V” cerrada, ocupada por el cauce actual, que ha sido cortada en el fondo del valle anterior y sobre la 2a paleosuperficie. Este último pulso estaría vinculado con el levantamiento de la sierra durante el Neógeno, pues corta sedimentos cretácicos y paleógenos.

4.3.4 Cartas de Suelos

Del geoportal IDE de la provincia de Córdoba, se obtuvieron las cartas de suelos de la cuenca, según lo indican la fig. 22 y la tabla 9.

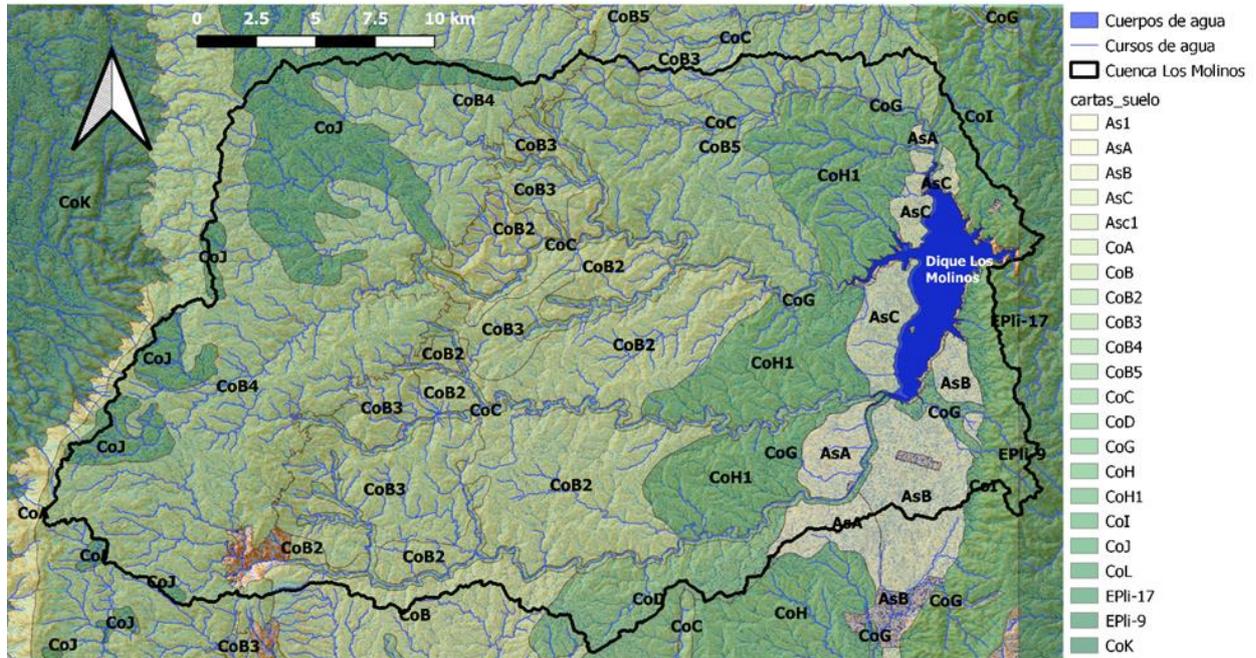


Figura 22 Cartas de suelos – Unidades cartográficas

Tabla 9: Unidades de Capacidad de uso, aptitud agrícola e índice de productividad

	AsA	AsB	AsC	CoB	CoB2	CoB3	CoB4
Capacidad de Uso	IVec	IIIec	Ivec	VIIes	VIIes	VIIsc / VIII	VIIIsc
Aptitud Forestal	1	1		2		4	5
Índice de Productividad	45	48	46	8	16	2	2
	CoC	CoD	CoG	CoH1	CoI	CoJ	CoK
Capacidad de Uso	VIIes / VIII	Ives / Vies	Vies / VIIes	Vies / VIIes	VIIes	VIIes	VIIes / VIII
Aptitud Forestal	3		3				
Índice de Productividad	3	37	25	26	7	20	1

Estas unidades se corresponden con las siguientes descripciones:

Asociación de Series SANTA ROSA III; SAN IGNACIO III y SAN IGNACIO IV

Símbolo: AsA

Capacidad de Uso: IVec

Aptitud Forestal: 1

Índice de Productividad: 45

Unidad representada por un relieve de lomas onduladas, con gradientes que en general no superan el 3%. Los suelos se han originado a partir de sedimentos loésicos de textura franco limosa.

La Serie Santa Rosa III domina en lomas y pendientes, mientras que en los bajos o sectores cóncavos y pie de loma se encuentran San Ignacio III y IV. Son suelos profundos, bien drenados, moderadamente afectados por erosión hídrica.

Los afloramientos rocosos son escasos.

Originalmente esta unidad presentaba la vegetación típica del Espinal, actualmente muy alterada.

Asociación de Series SANTA ROSA I; SANTA ROSA II; SANTA ROSA III; CALAMUCHITA IV y SAN IGNACIO IV

Símbolo: AsB

Capacidad de Uso: IIIec

Aptitud Forestal: 1

Índice de Productividad: 48

Esta unidad abarca el área central del Valle de Calamuchita, presenta un relieve de lomas suavemente onduladas, con pendientes largas, con gradiente general del 1% y que en raras ocasiones supera el 3%.

Los suelos se han desarrollado en general a partir de sedimentos loésicos de textura franco limosa, son profundos y bien drenados en las lomas y pendientes largas donde dominan SANTA ROSA I y III. En las proximidades de las sierras, los depósitos sedimentarios de origen fluvial han dado origen a Calamuchita IV, de textura franco arenosa gravillosa, algo excesivamente drenados. En sectores planos y bajos alargados los suelos dominantes son San Ignacio IV y Santa Rosa II, desarrollados sobre materiales fluvio-eólicos de textura franca a franco arcillo limosa.

Las pendientes moderadas, la susceptibilidad a la erosión hídrica y las condiciones climáticas moderadamente adversas, son las limitantes que restringen la elección de cultivos y los suelos requieren prácticas especiales de conservación.

Asociación de Series SANTA ROSA I; SANTA ROSA II; SANTA ROSA III; CALAMUCHITA IV; SAN IGNACIO III y SAN IGNACIO IV

Símbolo: AsC

Capacidad de Uso: IVec

Índice de Productividad: 46

Al igual de lo que ocurre con los Complejos, esta unidad es una combinación de la asociación A y la B, que por razones de la escala utilizada no se pudieron separar.

En este caso la simbología (AsA + AsB) significa que, en el total de la superficie de la unidad, la Asociación A domina en un 70% sobre la B.

Complejo indiferenciado de Series CALAMUCHITA I; CALAMUCHITA III; CALAMUCHITA V y afloramientos rocosos

Símbolo: CoB

Capacidad de Uso: VIIes

Aptitud Forestal: 2

Índice de Productividad: 8

Áreas escarpadas o muy colinadas en el sector oriental, entre 800 y 1.000 m.s.n.m. aproximadamente, con menos del 10% de roca aflorante, y fuertemente inclinadas entre los 1000 y 1800 m.s.n.m. en el sector oeste de la unidad, con más del 20% de roca aflorante. Los suelos presentan escaso desarrollo, por lo general son someros o muy someros apoyados sobre roca alterada o sobre roca firme, desarrollados sobre materiales autóctonos.

En pendientes pronunciadas de hasta el 45% de gradiente, dominan suelos de textura franco arenosa, gravillosa, someros, de espesor variable, apoyados sobre roca alterada, ligeramente firme. En ambientes cóncavos de escaso gradiente, los suelos, algo excesivamente drenados, se han desarrollado a partir de materiales aluvionales de arrastre. El perfil muestra una sucesión de capas generalmente franco arenosas, gravillosas, moderadamente profundo a profundo.

En los valles y bajos con pendientes de 10 a 25%, el horizonte superficial presenta un contenido moderadamente alto de materia orgánica y es de textura franco arenosa y profundo.

Los afloramientos rocosos son más evidentes en los sectores escarpados.

El relieve escarpado, complejo, los suelos poco profundos por contacto lítico, la baja retención de humedad y drenaje excesivo, y el grado de pedregosidad y rocosidad, determinan que el uso sea ganadero sobre pasturas naturales y/o forestales.

Complejo indiferenciado Área fuertemente inclinada de Series CALAMUCHITA I; CALAMUCHITA II; CALAMUCHITA III; CALAMUCHITA V y suelos orgánicos del Orden Histosoles y LOS NOGALES II

Símbolo: CoB2

Capacidad de Uso: VIIes

Índice de Productividad: 16

Son áreas fuertemente inclinadas, integradas por un complejo de suelos ácidos, poco desarrollados con porcentajes variables de roca aflorante y algunas zonas con problemas de hidromorfismo. En esta área es donde se ubica la mayoría de las forestaciones.

Integran este complejo de suelos, las series Calamuchita I, II, III y V, la mayoría de ellas desarrolladas a partir de materiales autóctonos.

En las laderas fuertemente inclinadas, con pendientes del 10 al 25%, dominan Calamuchita I y II. Cuando el gradiente es del 25 al 45%, o sea en los relieves muy pronunciados, la serie dominante es Calamuchita III.

Todos estos suelos de escaso desarrollo, se apoyan sobre roca alterada de variable profundidad.

En los bajos alargados, que representan el 5% de la superficie, aparece Calamuchita V, donde se evidencian algunos problemas de hidromorfismo.

Esta unidad cartográfica, dominada por suelos arenosos, con diferentes grados de pedregosidad, es muy pastosa "y los afloramientos rocosos están presentes entre un 10 y 20%.

Esta unidad cartográfica se correlaciona con la unidad CoB y la diferencia está dada por inclusiones de suelos menores en este sector que corresponden al Orden de los Histosoles (orgánicos) en áreas bajas y la Serie Los Nogales II vinculada a pendientes alargadas.

Complejo indeterminado desarrollado sobre roca granítica.

Símbolo: CoB3

Capacidad de Uso: VIIsc/VIII

Aptitud Forestal: 4

Índice de Productividad: 2

Relieve escarpado con gradientes que oscilan entre el 25 y 45%. Su litología está integrada por rocas ígneas de composición granítica, que corresponden a intrusiones postmetamórficas, de contactos netos y discordantes regionalmente.

Los suelos resultantes de la intemperización de la roca granítica son muy someros y la clase por tamaño de partícula es fragmentaria, constituida por grava, piedra y arenas muy gruesas, y escasa tierra fina que no llegan a rellenar los intersticios.

El porcentaje de pedregosidad es alto y la roca aflorante alcanza el 40%, mostrando las típicas formas aborregadas.

Las limitantes son muy graves; el 50% de la superficie no es apta para pasturas o para forestar y el resto puede usarse como campos naturales de pastoreo siendo su aptitud forestal baja.

Complejo indeterminado de Sierras altas sobre rocas graníticas

Símbolo: CoB4

Capacidad de Uso: VIIIsc

Aptitud Forestal: 5

Índice de Productividad: 2

Similar por su constitución litológica y de suelos al CoB3, pero se extiende por encima de los 1800 m s.n.m. por lo que resulta no apto como campos naturales de pastoreo o para forestar.

Complejo indiferenciado de Series CALAMUCHITA I; CALAMUCHITA III; CALAMUCHITA IV y rocas aflorantes.

Símbolo: CoC

Capacidad de Uso: VIIes/VIII

Aptitud Forestal: 3

Índice de Productividad: 3

Unidad cartográfica correspondiente a las quebradas de los ríos y arroyos principales, con dominio de pendientes abruptas con gradientes que superan el 45%.

Los suelos con pendientes son someros o muy someros, de textura arenosa gravilosa y los afloramientos rocosos superan el 20%.

Estas condiciones de pendientes abruptas, suelos muy someros y alto porcentaje de pedregosidad y rocosidad, hacen difíciles los accesos y por ende la explotación de los mismos para pastoreo y forestación.

Complejo indiferenciado Pampa Serrana de Series YACANTO I; YACANTO II; YACANTO III; YACANTO IV; CALAMUCHITA III y SAN IGNACIO IV

Símbolo: CoD

Capacidad de Uso: IVes/Vles

Índice de Productividad: 37

Esta unidad cartográfica constituye una planicie (Pampas serranas) con lomas onduladas que ocupan una posición relativamente alta sobre el nivel del mar.

Los suelos que integran este complejo son: Yacanto I, II, III y IV, Calamuchita III y San Ignacio IV.

En las lomas onduladas que ocupan la parte central de la unidad domina Yacanto I, en las pendientes Yacanto II y IV, y en los sectores más planos, San Ignacio IV. Todos estos suelos desarrollados sobre materiales loessoides presentan en algún nivel del perfil, carbonato de calcio diseminado en la masa o cementado, formando mantos de tosca.

En los bordes de estas Pampas serranas y en zonas donde el relieve se hace más quebrado dominan Yacanto III y Calamuchita III, la primera especialmente en el sector oriental y la segunda en el occidental y sur.

Los porcentajes de roca aflorante en las lomas onduladas son prácticamente insignificantes. Donde el terreno se hace más quebrado varían entre un 10 y 20%.

Complejo indiferenciado de Series CALAMUCHITA IV; SANTA ROSA II; SANTA ROSA III y afloramientos rocosos.

Símbolo: CoG

Capacidad de Uso: Vles/Vlles

Aptitud Forestal: 3

Índice de Productividad: 25

Unidad correspondiente a las quebradas de los ríos y arroyos principales, con pendientes de hasta el 30% en el sector occidental que se suavizan hacia el este. La vegetación dominante es el monte xerófilo con un tapiz herbáceo.

En las pendientes escarpadas los suelos son someros o muy someros, desarrollados sobre materiales autóctonos (gravillosos), producto de la meteorización de las rocas metamórficas, apoyadas directamente sobre roca alterada. El porcentaje de roca aflorante alcanza el 20%. Donde el relieve se suaviza los suelos han evolucionado a partir de sedimentos fluvio-eólicos de textura franca y sobre sedimentos loésicos franco limosos.

La aptitud de uso es ganadera, sobre pasto natural y/o forestal. En sectores aislados, de escaso gradiente, es posible la práctica de agricultura o pasturas cultivadas.

Complejo indiferenciado Sierras Bajas de Series CALAMUCHITA III; CALAMUCHITA V; SANTA ROSA II; SAN IGNACIO I; YACANTO III; LOS REARTES y VILLA GENERAL BELGRANO

Símbolo: CoH1

Capacidad de Uso: Vles/Vlles

Aptitud Forestal:

Índice de Productividad: 26

Esta unidad está caracterizada por la presencia de sierras bajas, inclinadas, integradas por un complejo de suelos ácidos y alcalinos, con porcentajes variables de roca aflorante y presencia de monte natural.

En sectores muy pronunciados, con pendientes de hasta el 45%, domina Calamuchita III. En los bajos con escaso gradiente dominan alternativamente Santa Rosa II y San Ignacio I, mientras que en los bajos (Vallecitos) con pendientes del 10 al 25% se hace preponderante Calamuchita V.

En las lomadas suaves y pendientes, alternan indistintamente Santa Rosa II, San Ignacio I y Yacanto III.

Los afloramientos rocosos se hacen más evidentes en los sectores más pronunciados, pero en general podemos decir que no superan el 20% de la superficie.

A partir del Río Los Reartes y hacia el norte en los sectores bajos, comienza a dominar la serie Los Reartes, y en pendientes alargadas la Serie Villa General Belgrano (unidad H1).

Complejo indiferenciado Sierras Chicas de Serie CALAMUCHITA III y suelos con carbonato de calcio

Símbolo: Col

Capacidad de Uso: VIIes

Aptitud Forestal:

Índice de Productividad: 7

Esta unidad está representada por una porción del cordón de las sierras chicas de Córdoba, que localmente se denomina Cumbre del Hinojo.

Presentan estas sierras, como características sobresalientes, la existencia de pendientes muy abruptas en su flanco occidental y se hallan recubiertas por una vegetación típica de monte serrano.

En general podemos decir que en esta unidad domina Calamuchita El, que presenta algunas variantes como ser, el espesor de la capa superficial y la presencia, en

algunos sectores, de un material aproximadamente de 1 cm de espesor, con mucho carbonato de calcio, que se acuña y desaparece.

En los sectores bajos dominan San Ignacio IV y V.

La roca aflorante alcanza un 30%, haciéndose más manifiesta en la abrupta pendiente occidental.

Complejo indiferenciado Pampa de Achala de Series ACHALA I; ACHALA II; ACHALA III; ACHALA IV; ACHALA V; ACHALA VI y ACHALA VII

Símbolo: CoJ

Capacidad de Uso: VIles

Aptitud Forestal:

Índice de Productividad: 20

Esta unidad corresponde a la denominada Pampa de Achala y se trata del último escalón tectónico de las Sierras Grandes, en rocas graníticas, relativamente plana, aunque presenta relieves locales ondulados y escarpados.

Su forma, pampa de altura, contrasta con los relieves de escalpas de fallas mucho más quebradas y con inclinación evidente hacia el este y hacia el oeste.

Se encuentra por encima de los 1.800 m.s.n.m y la vegetación dominante corresponde a pastizales de altura y en áreas protegidas se destaca la presencia del tabaquillo, como única leñosa existente.

Los grados de pedregosidad y rocosidad varían según las distintas posiciones del relieve y los suelos se han desarrollado sobre materiales originarios autóctonos.

Al Complejo lo integran los suelos Achala I, II, III, IV, V, VI y VII que son los más representativos.

En laderas onduladas y muy onduladas con pendientes de hasta el 10% dominan Achala I y VI. Mientras que en las laderas altas escarpadas con gradientes de

pendientes de hasta el 25%, dominan Achala II y V y en los sectores cóncavos Achala III que presenta algunos problemas de hidromorfismo y toda el área es erosionada diferencialmente.

Achala IV y VII son representativos en terrazas planas o ligeramente inclinadas y en la porción más baja de las pendientes escarpadas.

Complejo indeterminado Escarpa Occidental de las Sierras Grandes de suelos Ustorthentes líticos, típicos y paralíticos y Haplustoles líticos, énticos y fluvénticos.

Símbolo: CoK

Capacidad de Uso: VIIes/VIII

Aptitud Forestal:

Índice de Productividad: 1

Se trata de la escarpa occidental de las Sierras Grandes y su relieve se caracteriza por laderas escarpadas y abruptas. La información que se consigna de esta unidad, fue tomada del Mapa de Suelos de la Provincia de Córdoba a nivel de reconocimiento, de escala 1:500.000.

El relieve se caracteriza por laderas inclinadas y escarpadas, con un 60% de roca aflorante y pendientes con gradientes del 40%, con grados de erosión ligera a grave.

Los suelos dominantes son: Ustorthent lítico de muy poco desarrollo y pobre contenido de materia orgánica. Ustorthent típico en lomas aluviales y Ustorthent paralítico en laderas inclinadas junto con Haplustoles líticos.

Haplustoles énticos y fluvénticos dominan en valles serranos y terrazas de ríos, estando presentes, los nombrados en último término, también en lomas y pendientes.

4.4 Clima

La cuenca en estudio posee dos zonas de características climáticas diferentes, la primera con un clima de montaña al oeste y segunda es la zona del Valle de Calamuchita en proximidades del embalse.

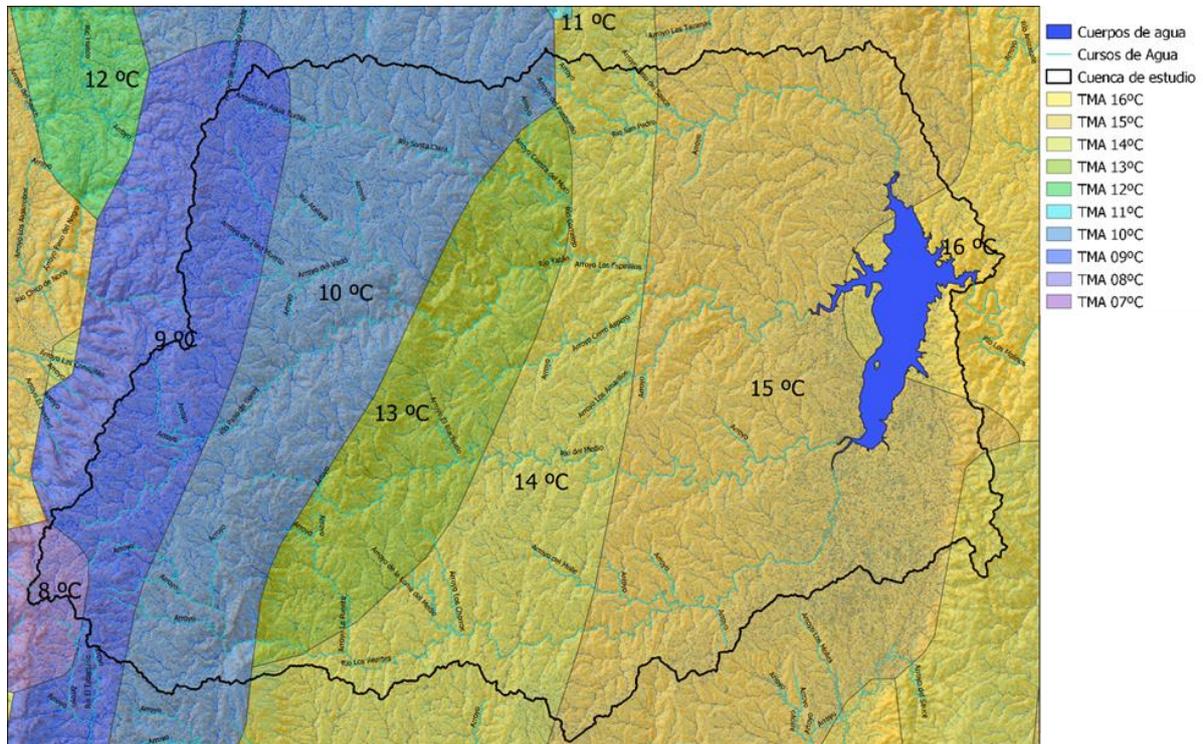


Figura 23 Temperatura media anual

La región del Valle de Calamuchita presenta un clima templado que según Köppen-Geiger se identifica como C, desarrollándose en este tipo de ambiente vegetación de bosques templados húmedos y secos, como el mediterráneo o pampeano. Las temperaturas oscilan los 18 °C como media anual y el registro de lluvias puede encontrarse entre los 600 mm a los 2000 mm en el año. Algunas altas temperatura han favorecido los incendios en zonas boscosas.

Este tipo de clima posee cuatro estaciones bien marcadas, los solsticios de verano e invierno que ocurren entre diciembre y febrero para los meses más cálidos y húmedos y entre junio y agosto para los meses más secos y fríos, durante esta época, se presentan nevadas en las cimas de la región del Valle de Calamuchita.

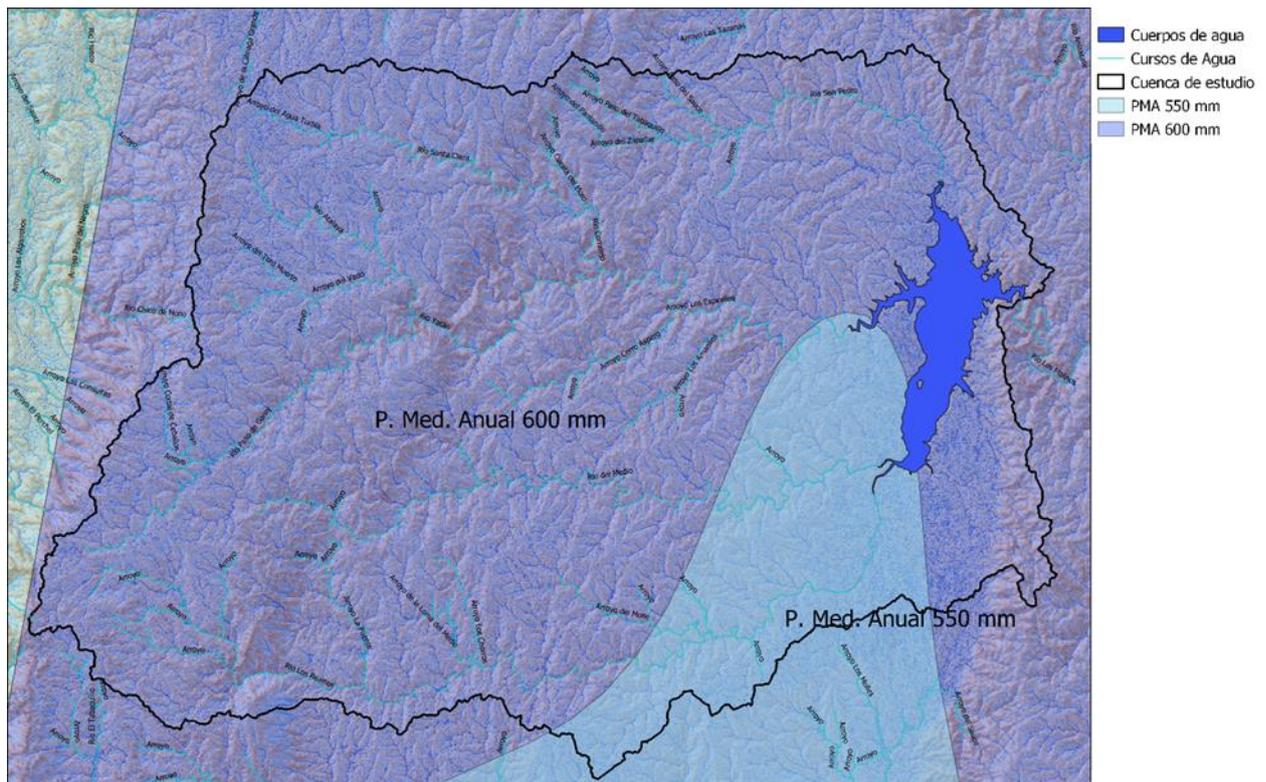


Figura 24 Precipitaciones medias anuales

En la cuenca alta, se ubican las Sierras Grandes, donde se ubica el Cerro Champaquí de casi 3000 m de altura.

Tiene días cálidos y noches frescas en verano, además llueve con frecuencia. El invierno es seco y frío, con buen sol casi todos días y nevadas de hasta 50 cm de espesor.

El clima a 1400 m s.n.m. se clasifica como cálido y templado. En invierno hay mucho menos lluvia que en verano. El clima aquí se clasifica como Cwb por el sistema Köppen-Geiger. La temperatura media anual es 13.5 °C en La Cumbrecita. En un año, la precipitación puede aproximarse a los 660 mm.

La menor cantidad de lluvia ocurre en junio con un promedio de 10 mm, mientras que la caída media en enero alcanza el valor máximo del año con 107 mm.

4.5 Regiones Geográficas

En la zona de la cuenca de aporte al Embalse Los Molinos, se encuentran tres regiones naturales distribuidas según se muestra en la fig. 25.

4.5.1 Sierras de Sur

Constituyen el cuerpo principal y de mayor extensión de la región serrana de Córdoba. Estos macizos montañosos se extienden entre los 30° 45' a los 33° 10' de Latitud Sur y entre los 64° 20' y los 65° 25' de Longitud Oeste.

En esta región se destacan: al Oeste las sierras de Serrezuela, Guasapampa y Pocho. El cordón central o de las Sierras Grandes, donde se encuentran las mayores alturas (Cerro Champaquí de 2.790 m s.n.m.), el que se prolonga al Sur en las Sierras de Comechingones. Hacia el Este y separado por el Valle de Punilla, se extiende el cordón de la Sierras Chicas.

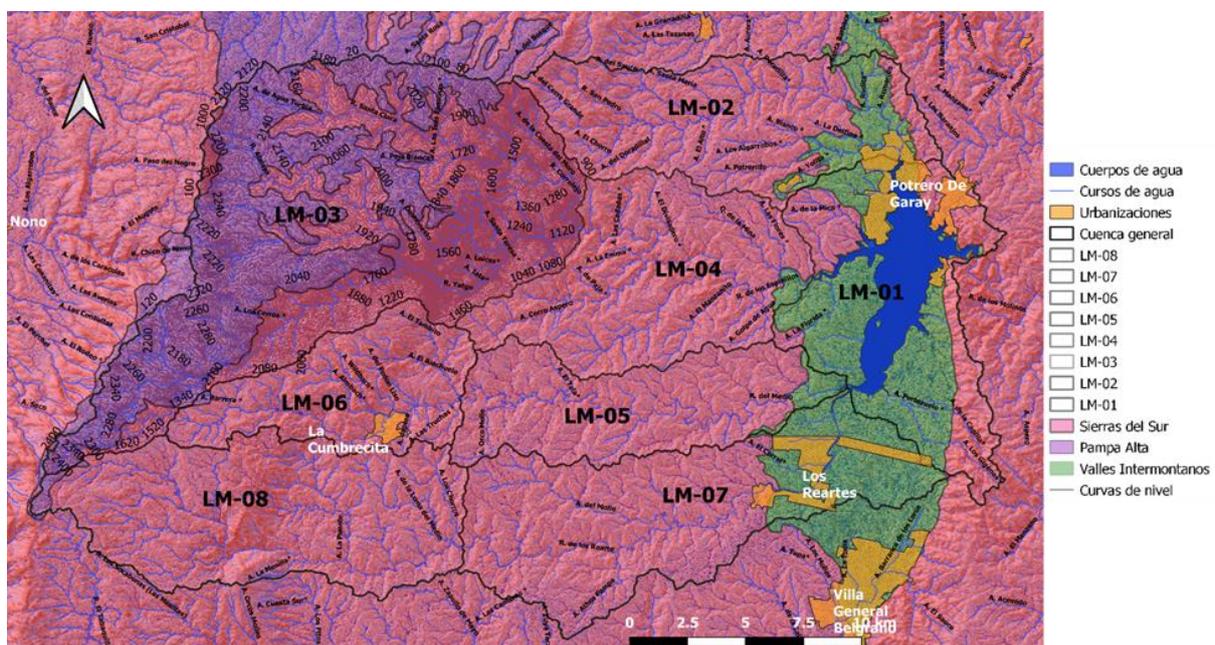


Figura 25 Regiones naturales

Las formaciones rocosas están compuestas principalmente por rocas metamórficas (gneiss, esquistos, migmatitas, etc.) e ígneas (granitos). A excepción de las pampas de altura, su relieve en general es escarpado, presentando una marcada diferencia

entre su vertiente occidental y oriental. En ésta última, dominan pendientes que varían entre el 12 % y el 45 %, la densidad de drenaje es alta y los procesos dominantes son erosión vertical asociada a cursos de agua, procesos de remoción en masa (caídas y deslizamientos de bloques) en laderas escarpadas, erosión hídrica en manto o encauzada en áreas con cobertura de sedimentos, sometidas a uso principalmente ganadero. Las áreas de relieve escarpado, ocupan aproximadamente el 70 % de la superficie de todo el ambiente serrano y constituyen las nacientes de los cursos de agua más importantes, que avenan tanto hacia la vertiente oriental como hacia la occidental. Este tipo de relieve se caracteriza por presentar fuertes pendientes, cursos angostos, encajonados, valles sin relleno sedimentario, con ollas y rápidos a nivel del cauce. En los interfluvios afloran rocas de basamento, sobre las que se desarrollaron suelos someros, pedregosos, que no superan los 10 cm de profundidad. Dominan procesos de remoción en masa y erosión fluvial. En el borde occidental y Sur de las sierras hay áreas de relieve más suavizado, que presentan valles con relleno sedimentario de origen coluvial y aluvial, pocas pendientes, suelos profundos y bien desarrollados, con alto contenido de materia orgánica y alta disponibilidad hídrica por su ubicación en el relieve.

Los ríos y arroyos serranos, presentan en general, lechos rocosos, erosivos, con saltos, rápidos, ollas y un régimen turbulento. En algunos sectores, de menor relieve, tienen un lecho areno - gravoso y algunos niveles de terrazas. Constituyen verdaderos ecosistemas, sometidos a una alta dinámica hidrológica, producto de crecientes cortas e intensas, lo que caracteriza un régimen de tipo torrencial. Los caudales pico en épocas de lluvia, suman gran cantidad de sedimentos de granulometría variada, producto de los procesos de erosión hídrica y remoción en masa.

Suelos:

La variedad de suelos que ocurren en las sierras, es el resultado de las diferencias que hay dentro de ellas en cuanto a relieve, posición en el paisaje, materiales originarios y clima. Con excepciones en las Pampas de Altura y en algunos valles y laderas bajas, los suelos de las sierras están afectados en mayor o menor grado por afloramientos de roca y piedras en superficie. La alta dinámica del paisaje produce en general suelos jóvenes de escaso desarrollo pertenecientes al Orden taxonómico de los Entisoles (64%) entre los cuales, los Ustortentes líticos y para-líticos, constituyen la gran mayoría.

En las Sierras Grandes, la alteración del complejo metamórfico es profunda, debido a una mayor humedad y a la presencia de planos de esquistosidad subverticales que favorecen la penetración del agua (meteorización profunda). Se han observado hasta 5 metros de alteración, originando suelos favorables a la penetración de raíces de coníferas y otros árboles adaptados climáticamente. En el área granítica los suelos son someros, de texturas más finas, con buenos contenidos de materia orgánica y alto porcentaje de roca aflorante.

El clima de la región de las sierras abarca desde las condiciones de aridez y semiaridez del piedemonte occidental, con suelos del Orden taxonómico de los Aridisoles, a las de los microclimas subhúmedos de naturaleza orogénica, a las cuales se asocian los Udoles serranos: Hapludoles líticos y para - líticos en laderas altas, siempre afectados por algún grado de rocosidad y Argiudoles en las Pampas de altura, profundos y bien desarrollados sobre espesores considerables de sedimentos loessoides.

En el piedemonte los materiales originarios son de texturas muy variadas, desde esqueléticas gruesas en las partes apicales de los abanicos y en los cerrillos, hasta franco limosas y arcillo limosas en el loess y derrames finos. La capa freática, es

profunda y no afecta al perfil de los suelos, pero los procesos de erosión hídrica son intensos, adquiriendo mayor importancia la actividad eólica hacia el Sur.

Vegetación:

Esta región forma parte del Distrito Chaqueño Serrano. La vegetación se distribuye a lo largo del gradiente altitudinal formando pisos o "zonas de vida", aunque esa secuencia de pisos está casi totalmente modificada por la actividad antrópica. Las diferencias de altitud determinan cambios en la vegetación que se manifiestan con la aparición de especies típicas. Algunas especies de árboles de la planicie, como quebracho blanco, algarrobo blanco, espinillos, chañar y tala, ascienden por las quebradas y fondos de valles hasta altitudes propias de la vegetación serrana, mezclándose con esta en un ecotono de difícil delimitación.

Entre los 500 y 1300 m s.n.m. se desarrolla el "bosque serrano" en forma discontinua y con distintas fisonomías debidas a diferencias de exposición, a la heterogeneidad propia de esos ambientes y a las alteraciones provocadas por las actividades humanas. El bosque serrano está dominado por molle (*Litsea molleoides*), coco, que generalmente se distribuyen como individuos aislados y orco quebracho o quebracho de las sierras.

En el estrato arbustivo dominan especies espinosas del género *Acacia* como espinillos, aromitos, garabatos, piquillín de las sierras y manzano del campo. En lugares abiertos y pedregosos encontramos carqueja y carquejilla, aromáticas como peperina y tomillo. Los chaguares, bromeliáceas de hojas de bordes espinosos, forman matas sobre las rocas, también se presentan numerosas cactáceas de vistosas flores y trepadoras, epífitas y hemiparásitas. El estrato herbáceo aparece en forma discontinua. Las especies más frecuentes son los helechos como doradilla, acompañados por numerosas dicotiledóneas herbáceas y gramíneas. A medida que

se asciende, los elementos del bosque serrano van disminuyendo en tamaño y en densidad, confundándose con el matorral serrano o romerillal. Por arriba de las comunidades de bosque y matorral serranos, a partir de los 1.000 metros de altitud, se presentan los pastizales y bosquecillos de altura. Los pastizales varían su composición de acuerdo con la altitud. En los sectores más bajos (entre 1.000 metros y 1.500 m s.n.m.) predominan especies de linaje chaqueño, mientras que a partir de los 1.800 m s.n.m. casi la mitad de las especies son de linaje andino - patagónico. Los pastizales y pajonales a menor altitud, están dominados por *Festuca hieronymi* y distintas especies de *Stipa*, como *S. tenuissima*, *S. filiculmis*, *S. Tricótoma*, entre otras. A mayor altitud las especies dominantes en los pastizales son *Deyeuxia hieronymi*, *Festuca tucumanica* y paja de puerto, mientras que en los céspedes de pastoreo se presenta yerba de la oveja, *Carex fuscula* y *Muhlenbergia peruviana* son algunas de las especies más importantes. En los pastizales que se desarrollan sobre granito se presentan, en suelos hidromórficos, comunidades dominadas por hierbas dicotiledóneas, ciperáceas y juncáceas muy similares en composición y estructura a las "vegas" del área Cordillerana de los Andes, razón por la cual los viejos fitogeógrafos denominaron a estas comunidades como prados alpinos.

Fauna:

En esta gran región si bien se observa un deterioro generalizado, del hábitat original, quedan fragmentos de los distintos ambientes en aceptable estado de conservación. Los vertebrados característicos del Cordón Central son: sapo de Achala, ranita del zarzal, lagarto de Achala, yarará ñata, cóndor, chuña de patas rojas u orco chuña, chorlo cabezón o pampero, búho ñacurutú, atajacaminos ñañarca, vencejo collar blanco, picaflor rundún, minera de pico curvo, remolinera castaña, gaucho cola blanca,

dormilona nuca canela, y al plumizo, piquito de oro grande y mamíferos como lobito de río, zorro colorado, huroncito y el desaparecido huemul de Pampa de Achala.

Los vertebrados característicos del Cordón del Este son: sapito de colores, rana criolla, lagarto overo, lagarto de las piedras, falsa yarará, coral, montaraz de la sierra o mollera, halcón peregrino, catita serrana grande, picaflor verde común, carpintero blanco, gallito de collar, birro común, zorzal chiguanco, juan chiviro, arañero cabeza castaña, rey del bosque, piquito de oro chico y mamíferos como comadreja overa, cuis serrano, vizcacha, lobito de río, gato del monte y puma.

La ictiofauna característica de los embalses artificiales de esta región es: pejerrey, carpa común, carpa espejo; bagre sapo, dientudo, vieja de agua; trucha, mojarra, tararira y palometa, entre otros.

4.5.2 Valles Intermontanos

Son valles longitudinales y transversales a la orientación general de los cordones serranos, que se sitúan entre las Sierras Occidentales y las Sierras Grandes (Valle de San Javier, de Nono, de Mina Clavero y de Salsacate) y entre estas últimas y las Sierras Chicas (Punilla, Santa Ana, Calamuchita y La Cruz). San Javier, al pie del Champaquí y Sierra de Comechingones, es ampliamente abierto hacia la planicie de San Luis. Nono, presenta caracteres de "bolsón".

Calamuchita, es el más extenso de los valles serranos y tiene su punto más bajo en el Embalse del Río Tercero. La Cruz, es una continuación del Valle de Calamuchita hacia el Sur, que se abre ampliamente en esa misma dirección hasta confundirse con la llanura. Su flanco oriental lo constituyen la Sierras de Los Cóndores y Las Peñas y el occidental sigue siendo las Sierras Grandes.

4.5.3 Pampas de Altura

Localmente se emplea el término "pampa" para designar a las superficies más o menos planas y contrastantes con lo escarpado del paisaje circundante, con cobertura de suelo continua y vegetación herbácea.

Los suelos son bien desarrollados, a partir de materiales residuales provenientes de la desintegración de las rocas antiguas (granitos, gneises, etc.) o de materiales loésicos y palustres, con profundidades que superan los 80 cm, horizontes texturales y alto contenido de materia orgánica. Los niveles de altitud a que se encuentran y el tipo de rocas subyacentes, establecen diferencias entre estas "pampas". La de Achala posee una altitud media de 2.000 m s.n.m. y las rocas asociadas son los granitos del batolito homónimo.

La de San Luis también está asociada con formaciones graníticas, con una altitud del orden de los 1.900 m s.n.m. Por otro lado, Olaen con una altitud media de 1.000 m s.n.m. y Pocho con 1.500 m s.n.m., están sobre un subsuelo de rocas cristalofílicas del basamento. El proceso activo dominante es la erosión hídrica con cárcavas de gran envergadura, potenciadas por el uso agropecuario a que suelen destinarse las tierras.

4.6 Cobertura vegetal

De la página del geoportal IDE de la Provincia de Córdoba, se obtuvieron las imágenes de la cobertura vegetal del suelo de la zona de estudio, de acuerdo a lo ilustrado en la fig. 26:

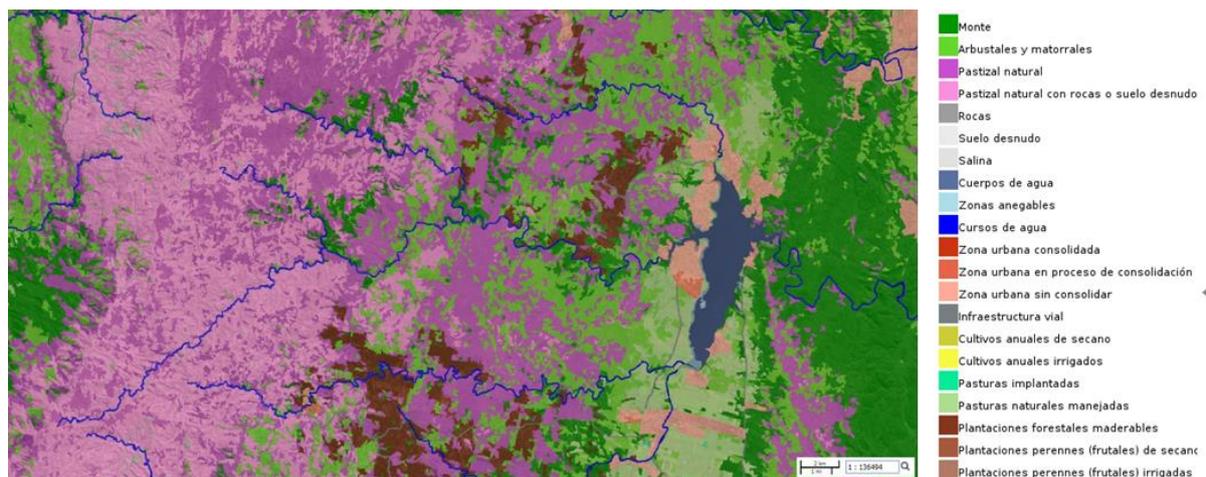


Figura 26 Cobertura vegetal

En la zona en estudio predomina el bosque natural serrano; bosque de tabaquillo; bosque implantado; árbol del coco (*Gagara coco*) y molle (*Lithraea thernifolia*); pastizales de altura; pastizal degradado; roca expuesta; cultivos de maíz sorgo, soja y avena y zonas erosionables como cárcavas. Los cuales se detallan a continuación: (Luti et al., 1979).

El Bosque natural serrano se desarrolla en las faldas occidentales de las Sierras Chicas, entre los 500 y 1300 m s.n.m. aproximadamente; entre los paralelos de 31° y 33° latitud sur. Se halla el bosque de molle (*Lithraea thernifolia*) acompañado por ejemplares aislados de coco (*Fagara coco*). Se trata de un bosque abierto, con arbustos espinosos y gramíneas, que alcanzan su mejor desarrollo en las laderas con orientación sur-suroeste. Los espinillos (*Acacia caven*), algarrobos blancos (*Prosopis alba*), y otros árboles representativos de la llanura ascienden por las quebradas y se mezclan con el bosque serrano. En la Cumbre del Hinojo la presión antrópica y ganadera han eliminado prácticamente los elementos arbóreos, quedando un pastizal degradado con algunos espinillos bajos (poco desarrollado). Esta misma situación se repite en las faldas orientales donde la actividad humana y agropecuaria alterna con las forestaciones.

El Bosque de tabaquillo (*Polylepis australis*) se encuentra en las quebradas y cañones de las Sierras Grandes, especialmente con orientación Este, protegidos de los vientos y del ganado.

El Bosque implantado se desarrolla en las laderas orientales de las sierras chicas y pie de las Sierras Grande, el bosque serrano ha sido reemplazado por forestaciones introducidas por el hombre, en especial de pino (*Pinus elliotis*, *P.tadea* y *P.radiata*). En cercanía con Villa Alpina y La Cumbrecita, los pinares se suceden a lo largo del camino con interrupciones de 1 a 2 km, donde la vegetación original ha sido reemplazada por pastizales que soportan una ganadería extensiva. En las proximidades del Embalse Los Molinos, los pinos alternan con los eucaliptus (*Eucalyptus* sp.).

El estrato arbustivo se desarrolla al noroeste del embalse, en las faldas de las sierras chicas, en donde el bosque serrano ha sido reemplazado por arbustos espinoso de bajo porte, entre cuyas especies se destacan el espinillo (*Acacia caven*); garabato (*Acacia furtispina*); moradillos (*Shinus* sp.); algunos ejemplares de tala (*Celtis tala*) y chañar (*Geoffroea decorticans*), etc. El aspecto que presenta es de un arbustal abierto, con suelo expuesto.

Los pastizales de altura se extienden entre los 1100 a 1400 m s.n.m. aproximadamente, en las faldas de las sierras en donde aparecen los pastos que constituyen los pajonales de altura, con especies como paja blanca (*Stipa neesiana*, *S.pseudoichu* Caro), paja de puerto (*Poa stuckerti* Hackel), paja grande (*Festuca hieronymi* Hack) y en lugares más húmedos cortaderas (*Cortaderia selloana*). Esta es una zona de importancia ganadera, principalmente vacuno.

El pastizal degradado se halla en determinados sitios, en donde el arbustal prácticamente ha desaparecido y se observan pocos espinillos (*Acacia caven*) que no

alcanzan el metro de altura, numerosos cardos y malezas que dejan al descubierto suelos pobres con mucho ripio y pastos sin valor forrajero.

La roca expuesta se extiende en el cordón de las Sierras Grandes, en donde el granito aflorante sostiene una pobre cobertura vegetal, de pastos, a veces inferior al 30%, que sostiene una ganadería extensiva.

En las tierras que rodean el oeste y sur al embalse y laderas de las Sierras Chicas se desarrollan agricultura y ganadería que han reemplazado la vegetación natural casi en su totalidad. Predominan los cultivos de maíz (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum sp.*), soja (*Glycine max*) y avena (*Avena sp.*).

4.7 Áreas Naturales Protegidas

En esta cuenca, se ubican varias áreas naturales protegidas, se observan desde parques nacionales, reservas hídricas hasta áreas recreativas según se puede observar en las fig. 27 y 28.

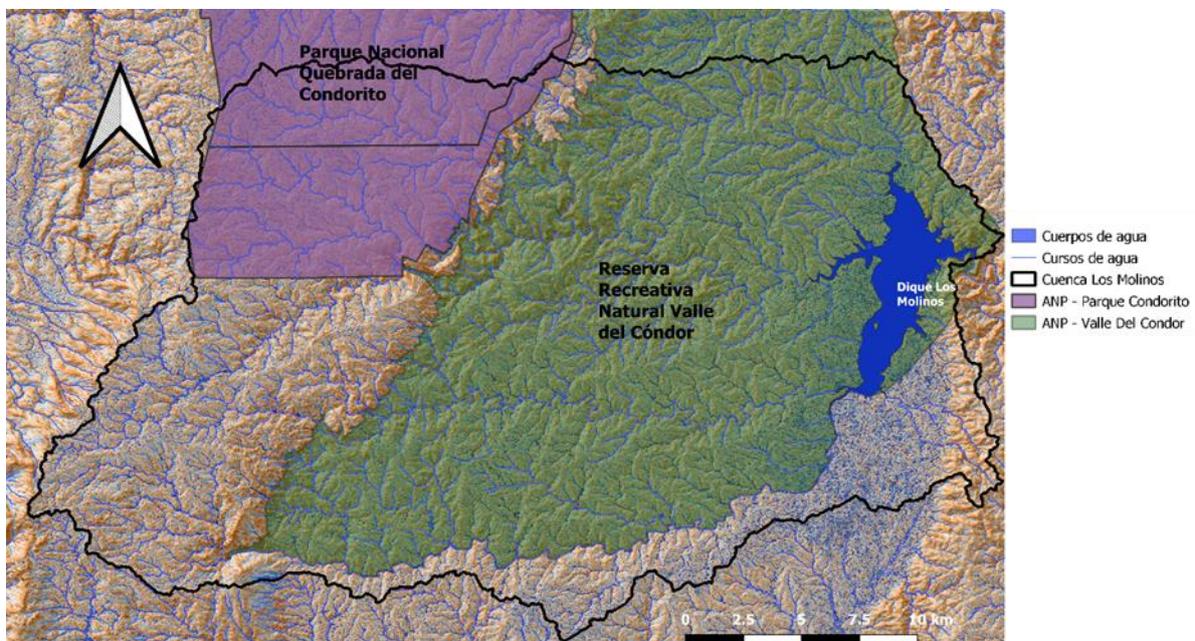


Figura 27 Áreas naturales protegidas (Parque Nacional y Reserva Recreativa)

La Reserva Hídrica Natural Calamuchitana ocupa la totalidad de la cuenca y se superpone a esta la Reserva Natural Recreativa Calamuchitana

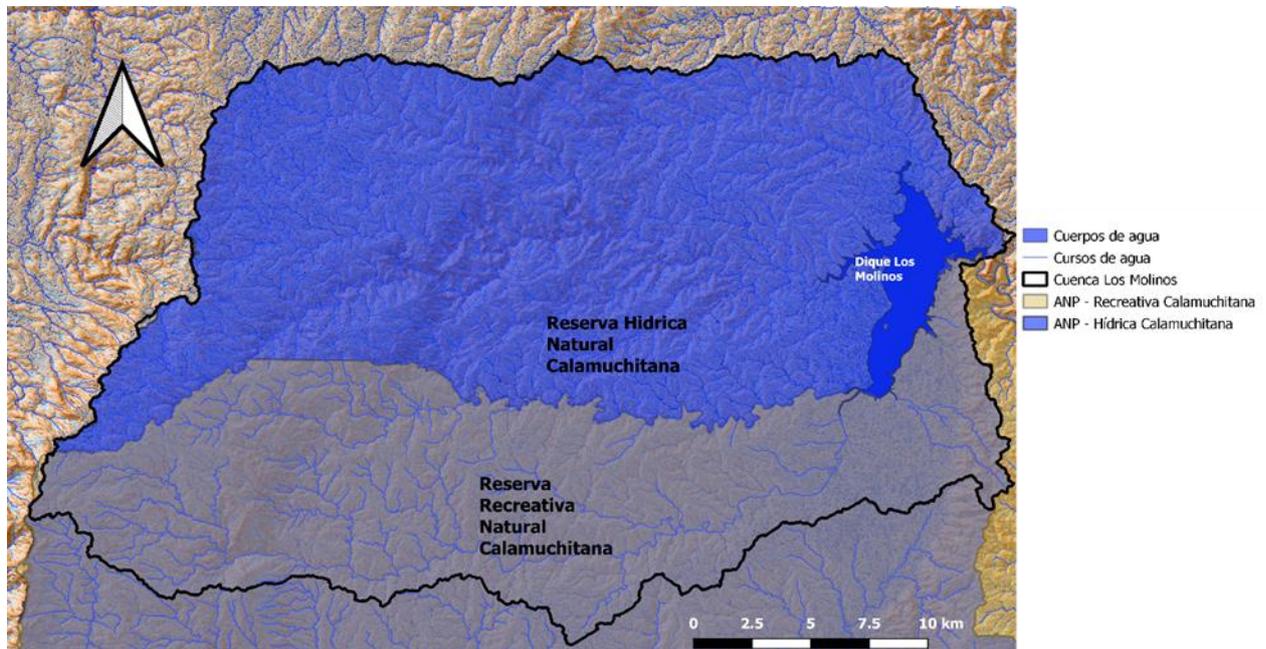


Figura 28 Áreas naturales protegidas (Reserva Hídrica y Reserva Recreativa)

En la Constitución de la Provincia de Córdoba de 1987, su Artículo 68 dice: “El Estado Provincial defiende los recursos naturales renovables y no renovables, en base a su aprovechamiento racional e integral que preserve el patrimonio arqueológico, paisajístico y la protección del medio ambiente.

“La tierra es un bien permanente de producción; la ley garantiza su preservación y recuperación, procura evitar la pérdida de fertilidad, la erosión y regula el empleo de las tecnologías de aplicación.

Las aguas que sean de dominio público y su aprovechamiento, están sujetos al interés general. El Estado reglamenta su uso racional y adopta las medidas conducentes para evitar su contaminación.

El Estado Provincial resguarda la supervivencia y conservación de los bosques, promueve su explotación racional y correcto aprovechamiento, propende al desarrollo

y mejora de las especies y a su reposición mediante la reforestación que salvaguarde la estabilidad ecológica.

Los yacimientos de sustancias minerales y fósiles son bienes exclusivos, inalienables e imprescriptibles de la Provincia; su explotación debe ser preservada en beneficio de las generaciones actuales y futuras.”

El Estado Provincial reconoce la potestad del Gobierno Federal en el dictado de la política minera; fomenta la prospección, exploración y beneficio de las sustancias minerales del territorio, realiza el inventario de sus recursos y dicta leyes de protección de este patrimonio con el objeto de evitar el prematuro agotamiento de su explotación y su utilización irracional.”

De acuerdo a lo establecido por la Ley 9814 de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la Provincia de Córdoba, se delimitaron las zonas protegidas según tres categorías: Área Roja, Amarilla y Verde. La fig. 29 indica las actividades permitidas en cada una de ellas.

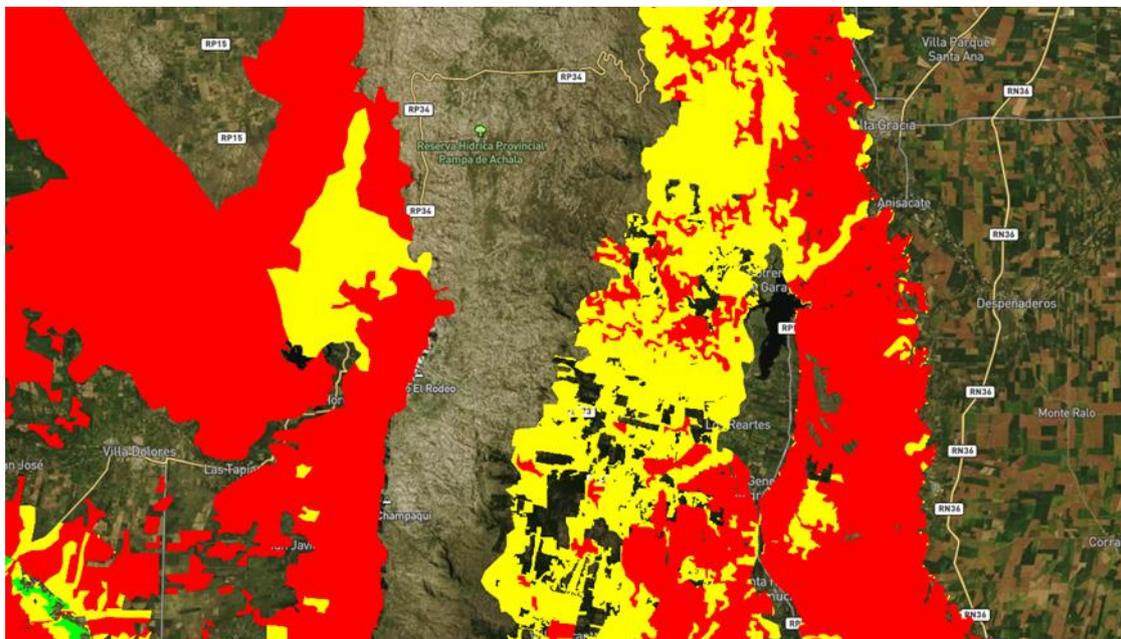


Figura 29 Áreas naturales protegidas (Ley de bosques)

Los yacimientos de sustancias minerales y fósiles son bienes exclusivos, inalienables e imprescriptibles de la Provincia; su explotación debe ser preservada en beneficio de las generaciones actuales y futuras.”

El Estado Provincial reconoce la potestad del Gobierno Federal en el dictado de la política minera; fomenta la prospección, exploración y beneficio de las sustancias minerales del territorio, realiza el inventario de sus recursos y dicta leyes de protección de este patrimonio con el objeto de evitar el prematuro agotamiento de su explotación y su utilización irracional.”

En la tabla 10 se describen las actividades permitidas en cada una de ellas.

Tabla 10: Ley de bosques – Actividades permitidas

Actividades permitidas según categoría de conservación			
Área de Conservación	AREA ROJA	AREA AMARILLA	AREA VERDE
Tipo de Plan	Plan de Conservación	Plan de Manejo Sostenible	Plan de aprovechamiento con cambio de uso de suelo
Actividades Permitidas	<p>Alto valor de conservación</p> <p>Áreas que ameritan la protección por su conectividad, valores biológicos destacados y protección de cuencas.</p> <p>También zonas estratégicas, áreas naturales protegidas y corredores biológicos.</p> <p>Sectores incluidos: márgenes de cursos de agua (100 m por lado), bordes de lagos, lagunas (100 m) y salinas (2000 m).</p> <p>Sectores excluidos: bosques nativos sometidos con anterioridad a cambio de uso de suelo (excepto aquellos que estén en infracción).</p> <p>Actividades permitidas: hábitat de comunidades indígenas, campesinas, investigación científica y aprovechamiento sostenible.</p>	<p>Mediano valor de conservación</p> <p>Áreas que pueden estar degradadas o en recuperación, pero que con restauración pueden adquirir un elevado valor de conservación.</p> <p>Sectores excluidos: bosques nativos sometidos con anterioridad a cambio de uso de suelo (excepto aquellos que estén en infracción).</p> <p>Actividades permitidas: aprovechamiento sostenible, turismo, recolección e investigación científica.</p>	<p>Bajo valor de conservación</p> <p>Áreas que pueden transformarse parcialmente o en su totalidad dentro de los criterios de la ley.</p> <p>Se sigue el procedimiento de evaluación de impacto ambiental (con posibilidad de audiencia pública y con estudio de impacto ambiental obligatorio).</p>

A continuación, se transcriben algunos Artículos de esta Ley:

Artículo 10: “Deberán ser conservados los bosques nativos de la provincia que se encuentren en la zona perteneciente a la Categoría de Conservación I (rojo) y a la Categoría de Conservación II (amarillo), y no se permitirá cambio de uso del suelo ni desmonte, con la excepción establecida en el artículo 14 de la presente Ley.”

Artículo 13: “Todos los bosques nativos que se encuentren dentro de áreas naturales protegidas, corredores biológicos establecidos por la Autoridad de Aplicación en áreas de amortiguación de cualquier categoría de conservación declarada como tales por normas de jurisdicción nacional o provincial serán considerados a los efectos de su conservación, como pertenecientes a la Categoría I (rojo).”

Artículo 14: “En las Categorías de Conservación I (rojo) y II (amarillo) se podrá autorizar la realización de obras públicas, de interés público o de infraestructura. Para el otorgamiento de dicha autorización, la Autoridad de Aplicación deberá, en su caso, someter el pedido a un procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y su correspondiente audiencia pública...”

Artículo 31: “En los sectores pertenecientes a las Categorías I y II será obligatoria la realización y mantenimiento de infraestructuras de prevención y control de incendios o la realización de fajas cortafuego o picadas perimetrales, debiendo realizar la correspondiente comunicación, salvo casos de necesidad o urgencia, a la Autoridad Aplicación.”

4.8 Urbanización

Según datos obtenidos de la Base de Asentamientos Humanos de la República Argentina (BAHRA), Ministerio de Educación de la Nación, Programa Nacional Mapa Educativo junto con el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN) del año 2015, los asentamientos urbanos en la zona que abarca la cuenca de aporte al embalse Los Molinos, se indican en la fig. 30.

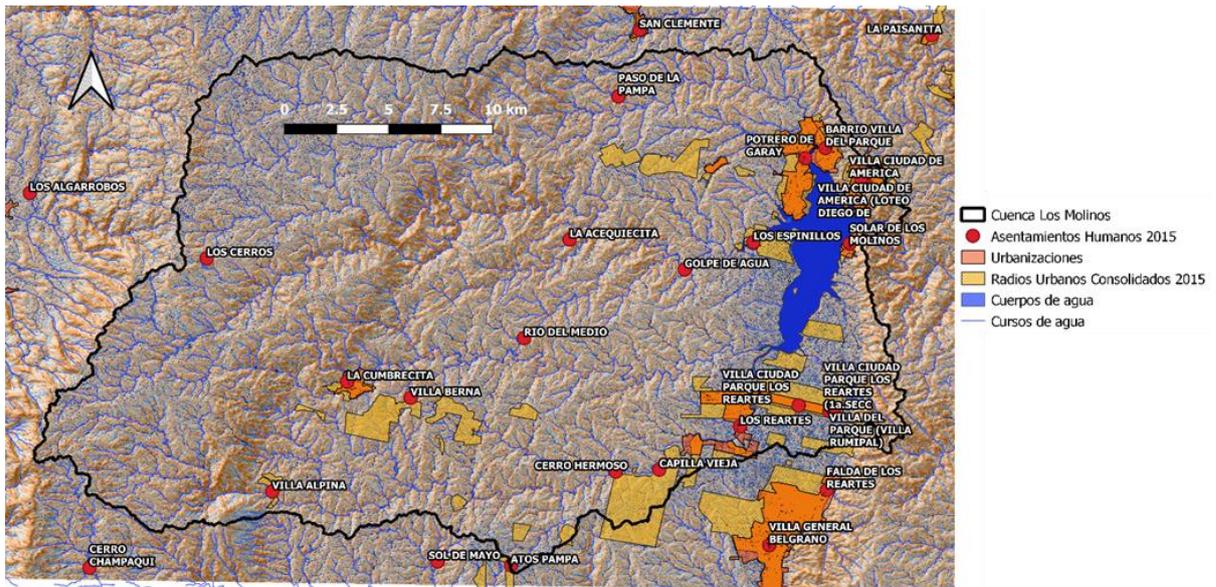


Figura 30 Asentamientos urbanos

Uno de los problemas que trae aparejado el incremento de las urbanizaciones es que conlleva un aumento en la generación de residuos sólidos urbanos. En la fig. 31, se muestran las localizaciones de los Sitios de Disposición Final de RSU. Esta información está basada en la existente en el Área de Residuos Sólidos Urbanos de la Secretaría de Ambiente de la Provincia de Córdoba y responde a los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos declarados por los municipios o comunas de la provincia entre los años 2015-2016.

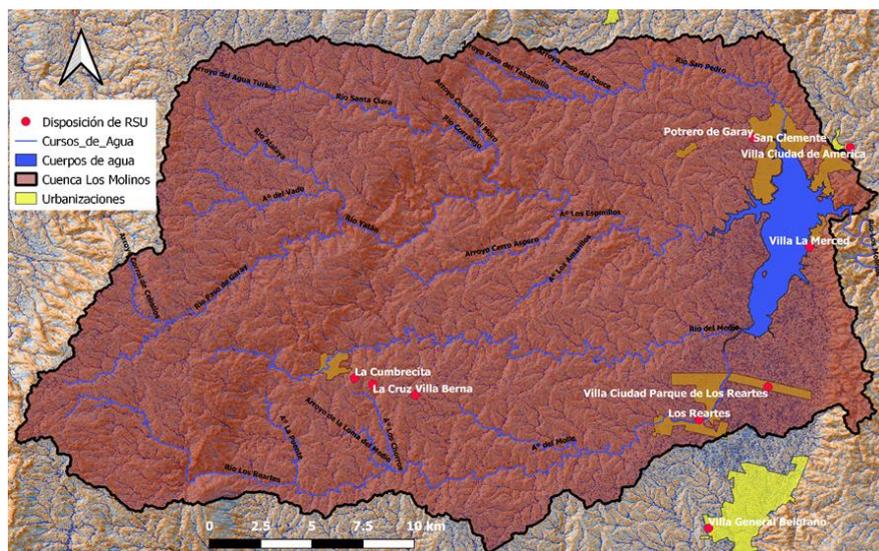


Figura 31 Lugares de disposición de residuos sólidos urbanos

Un equipo del Instituto Superior de Estudios Ambientales (ISEA) junto a especialistas de otras instituciones (Aguas Cordobesas S.A, Secretaría de Recursos Hídricos Provincial) muestra como la zona de la cuenca de Los Molinos está siendo amenazada por el incremento de las urbanizaciones y la agricultura, actividades que traen aparejados la pérdida de bosques nativos.

Numerosas investigaciones describen este cambio. Las construcciones alrededor del embalse llevan implícito la generación de una mayor cantidad de residuos que, sumado al tratamiento inadecuado de los efluentes domiciliarios, provocan contaminación, pérdida de especies acuáticas, aumento de nutrientes que favorecen el proceso de eutroficación del embalse. Paralelamente, se reducen las áreas de bosques nativos a causa de construcciones, incendios o tala para generar zonas de cultivos.

Este equipo mapeó la zona de la cuenca del lago, que incluye a las localidades de Los Reartes, Potrero de Garay, La Cumbrecita, Villa Alpina y otros parajes.

En el trabajo publicado, utilizaron imágenes tomadas en enero de 2011 por el satélite Landsat 5 TM, la cual brindó datos que fueron confirmados en el campo.

Se observó que el 35% de la superficie lo ocupan pastizales y un 23% arbustales, rocas expuestas el 18,2 %, mientras que la creciente actividad antrópica está distribuida por el bosque implantado (7.7%), para uso agropecuario (3.6%) y poblados (2.7% que constituyen 2671.5 Ha).

La transformación del espacio en general y el crecimiento de las urbanizaciones se pudieron detectar comparando imágenes satelitales del año 2011 con un mapa del año 2003.

Otra evidencia que muestra el incremento de la urbanización de Los Molinos es el crecimiento de la población en los últimos 20 años.

Según datos del INDEC en toda la cuenca de Los Molinos habitaban 1042 personas en 1991, diez años después se incrementó a 2780 habitantes según los censos poblacionales. La información del Censo provincial de 2008 la cantidad aproximada de habitantes ascendía a 6615 personas.

De la Dirección General de Estadísticas y Censos de la Provincia de Córdoba, se tomaron los datos censales acerca de población y sexo para preparar las tablas 11 y 12.

Tabla 11: Censo año 2008

Departamento	Municipio o Comuna	Personas			Índice de masculinidad
		Total	Sexo		
			Varón	Mujer	
Total Provincial		5117	2783	2334	119
Calamuchita	Los Molinos	383	204	179	114
Calamuchita	Los Reartes	1282	691	591	117
Calamuchita	Villa Ciudad Parque Los Reartes	840	457	383	119
Calamuchita	La Cumbrecita	869	488	381	128
Santa María	Potrero de Garay	954	521	433	120
Santa María	Villa Ciudad de América	789	422	367	115

Tabla 12: Censo año 2010

Departamento	Municipio o Comuna	Personas			Índice de masculinidad
		Total	Sexo		
			Varón	Mujer	
Total Provincial		5790	3074	2716	113.18
Calamuchita	Los Molinos	338	173	165	105
Calamuchita	Los Reartes	1426	774	652	119
Calamuchita	Villa Ciudad Parque Los Reartes	1165	624	541	115
Calamuchita	La Cumbrecita	776	394	382	103
Santa María	Potrero de Garay	1323	705	618	114
Santa María	Villa Ciudad de América	762	404	358	113

Del Instituto de Estadística, en la publicación del Prof. Dr. José Yocca “Estudio de la Población de la Provincia de Córdoba en su Aspecto Demográfico y su Vinculación con los Factores Económicos - Comprendiendo el Periodo 1914 – 1937” se extrajo la planilla de la fig. 32 que contiene datos históricos del crecimiento de la población

extranjera por departamentos, en la que se puede observar el crecimiento de la inmigración, especialmente europea, a comienzos de la Primera Guerra Mundial.

PLANILLA N.º 2
PERIODO INTERCENSAL 1895-1914

*Crecimiento de la población extranjera en la Provincia de Córdoba.
Distribución por departamentos*

DEPARTAMENTOS	1895 Extranjeros	1914 Extranjeros	Aumento	% de cada departamen- to en el au- mento total
Calamuchita	85	1.066	981	0,85
Capital	6.164	30.348	24.184	21,05
Colón	1.360	3.458	2.098	1,83
Cruz del Eje	196	1.197	1.001	0,87
General Roca	455	8.484	8.029	6,99
Ischilín	72	699	627	0,55
Juárez Celman	1.237	9.953	8.716	7,59
Marcos Juárez	7.307	18.949	11.642	10,13
Minas	11	16	5	0,00
Pocho	9	19	10	0,01
Punilla	227	1.513	1.286	1,12
Río Cuarto	2.714	14.029	11.315	9,85
Río Primero	191	1.096	905	0,79
Río Seco	12	52	40	0,04
Río Segundo	811	7.661	6.850	5,96
San Alberto	43	148	105	0,09
San Javier	91	1.049	958	0,83
San Justo	8.432	15.735	7.303	6,36
Santa María	211	3.547	3.336	2,90
Sobremonte	15	27	12	0,01
Tercero Abajo	1.153	8.634	7.481	6,51
Tercero Arriba	513	6.382	5.869	5,11
Totoral	233	679	446	0,39
Tulumba	113	442	329	0,29
Unión	3.892	15.237	11.345	9,88
Roque Sáenz Peña				
Total de la Prov.	35.547	150.420	114.873	100,00

Figura 32 Planilla censal del año 1914

4.9 EUTROFIZACIÓN

Las civilizaciones que dejaron huella emergieron siempre asociadas al agua. Las riberas de los lagos, en la región templada, han sido asentamiento de centros urbanos. El lago proporcionaba agua potable y, frecuentemente, fácil deposición de los residuos. Más recientemente, el agua para consumo se bombeaba de la profundidad del lago, que parecía ofrecer una reserva inagotable de agua de calidad. Con el siglo XX empezó a cambiar una relación tan armónica: el agua del lago era cada vez más verdosa y menos transparente, y la calidad del agua subterránea, en ciertos momentos especialmente a fines de verano, era pobre, con poco oxígeno, abundante

materia orgánica y ligeramente ácida (capaz de corroer el hierro y el cemento) todo lo cual encarecía su tratamiento y, lo que es más importante, era el principio de una amenaza sobre la disponibilidad del líquido. Este fenómeno es habitual en todos los países, parte de cuya población había organizado su vida en torno de los lagos, y la voz con que se les designa, eutrofización, ha pasado del entorno científico al dominio público (Moreno Franco et al., 2010).

El vocablo eutrofización inicialmente se utilizó para diferenciar los lagos eutróficos de los oligotróficos y tenía sentido regional o geográfico. Eran oligotróficos, por ejemplo, muchos lagos suecos y eutróficos los de la llanura norte de Alemania. Y en cuanto a su estudio para conocer el transcurso del “envejecimiento” de los lagos inducido por procesos autóctonos que progresa aún sin tener la ayuda del hombre (eutrofización natural). La contaminación acelera el envejecimiento natural y acorta considerablemente la vida del receptor acuático. Sin embargo, este término se utilizó posteriormente para definir el fenómeno provocado por los vertidos de los desechos de actividades humanas, llamándolo Proceso de eutrofización cultural o simplemente eutrofización; inicialmente se definió como “el abastecimiento excesivo de los nutrientes nitrógeno y fósforo a los cuerpos de agua, con el frecuente crecimiento acelerado de microalgas, que puede producir la muerte de peces al despojarlos del oxígeno que necesitan para vivir” (USEPA, 1997).

La eutrofización como proceso de origen antrópico va deteriorando su calidad, añadiendo mayores cantidades de nutrientes que son elementos esenciales para el crecimiento de organismos, principalmente nitrógeno (N), fósforo (P) y materia orgánica (MO); lo cual enriquece en nutrientes a los sistemas acuáticos, pero limita el oxígeno. Este proceso se produce naturalmente en todo lago cuya afluencia de elementos nutritivos sea superior a la salida de los mismos. El término eutrófico, se

utiliza para distinguir aquellos lagos en los cuales el nivel nutritivo es particularmente alto y que se caracterizan por el estancamiento de sus aguas además de abundante vegetación litoral, siendo una situación irreversible por lo que denomina como “lago humanizado”. “Eutrofo” se llama a un ecosistema caracterizado por una abundancia anormalmente alta de nutrientes. Se dice que dicho ambiente se encuentra forzado, bajo tensión o sometido a stress (Chalar, 2007).

El beneficio de estudiar el flujo de los nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, a los cuerpos de agua, fue motivado por la evidente degradación de los ecosistemas acuáticos, por la excesiva acumulación de éstos. Asimismo, el estudio de la eutrofización como un proceso en ríos y lagos desde una perspectiva ecológica y geoquímica data de la década de los 60's.

4.9.1 Proceso de eutrofización

Cuando el agua de una masa oligotrófica se enriquece de nutrientes, se inician muchos cambios. Primero, este enriquecimiento favorece el crecimiento y la multiplicación del plancton, lo que aumenta la turbidez del agua. Con la desaparición de la vegetación acuática sumergida, es evidente que se pierden alimentos, hábitats y el oxígeno disuelto (OD) de la fotosíntesis. Pero la pérdida de OD se agrava por la siguiente razón: el fitoplancton está compuesto de organismos fotosintéticos que también producen oxígeno, como todas las plantas verdes. Como ocupan la superficie, ésta se satura del gas y el exceso se escapa a la atmósfera. De esta manera, la fotosíntesis del fitoplancton no abastece de oxígeno a las aguas más profundas, excepto durante ciertos momentos en la primavera y otoño. Además, el fitoplancton tiene índices de crecimiento y reproducción muy elevados. En condiciones óptimas, su masa puede duplicarse en un día. Así, el fitoplancton alcanza su máxima densidad poblacional y este crecimiento alcanza su estado estable para finalmente

entrar en decaimiento siguiendo el comportamiento logístico. El fitoplancton muerto se asienta y produce en el fondo depósitos espesos de detritos como se observa en la fig. 2 (Nebel y Wright, 1999).

A su vez, la profusión de detritos genera una abundancia de descomponedores, la mayoría bacterias, cuyo crecimiento explosivo crea una demanda nueva de OD, que se consume en la respiración. El resultado es el agotamiento del recurso con la consiguiente sofocación de peces y crustáceos. Sin embargo, las bacterias aerobias estrictas prosperan y aprovechan el oxígeno cada vez que está disponible, por lo que mantienen al agua sin OD, en tanto que haya detritos que las alimenten. Mientras que las bacterias anaerobias aparecen en el fondo produciendo gases como el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno. Además, hay alguna oxidación de materia orgánica y de otros compuestos, lo que demanda más OD.

4.9.2 Causas de la eutrofización

Las principales causas antropogénicas de procesos de eutrofización pueden ser:

- Una de las causas más antiguas es la descarga de aguas residuales, las cuales son ricas en nutrientes, contribuyendo al cambio trófico del cuerpo de agua receptor.
- El uso excesivo de fertilizantes, que genera una contaminación del agua fundamentalmente mediante el aporte de nitrógeno (en forma de sales de nitrato y amonio) y fósforo (como fosfato).
- La deforestación y la erosión en suelos agrícolas influyen en la carga de nutrientes, ya que los escurrimientos al pasar por una tierra que no tiene protección, “lavan” la capa fértil, llevándose consigo los nutrientes de la misma.

- La presencia de gases ambientales tales como óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x), al entrar en contacto con el agua atmosférica forman ion nitrato (NO_3^-) e ion sulfato (SO_4^{2-}), que forman sales solubles al alcanzar el suelo con los cationes del mismo, generando un empobrecimiento de dichos iones. Dichas sales son volcadas fácilmente en los cuerpos de agua, dando lugar a un proceso de eutrofización.

Los lagos eutróficos e hipertróficos suelen ser poco profundos y sufren altas tasas de cargas de nutrientes procedentes de fuentes tanto localizadas como no. La asociación de fósforo con sedimentos es un grave problema para la restauración de lagos enriquecidos y poco profundos. Las partículas enriquecidas con P se depositan en el fondo del lago y forman una abundante reserva de nutrientes en los sedimentos, a la que pueden acceder las plantas con raíces y que se descarga desde los sedimentos en condiciones de anoxia a la columna de agua superior, donde es rápidamente utilizada por las algas.

Efectos del proceso de eutrofización En los ecosistemas acuáticos eutrofizados, se comienza a dar una alteración de la biota y de la diversidad biológica, provocando una proliferación de algas, cianobacterias y macrófitos en demasía. El desarrollo de estos organismos provoca opacidad, que impide que la luz penetre hasta regiones profundas de la columna de agua. Las consecuencias directas son la imposibilidad de llevar a cabo la fotosíntesis en lugares cada vez menos profundos de la columna de agua y, por lo tanto, disminución en la producción de oxígeno libre; simultáneamente aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los organismos descomponedores, que empiezan a recibir excedentes de materia orgánica generados en la superficie.

El fondo del ecosistema acuático se va convirtiendo de forma gradual en un ambiente anaerobio, y el consecuente aumento en la concentración de gases como anhídrido sulfuroso (H₂S), metano (CH₄) y anhídrido carbónico (CO₂), haciendo poco factible la vida de la mayoría de las especies que forman dicho ecosistema. Se da por tanto mortandad masiva de biota en general, bioacumulación de sustancias tóxicas, aumentando la sedimentación en los cuerpos de agua, reduciendo la vida útil, proliferando la aparición de organismos patógenos y vectores de enfermedad.

4.9.3 Estados de eutrofización

El índice de estado trófico (TSI, del inglés Trophic state index) es un sistema de clasificación diseñado para valorar los cuerpos de agua en función de su productividad biológica.

El TSI de un cuerpo de agua se clasifica en una escala de cero a cien. En la escala TSI las masas de agua pueden definirse como:

Oligotróficas: Con un TSI 0–40, tienen la menor cantidad de productividad biológica.

La calidad del agua es buena.

Mesoeutrólicas: Con un TSI 40-60, tienen un nivel moderado de productividad biológica y una calidad del agua regular.

Eutrólicas a hipereutrólicas: Con un TSI 60–100, tienen una productividad biológica muy alta, con una calidad del agua mala.

Tabla 13: Criterios para definir los tres estados tróficos

Estado	Condiciones
Oligotrófico	Bajo nivel de productividad biológica. Aguas claras, algunas plantas acuáticas, pocos peces, no mucha flora y fauna y fondos arenosos. Criterios: Clorofila a menos de 3mg/l, fosforo total menor que 15mg/l, nitrógeno total menor que 400mg/l y claridad del agua 4m
Mesotrófico	Moderado nivel de productividad, claridad de agua y plantas acuáticas. Criterios: Clorofila a entre 3mg/l y 7mg/l, fosforo total entre 15mg/l y 25mg/l, nitrógeno total entre 400mg/l y 600mg/l, y claridad del agua entre 2,5m y 4m.
Eutrófico	Alto nivel de productividad, claridad de agua y buena cantidad de plantas acuáticas o poca claridad de agua y pocas plantas acuáticas. Gran potencial para soportar la gran cantidad de peces y vida silvestre. Criterios: Clorofila a entre 7mg/l y 40mg/l, fosforo total entre 25mg/l y 100mg/l, nitrógeno total entre 600mg/l y 1500mg/l, y claridad del agua entre 0,9m y 2,5m

Fuente: Modificado de Forsberg and Ryding en: Florida LAKEWATCH (2010)
<http://lakewatch.ifas.ufl.edu/>

Las cantidades de nitrógeno, fósforo, y otros nutrientes biológicamente productivos son los determinantes primarios del TSI de un cuerpo de agua. Los nutrientes como nitrógeno y fósforo tienden a ser factores limitantes en cuerpos de agua, por lo tanto, el aumento de las concentraciones tiende a producir un mayor crecimiento de las plantas, seguido de un aumento en los niveles tróficos posteriores. En consecuencia, el índice trófico a veces se puede utilizar para hacer una estimación aproximada de la condición biológica de las masas de agua.

Tabla 14: Relaciones entre TSI, Clo, P, DS (disco de Secchi) y la clase trófica

TSI	Clo (ug/l)	P (ug/l)	DS (m)	Clase trófica
< 30 - 40	0 - 2.6	0 - 12	> 8 - 4	Oligotrófico
40 - 50	2.6 - 20	dic-24	04-feb	Mesotrófico
50 - 70	20 - 56	24 - 96	2 - 0.5	Eutrófico
70 - 100+	56 - 155+	96 - 384+	0.5 - < 0.25	Hipereutrófico

4.10 Calidad del agua en el Embalse Los Molinos

Se cuenta con antecedentes disponibles sobre calidad en los ríos tributarios al Embalse Los Molinos y en sitios distribuidos dentro del mismo. Los principales contenidos de cada estudio se presentan a continuación:

- En Cosavella (2003), se presentan estudios realizados sobre los diferentes tributarios, comprendidos entre septiembre de 1971 y junio de 1972, basados en el análisis de las características físico-químicas de sus aguas. En las campañas de muestreo correspondientes al período comprendido entre agosto de 1992 y agosto de 1993, este estudio presenta una estimación del aporte de nutrientes, incluyendo la serie de nitrógenos y fósforo total.
- En Bazán (2006) y Larrosa (2006), se presentan los resultados de monitoreos de calidad y cantidad de agua de los tributarios y dentro del Embalse Los Molinos, realizados desde el año 1999.

En este trabajo presentado también en Bazán et al. (2005), participó un grupo de profesionales de la FCEFyN – UNC, de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba (exDiPAS) y Aguas Cordobesas. Se abordaron temas específicos como:

- Evaluación de la calidad del agua, nivel de eutrofización y sus consecuencias en el embalse Los Molinos. (Bazán, 2006)
- Identificación de fuentes de contaminación fecal en el embalse de Los Molinos, diferenciación de su origen humano y/o animal (Larrosa, 2006).
- Estudio de la influencia de los efectos antrópicos y naturales en el proceso de eutrofización de las aguas del Embalse Los Molinos. (Cossavella, 2003)
- Aplicación de modelos numéricos para definir el proceso de transporte y de calidad del agua en el embalse Los Molinos.

4.11 Monitoreo del Embalse Los Molinos

Desde el año 1999 el embalse es monitoreado mensualmente por profesionales de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de

Córdoba con la colaboración de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincial de Córdoba (ex DIPAS) y de la empresa Aguas Cordobesas S.A. (ver ANEXO I).

Los resultados de este monitoreo sistemático muestran que el embalse se clasifica como un cuerpo de agua eutrófico, monomítico cálido (la estratificación ocurre una vez al año), con mayor deterioro de su calidad en primavera-verano, floraciones alternas de cianobacterias y *Ceratium hirundinella*. Las causas de esta alternancia podrían atribuirse a condiciones ambientales del fitoplancton (luz, temperatura, nutrientes y turbulencia) manifestándose el predominio de una sobre la otra por exclusión competitiva. *Ceratium hirundinella* es una especie típica de aguas estratificadas de lagos y embalses de zonas templadas en los meses de verano. Es una especie dinoflagelada dulceacuícola de ambientes meso a eutróficos que suelen originar floraciones dificultando los procesos de potabilización y provocando, eventualmente mortandad de peces. Un ejemplo de ello es lo acontecido en el embalse Los Molinos en febrero de 2005 y 2006 (Bazán et al., 2007).

La carga externa de fósforo que ingresa al embalse se calculó mediante la aplicación de un programa computacional, FLUX, a partir de los datos de concentración de las muestras y el registro de caudales. El aporte desde el perilago se obtuvo mediante cálculos indirectos aplicando coeficientes medios de exportación de fósforo total proveniente de fuentes puntuales y difusas (Bazán, 2005). Durante la década de estudio la carga de fosforo ha sido de aproximadamente 30 Tn/año. La carga de fósforo en el año 2002 ingresaba mayoritariamente por los ríos, siendo el mayor aporte el del río Los Espinillos, seguido por la descarga animal directa. En el año 2009 el mayor aporte provenía de las descargas cloacales directas seguido de las descargas animales.

La disminución del aporte de fosforo a través de los ríos, se debe que redujeron las concentraciones y el caudal de los mismos. El aumento del aporte por descargas cloacales se debe a que la población se ha triplicado y, como ya se mencionó, este dato se calcula aplicando coeficientes de exportación.

4.12 Marco Normativo

En la provincia de Córdoba, el ente que regula todas las actividades relacionadas con los recursos hídricos es la Subsecretaría de Recursos Hídricos (ex Dipas), perteneciente al Ministerio de Obras y Servicios Públicos del gobierno de la provincia. Esta subsecretaría tiene por misión la conservación y explotación de los recursos hídricos, la provisión y el control de la prestación de los servicios de agua potable, la recolección y tratamiento de los líquidos cloacales y residuales, el riego y el saneamiento rural en todas las áreas del territorio de la provincia.

A través del Decreto 847/16 (Ver ANEXO II), la Subsecretaría de Recursos Hídricos establece las normas para la protección de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. El Código de Agua de la Provincia de Córdoba, Ley provincial N° 5589, regula el aprovechamiento, conservación y defensa contra los efectos nocivos de las aguas, álveos, obras hidráulicas y las limitaciones en dominio al interés de su uso. El Decreto provincial N° 4560 reglamenta los servicios sanitarios por particulares, como, por ejemplo, desagües cloacales, residuales y pluviales.

La Subsecretaria de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba para la aprobación de proyectos de redes colectoras y plantas de tratamiento exige la aplicación de las normas del ENOHSA. Éste tiene la misión de organizar, administrar y ejecutar programas de infraestructura que deriven de las políticas nacionales del sector agua potable y saneamiento básico, en toda la extensión del territorio nacional.

5. COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico y sus diversos procesos ocurren en forma continua. El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que ciclo hidrológico continua. (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Es importante mencionar que el ciclo hidrológico comprende fenómenos complejos e intrincados, está compuesto por diversos ciclos interrelacionados de extensión continental, regional y local.

5.1 Precipitación

Desde el punto de vista hidrometeorológico, la precipitación es la fuente primaria del agua en la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca. La cantidad de precipitación puede ser definida como el volumen total acumulado en un periodo de tiempo determinado, y presenta una gran variación en el espacio y el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y patrones locales (Chow et al., 1994). Métodos

sistemáticos de promediación, tales como los Polígonos de Thiessen y el método de las Isoyetas han sido desarrollados para tomar en consideración la variabilidad del espacio y obtener una representación de la precipitación areal a partir de valores de diferentes puntos de observación.

5.2 Evapotranspiración

La pérdida de agua del sistema ocurre mediante dos procesos distintos. Por un lado, el agua escapa de la superficie terrestre por evaporación y por otro, mediante la transpiración de las plantas. La evaporación es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada, al estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera. Los factores más influyentes en este proceso comprenden el aporte de energía para que se produzca el cambio del estado de las moléculas de agua del estado líquido al gaseoso y la fuerza impulsora para retirar el vapor fuera de la superficie de evaporación. Es decir, la radiación solar y en menor medida, la temperatura ambiente del aire y el viento.

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción a la atmósfera. Esta agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Al igual que la evaporación directa, la transpiración depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Con lo cual, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación (Allen et al., 2005).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. La evapotranspiración es la combinación de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. Además de los factores dominantes en los citados procesos anteriores, se añade un tercero a tomar en cuenta, que es el aporte de humedad a la superficie de evaporación, lo que conlleva a distinguir entre la definición de evapotranspiración real y potencial. La evaporación envuelve un conjunto de procesos complejos, los cuales son influenciados por factores que dependen de las condiciones locales (uso y/o cobertura del suelo y variables meteorológicas). Comúnmente, la cantidad de evapotranspiración potencial es obtenida mediante el empleo de fórmulas empíricas tales como, Thornthwaite (1948), la fórmula de Penman (1948) y Penman-Montheih (1965) (Chow, 1994; Sakka, 2010 y Allen et al., 2005).

5.3 Intercepción

La porción de lluvia interceptada por la vegetación y la cubierta vegetal antes de alcanzar el suelo es lo que se conoce como intercepción. Estudios recientes han establecido que la intercepción puede jugar un papel muy importante en el balance hídrico de cuencas donde el componente aerodinámico del balance de energía está relacionado con la radiación neta. La humedad interceptada, almacenada en el dosel arbóreo, es el principal componente del ciclo hidrológico que escapa directamente a la atmósfera. En áreas con altas velocidades de viento, esta pérdida puede producirse rápidamente y en áreas donde la canopia permanece frecuentemente húmeda, la cantidad total interceptada y perdida por evaporación puede representar una proporción significativa de lluvia.

5.4 Infiltración

La infiltración se refiere a la entrada del agua desde la superficie al perfil del suelo. Se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales e inerciales. Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, y el contenido de humedad presente en el suelo (Chow et al., 1994), por tal razón, la infiltración es uno de los procesos del ciclo hidrológico más difícil de cuantificar.

5.5 Escorrentía

La escorrentía se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. El flujo sobre el terreno forma la escorrentía superficial. Una parte del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él. A esta parte de la escorrentía se le llama escorrentía subsuperficial; la otra parte, que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina escorrentía subterránea. De los tres tipos de escorrentía, el superficial es el que llega más rápido a la salida de la cuenca y constituye la escorrentía directa.

5.6 Agua Subterránea

El agua subterránea es la que se encuentra en la zona saturada del perfil del suelo, y se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica. El agua subterránea

se almacena en el acuífero principalmente mediante los fenómenos de infiltración/percolación. El flujo de agua subterránea es la que de manera más lenta llega a la salida de la cuenca, de modo el tiempo que el agua permanece en el acuífero puede variar de unas horas a varios años.

6. EROSIÓN HÍDRICA

La degradación del suelo a consecuencia de la erosión es conocido internacionalmente como un problema muy importante por su impacto ambiental y socioeconómico. Existe una relación directa entre las técnicas de uso del suelo y las tasas de erosión ocasionadas por la acción del agua y del viento.

Los principales procesos de degradación alrededor del mundo incluyen efectos tanto en el sitio como fuera del mismo.

Ejemplos de los efectos que causa la erosión “en el sitio” son pérdida de la funcionalidad del suelo de los ecosistemas amenazando la sostenibilidad a largo plazo de la producción agrícola, degradación del medio ambiente y aumento de la pobreza.

En cuanto a los efectos “fuera del sitio” se pueden mencionar las inundaciones, contaminación de las aguas superficiales y la sedimentación de embalses.

Kinell (2005), define la erosión como un proceso que implica “(...) el desprendimiento de materiales de la superficie del suelo, el transporte y posterior deposición de estos lejos del lugar de desagregación”. La erosión es el transporte de sedimentos de suelos de un lugar a otro a causa de:

- Agentes naturales erosivos: el agua (hielo), el viento y la gravedad.
- Actividades biológicas de los organismos que viven sobre el suelo.
- Actividades antropogénicas: labranza, nivelación de terrenos, cosecha de cultivos, construcciones, etc.

La erosión hídrica ocurre cuando las partículas individuales de suelo son desprendidas, transportadas y posteriormente depositadas en la superficie del suelo.

6.1 Causas erosión hídrica

El clima, especialmente la lluvia, es agente primario causante de la erosión hídrica. No solo es el factor principal, sino que también es la principal fuente de escorrentía superficial. La erosividad de la lluvia depende de la intensidad y duración del evento, así como de la masa, diámetro y velocidad de las gotas de lluvia.

Por otra parte, las propiedades del suelo determinan fuertemente la capacidad de infiltración y almacenamiento del suelo y, en consecuencia, su respuesta ante eventos de lluvia. Una baja capacidad de infiltración o de almacenamiento conlleva un exceso de escorrentía superficial que puede inducir la erosión del suelo.

Podría decirse que las actividades humanas se han convertido en el factor más importante causante de la erosión hídrica en lugares y tiempos modernos, especialmente en aquellos en que se observa un gran incremento de la población y rápidos avances tecnológicos.

6.2 Tipos de erosión hídrica

Las formas más comunes de erosión hídrica son: erosión por salpicadura, laminar, en surcos, en zanjas o cárcavas, erosión en cauces y movimientos en masas (remoción en masas)

6.2.1 Erosión laminar

La erosión laminar, es la producida por el impacto de la lluvia sobre el suelo. Primero se produce el rompimiento de los agregados del suelo y su dispersión debido a la energía cinética de la gota de agua que cae en el suelo. Las partículas desalojadas pueden ser movidas o no por la acción de la escorrentía. Algunas quedan retenidas

por la vegetación y otras se depositan en la superficie del suelo. Como agente erosivo, la erosión laminar es un proceso sutil pero serio que puede ser imperceptible en el paisaje. No obstante, la decoloración de la superficie del suelo puede ser una clave de que la erosión laminar ha removido la capa vegetal.

6.2.2 Erosión en surcos

La erosión en surcos ocurre cuando la escorrentía superficial empieza a concentrarse en pequeños canales. Los surcos se desarrollan cuando el agua superficial se concentra en depresiones y puntos bajos en praderas y campos provocando incisiones en la superficie y causando su erosión. Estos surcos son como líneas superficiales de drenaje o pequeños canales que pueden tener hasta 30 cm de profundidad y 50 cm de ancho. A diferencia de la erosión laminar, la erosión en surcos es perceptible y es el tipo de erosión más común en tierras cultivadas, especialmente en tierras sobrepastoreadas, y suelos recién labrados donde la estructura del suelo se encuentra debilitada por el arado.

Los surcos pueden ser removidos con el arado, pero aquellos que no, son conocidos como cárcavas. Dicho de otro modo, la forma avanzada de un surco es el estadio inicial de la formación de una cárcava.

6.2.3 Erosión en cárcavas

La erosión en cárcavas se inicia cuando la profundidad y la anchura del surco supera los 50 cm. Ocurre cuando la escorrentía se concentra y el flujo es suficientemente fuerte para desprender y movilizar las partículas del suelo. Las cárcavas pueden transportar grandes cantidades de sedimentos que se descargan aguas abajo y se depositan en los cuerpos de agua superficiales.

6.2.4 Erosión en cauces

La erosión en cauces se produce cuando la tensión de arrastre o tractiva de la corriente de agua supera la resistencia de los materiales que conforman el lecho o las márgenes del cauce. Este tipo de erosión es un fenómeno íntimamente ligado a la torrencialidad de las cuencas hidrográficas, caracterizada por su régimen pluviométrico e hidrológico, su geomorfología y los fenómenos de erosión que se producen en sus laderas.

6.2.5 Movimientos en masas (Erosión de profundidad)

Esta representa la mayor forma de erosión hídrica y puede producirse de diferentes maneras. Son mecanismos de erosión, transporte y deposición que se producen por la inestabilidad gravitacional del terreno. Su interrelación con otros mecanismos de erosión es muy intensa, en particular, en áreas montañosas que junto a con la hidrodinámica torrencial configuran el principal proceso erosivo de las laderas.

7. TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

7.1 Transporte de nutrientes

Nutrientes como el nitrógeno y el fósforo son un gran problema que amenazan la calidad del agua. La descarga de estos provoca la aparición de algas tóxicas, deficiencia de oxígeno, muerte de peces y eutrofización de la red de ríos y lagos. La intensificación de las actividades agrícolas ha sido claramente identificada como el mayor contribuyente de fuentes no puntuales de contaminación de los recursos de agua. A diferencia de las fuentes puntuales de contaminación, la descarga de nutrientes es difícil de cuantificar y controlar debido a su distribución heterogénea y a que se derivan de una gran variedad de fuentes difusas.

Los procesos de transporte de nutrientes son complejos, ya que son controlados por una variedad de fuerzas naturales y antropogénicas, así como la hidrología, el clima, la geología y las características y usos del suelo (Chiogna y Disse, 2015).

7.1.1 Ciclo del Nitrógeno

El nitrógeno se encuentra ubicuo en el ambiente. Es uno de los nutrientes más importantes y requerido por todos los organismos vivos ya que es necesario para producir un número de moléculas orgánicas complejas tales como aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos. Además, representa el fertilizante mineral más aplicado en la agricultura porque el contenido del mismo en el suelo es por lo general, inadecuado para una producción agrícola óptima.

Las fuentes principales de nitrógeno en el medio ambiente son la atmósfera, donde existe en forma de gas y en la materia orgánica (humus, residuos de vegetación y organismos muertos, estiércol, etc.) que contiene grandes cantidades de nutrientes.

El nitrógeno puede encontrarse disuelto en el agua del suelo o contenido en la fracción coloidal y de este modo está disponible para la absorción de las plantas. Más importante aún, el nitrógeno en la atmósfera puede fijarse naturalmente en el suelo a través de la acción bacteriana. Otra fuente de aporte de nitrógeno al suelo es la humedad y la deposición atmosférica. Cuando mueren las plantas, el nitrógeno regresa al suelo y en menor cantidad a la atmósfera completando así el ciclo del nitrógeno.

El ciclo del nitrógeno es un sistema dinámico que incluye el agua, la atmósfera y el suelo. Las plantas requieren de nitrógeno mucho más que cualquier otro elemento esencial, a excepción del carbono, oxígeno e hidrógeno.

7.1.1.1 Formas del nitrógeno en el suelo

El 90-95% del nitrógeno total del suelo se encuentra en forma orgánica, de modo que no es directamente asimilable por las plantas. Para ser absorbido debe transformarse en sus formas inorgánicas en un proceso denominado mineralización.

A su vez, el nitrógeno mineral del suelo se encuentra en forma de amonio NH_4^+ , y de nitrato NO_3^- . Ambas formas son asimilables por las plantas, pero la mayor parte del nitrógeno es absorbido en forma de nitrato.

El amonio se encuentra en el suelo adsorbido en el complejo de cambio, fijado en las redes cristalinas de determinadas arcillas o en la solución del suelo.

El nitrato, se encuentra libre en la solución del suelo y es asimilado por las plantas y los microorganismos. Por efecto de la pluviometría o por el exceso de riego puede ser arrastrado a horizontes profundos del suelo. La cantidad de nitrato que puede ser lixiviado depende de la intensidad de las lluvias, de la dosis de riego, de la capacidad de retención de humedad del suelo, del estado vegetativo del cultivo y de las características del sistema radicular.

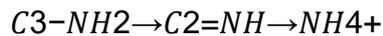
7.1.1.2 Procesos de transformación del nitrógeno

Las transformaciones y flujos de nitrógeno en el medio ambiente forman el denominado ciclo del nitrógeno. Estas transformaciones son consideradas mecanismos de entrada o ganancia de nitrógeno.

- Mineralización

La mineralización se conoce comúnmente como la transformación de nitrógeno orgánico en nitrógeno inorgánico, ya sea en forma de amonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-). Los microorganismos del suelo utilizan la materia orgánica para tomar la energía que necesitan para vivir. Durante este proceso se liberan nutrientes para las plantas como nitrógeno, fósforo y potasio. El nitrógeno orgánico, es transformado en amonio

y este proceso es conocido como mineralización de la materia orgánica.



- Nitrificación

La nitrificación incluye un proceso que se divide en tres etapas. En la primera, las bacterias transforman el nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) por lo que pueden ser absorbidos por las raíces de las plantas. En la segunda etapa el amonio se oxida y se forma nitrito (NO_2^-). En la tercera mediante oxidación se forma nitrato (NO_3^-).



- Desnitrificación

La desnitrificación devuelve el oxígeno a la atmósfera por la acción de bacterias reductoras que actúan bajo condiciones anaeróbicas. En condiciones de escasez de oxígeno, determinados microorganismos reducen el nitrato al NO, N_2O y N_2 . La desnitrificación está ligada a la cantidad de oxígeno presente en el suelo, el pH y la temperatura. $NO_3^- \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \uparrow$

- Inmovilización

Se denomina inmovilización, al proceso opuesto a la mineralización. Es la transformación de N inorgánico (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) del suelo en N orgánico, realizada por los microorganismos cuando absorben N mineral y lo transforman en el N constituyente de sus células y tejidos. Este proceso está afectado, al igual que la mineralización por la humedad, pH, aireación, entre otros.

- Fijación

La fijación del nitrógeno es llevada a cabo por las bacterias en el suelo capaces de fijar el nitrógeno atmosférico (N_2) incorporándolo a su organismo y depositándolo en el suelo una vez muertos.

Transporte de Nitrógeno

Follet (1995) plantea que el movimiento del nitrógeno a través del agua superficial ocurre principalmente a causa de la erosión hídrica. El nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) es absorbido por las arcillas y sedimentos finos o la materia orgánica y se encuentra en su forma orgánica en esta última. El nitrógeno que degrada el agua superficial es principalmente transportado en la materia orgánica como nitrato (NO_3^-), completamente soluble en agua. Por efecto de la pluviometría o por el exceso de riego puede ser arrastrado a horizontes profundos del suelo. La cantidad de nitrato que puede ser lixiviado depende de la intensidad de las lluvias, la dosis de riego, de la capacidad de retención de la humedad, del estado vegetativo del cultivo y de las características del sistema radicular.

7.1.2 Fósforo

El fósforo (P) es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, la no disponibilidad del fósforo en el suelo para ser absorbido por el cultivo requiere la aplicación de fósforo como fertilizantes o estiércol para lograr los objetivos de rendimiento agrícola deseados. El fósforo no es directamente tóxico, pero la continua aplicación del mismo en las tierras cultivables y su consecuente desplazamiento hacia los cuerpos de agua superficiales mediante la escorrentía puede acelerar la eutrofización. Los elevados niveles de nutrientes en los mismos pueden causar una producción anormal de algas y plantas acuáticas. La eventual descomposición de enormes cantidades de materia orgánica disminuye el contenido de oxígeno disuelto de las aguas superficiales dando como resultado la muerte de peces y otros organismos acuáticos.

A pesar de que el nitrógeno (N) y el carbono (C) están también asociados con el aceleramiento de la eutrofización, muchos estudios se han enfocado en el fósforo (Randall et al., 2002) y su control es de primordial importancia para reducirla.

Formas del fósforo (P) en el suelo

El fósforo de la solución del suelo está en equilibrio con las diversas fracciones y formas en las que está presente en el suelo.

a. Fijación

Es la reacción de formas solubles con compuestos orgánicos e inorgánicos para dar lugar a formas insolubles de fósforo, al menos en el corto plazo. En este proceso influye de manera determinante el pH. La fijación puede producirse de las siguientes formas:

- Adsorción en las arcillas: intercambio con grupos hidroxilo asociados o no al Fe y Al.
- Precipitación en compuestos de Fe y Al.
- Precipitación en suelos calizos: fosfatos bicálcicos y tricálcicos.
- Ligado a la materia orgánica (humofosfatos)

b. Mineralización

Por acción de microorganismos del suelo, las moléculas orgánicas que contienen fósforos son capaces de liberar ácido fosfórico. La cantidad del fósforo mineralizado depende de la humedad, pH, C/P.

c. Solubilización

El proceso de absorción de las plantas del fósforo soluble en la solución del suelo pone en marcha la reacción de equilibrio que está relacionada con la capacidad de adsorción del suelo. El proceso de solubilización, fósforo en solución-fósforo adsorbido, depende de la capacidad de cada suelo.

d. Inmovilización

El fósforo, al igual que el nitrógeno, es utilizado por los microorganismos del suelo para formar su propio protoplasma y compite así con las plantas. La cantidad de fósforo mineral que pasa a orgánico es pequeña y además temporal, ya que el fósforo

contenido en los microorganismos se incorpora de manera rápida al suelo tras su muerte.

7.1.2.1 Factores de transporte del fósforo

Según Randall et al. (2002), los principales factores que afectan el transporte del fósforo son la erosión y la escorrentía. Como el fósforo es atrapado por los materiales del suelo, la erosión determina el movimiento del fósforo particulado en el terreno. Las fuentes de fósforo en cauces incluyen la superficie erosionable del suelo, riberas, lechos y desechos de vegetación. Por lo tanto, el control de la erosión es de primordial importancia para minimizar el transporte del fósforo especialmente en terrenos cultivados. En terrenos con cubiertos con vegetación permanente la principal fuente de sedimentos proviene de la erosión de las riberas de los cauces. Este sedimento tendrá características similares al material parental del subsuelo, el cual presenta a menudo, bajo contenido de fósforo.

La contribución del material erosionado al incremento del contenido de fósforo en las masas de agua es compleja. En primer lugar, parte del sedimento erosionado de los terrenos, será depositado en depresiones, zonas ribereñas, etc. Con lo cual, el sedimento que se descarga en los cuerpos de agua es solo una porción del sedimento erosionado. En segundo lugar, durante el movimiento de los sedimentos, las partículas más pequeñas (la fracción fina) de material es transportado de forma preferencial mientras que las partículas más grandes tienden a asentarse.

El transporte del fósforo disuelto es iniciado por la desorción, disolución y extracción del fósforo del suelo y material vegetal (Sharpley, 1995). La escorrentía que transcurre tanto superficial como subsuperficialmente, puede contener concentraciones significativas de fósforo disuelto. A medida que la lluvia o la nieve derretida se mueve a través de la superficie del suelo, el agua interactúa con una fina capa del mismo (1

a 5 cm). Durante este proceso, el fósforo es extraído del suelo y los restos de vegetación y se disuelve en la escorrentía.

Las concentraciones de fósforo disuelto en el flujo subsuperficial son bajas ya que los subsuelos deficientes en fósforo absorben y adsorben gran parte del fósforo soluble contenido en el agua percolando a través del perfil del suelo. Es por esto que la eutrofización acelerada de las aguas superficiales por fósforo se asocia principalmente con el flujo superficial (Randall et al., 2002).

7.1.3 Transporte de metales pesados

La contaminación de suelos y aguas por metales pesados es un problema a escala mundial debido a las numerosas actividades antropogénicas que generan gran cantidad de metales que cuando se acumulan en la superficie del suelo pueden llegar a alcanzar concentraciones tóxicas para las plantas, las personas y la vida acuática. De igual modo, el subsuelo puede llegar a contaminarse por metales debido a la lixiviación de los mismos, que incluso pueden alcanzar aguas subterráneas y contaminar fuentes de agua potable.

Las actividades como la minería han incrementado la prevalencia y ocurrencia de la contaminación por metales pesados en la superficie terrestre. Especialmente, las explotaciones mineras a cielo abierto han causado un grave impacto en el suelo y cursos de aguas, generando millones de toneladas de residuos ricos en sulfuros. En general, los suelos mineros son deficientes a nivel mecánico, físico, químico y biológico. Se caracterizan por su gran inestabilidad y cohesión limitada, con baja composición de nutrientes, escasa materia orgánica y altos niveles de metales pesados.

Las fuentes de emisión de metales pesados no se limitan exclusivamente a la actividad minera. En los sistemas de producción agrícola, la contaminación del suelo por

metales pesados está principalmente relacionada a la aplicación y acumulación de estos elementos a través de las repetidas aplicaciones de químicos ricos en metales como los fungicidas, fertilizantes químicos y biosólidos. Los suelos sometidos a estas prácticas muestran una alta concentración de metales que consecuentemente incrementan la concentración de los mismos en la escorrentía.

La movilidad de los metales pesados no solo depende de la concentración total en el suelo, sino también de las propiedades del suelo, de los metales y de los factores ambientales. Los metales pesados se pueden encontrar en forma soluble, asociados a carbonatos y en formas residuales.

De acuerdo con García y Dorrnsono (2005) los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir diferentes vías, tales como:

- Quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo o fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación.
- Ser absorbidos por las plantas y así incorporares a la cadena trófica.
- Pasar al a atmósfera por volatilización.
- Pueden movilizarse a las aguas superficiales y subterráneas.

Por otro lado, existen cuatro (4) posibles escenarios que pueden potenciar su transporte:

- La facilidad de transporte de la partícula debida a la asociación del metal con las partículas de tamaño coloidal.
- Por la formación de complejos orgánicos e inorgánicos del metal que no son absorbidos en la superficie sólida del suelo.
- Por competencia con otros constituyentes, orgánicos e inorgánicos por los lugares de absorción.

- Por la complejación orgánica del metal, donde los ligandos orgánicos disueltos mantienen el metal en la solución.

8. APLICACIÓN DEL SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT)

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT), desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS) (Arnold et al., 1998), es un modelo a escala de cuenca que permite simular la hidrología, calidad del agua y el manejo de cuencas. Asimismo, los componentes hidrológicos del SWAT han sido desarrollados y validados en diversos estudios en un intento de abordar diferentes cuestiones hidrológicas y ambientales.

La mayoría de los estudios realizados con el modelo SWAT han sido promovidos por diversos organismos gubernamentales motivados por la necesidad de cuantificar, evaluar y predecir los impactos que las actividades humanas tales como la agricultura intensiva, los cambios que producen el uso y/o cobertura del suelo sobre los recursos hídricos y ecosistemas y los efectos del cambio climático bajo distintos escenarios. Además, se han analizado una gran variedad de cuencas con distintas características topográficas y climáticas y con diferentes escalas espaciotemporales en los Estados Unidos, Europa, Asia y África. Numerosas investigaciones han demostrado resultados satisfactorios cuando el modelo es aplicado a cuencas con climas distintos y condiciones geográficas variables (Hanh Nguyen, Recknagel, Meyer, & Frizenschaf, 2017).

A pesar del auge en la implementación del modelo SWAT, a la fecha, la mayoría de las aplicaciones se concentran en Estados Unidos, China y unos pocos países europeos, que, por lo general, disponen de datos meteorológicos e hidrológicos confiables.

9. DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAT

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo computacional a escala de cuenca que permite predecir los efectos del clima, uso y manejo del suelo en la disponibilidad del agua y la contaminación, así como en la erosión del suelo, fertilidad y producción de cultivos.

El modelo SWAT es un modelo hidrológico semi-distribuido que ha sido ampliamente utilizado para entender el proceso del ciclo hidrológico, realizar simulaciones de los impactos en la calidad del agua, del uso del suelo y de las prácticas agrícolas, así como para evaluar diferentes alternativas y estrategias de gestión para mejorar la calidad del agua y el funcionamiento de los ecosistemas en una cuenca.

No solo es una herramienta de investigación, sino que provee información real y útil para la evaluación de problemas reales específicos. Esta herramienta es de dominio público y ha sido desarrollada por un grupo de científicos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales y la Universidad de Texas A&M. Los principales componentes del modelo son los componentes de procesos hidrológicos, un generador climático, transporte de nutrientes y prácticas de manejo.

10. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO SWAT

- El modelo es físicamente basado, lo que quiere decir que los resultados no son generados únicamente a partir de ecuaciones, sino que también requiere información específica sobre clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo de uso del suelo de la cuenca. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, sedimentos, crecimiento de las plantas, ciclo de nutrientes, etc. Son directamente modelados por SWAT a partir de estos datos de entrada.
- Requiere de datos comúnmente disponibles en los organismos gubernamentales.

- La simulación de grandes cuencas o de una variedad de estrategias de gestión puede ser ejecutada sin una excesiva inversión de tiempo y dinero.
- Permite a los usuarios realizar estudios de impactos a largo plazo.

10.1 Componentes del modelo

Los componentes de cada subcuenca en SWAT se pueden agrupar en siete (7) categorías principales: clima, hidrología, uso del suelo/crecimiento de cultivos, erosión, nutrientes, pesticidas y prácticas agrícolas.

10.1.1 Clima

El clima de una cuenca provee las entradas de energía y humedad necesarias para el balance hídrico y determinar la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables climáticas de entrada requeridas por el modelo consisten en datos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento. Estos datos pueden introducirse a partir de registro de datos observados que pueden obtenerse principalmente en las agencias gubernamentales o ser generados durante la simulación ya que el modelo tiene incorporado un generador de datos climáticos.

10.1.2 Hidrología

El modelo simula los procesos de deshielo, precipitación, interceptación por la canopia, etc. Además, realiza la simulación distinguiendo entre la escorrentía superficial y la infiltración, la redistribución del agua en el perfil del suelo, evapotranspiración, flujo subsuperficial, flujo de retorno de acuíferos poco profundos y recarga de acuíferos profundos.

10.1.3 Uso Del Suelo/Crecimiento De Cultivos

Mediante información sobre las propiedades del suelo, operaciones de manejo y variables climáticas, el modelo puede estimar el rendimiento de los cultivos y la producción de la biomasa para una gran variedad de cultivos rotativos, sistemas de pastoreo y árboles. También simula el proceso de siembra, cosecha, labranza, aplicaciones de nutrientes y pesticidas para cada sistema de cultivo con fechas específicas o con la programación de unidades de calor.

El modelo utiliza una versión simplificada del modelo EPIC (Erosion-Productivity Impact Factor) para simular toda clase de coberturas del suelo, pudiendo diferenciar entre plantas anuales y perennes. El modelo de crecimiento de la planta es utilizado para valorar la eliminación de agua y nutrientes de la zona de la raíz, transpiración y de la producción de biomasa.

10.1.4 Erosión

La erosión y producción de sedimentos es estimada para cada unidad de respuesta hidrológica mediante la Ecuación Modificada de Pérdida de Suelos (MUSLE por sus siglas en inglés).

10.1.5 Nutrientes

SWAT simula los residuos y mezcla biológica en respuesta a cada operación de labranza, las aplicaciones de nitrógeno y fósforo en la forma de fertilizantes inorgánicos o aplicaciones de estiércol. A esto se añade, la eliminación de la biomasa, deposición de estiércol en las operaciones de pastoreo y las aplicaciones continuas de estiércol para operaciones de alimentación confinada.

El SWAT rastrea el movimiento y la transformación de las diversas formas de nitrógeno y fósforo en las cuencas. En el suelo, la transformación del nitrógeno y del

fósforo de una forma u otra están regidas por sus respectivos ciclos. Estos nutrientes son muy importantes para el crecimiento de las plantas. Las cantidades de NO₃-N contenidas en la esorrentía, flujo subsuperficial y percolación son estimadas como productos del volumen de agua y la concentración promedio de nitrato en la capa de suelo. La cantidad de fósforo soluble (P) removida por la esorrentía es obtenida a partir de la concentración de fósforo (P) en los 10 mm superiores de la capa superficial de suelo, el volumen de escurrimiento y un factor de partición (Neitsch et al., 2011).

10.1.6 Pesticidas

SWAT simula el movimiento de los pesticidas en el cauce mediante la esorrentía superficial y en el perfil del suelo y en acuífero mediante la percolación. Para modelar el transporte utiliza la ecuación de GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Managment System) (Neitsch et al., 2011).

10.1.7 Prácticas De Manejo Agrícola

SWAT permite al usuario definir las prácticas de manejo para cada URH, tales como los calendarios de cultivos, aplicaciones de pesticidas y riego. Además, están incorporada opciones para las aplicaciones automatizadas de abono y agua. Puede simular el riego en los terrenos agrícolas tomando en cuenta la fuente de procedencia, ya sea el cauce, embalse, acuíferos poco profundos o de un cuerpo de agua externo a la cuenca.

PROCESOS HIDROLÓGICOS EN SWAT

El modelo SWAT divide la cuenca en varios números de subcuencas basándose en un modelo digital de elevaciones (MED). A su vez, cada subcuenca consiste en un número de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), las cuales poseen características homogéneas de suelo, relieve, vegetación y manejo o uso del suelo.

Las mismas no están georreferenciadas y no están vinculadas entre sí dentro de la subcuenca.

Neitsch et al. (2011) señalan que la simulación hidrológica de la cuenca en SWAT consta de dos fases principales:

1. La fase terrestre del ciclo hidrológico, que controla la cantidad de agua, sedimentos y nutrientes que llegan al cauce principal.
2. La fase de tránsito del ciclo hidrológico o fase de transporte, que se puede definir como el movimiento del agua, sedimentos y nutrientes a través del cauce principal hacia la salida de la cuenca.

10.2 Proceso de modelización en SWAT

El proceso de modelización de cuencas en SWAT se inicia con la delimitación de la cuenca. Previo a esto, debe recopilarse la información de entrada necesaria que consiste fundamentalmente en:

- Modelo Digital de Elevaciones (MED)
- Mapas de suelos
- Mapas de uso/cobertura de suelos
- Datos climatológicos tales como precipitación, radiación solar, temperatura del aire, velocidad de viento, etc.

La modelización en SWAT se realiza mediante una extensión de un Sistema de Información Geográfica (SIG), en este caso QSWAT, para la delimitación de la cuenca basada en un MED, procesando el uso/cobertura y tipos de suelos, definición de las unidades de respuesta hidrológica (HRUs), el análisis de datos meteorológicos y la preparación del conjunto de datos de entrada para ejecutar el SWAT.

10.3 Base teórica del modelo SWAT

10.3.1 Ecuación de balance hídrico

El estudio del balance hídrico permite realizar una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades humanas. Su conocimiento es vital para el estudio del ciclo hidrológico ya que permite comparar recursos específicos de agua en un sistema, en diferentes períodos de tiempo y establecer el grado de su influencia en las variaciones del régimen natural (UNESCO, 1981).

La ecuación principal que gobierna el ciclo hidrológico en SWAT es la ecuación de balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

Esta ecuación define el contenido de agua al final de un día SW_t como la suma del contenido de agua inicial SW_0 y las pérdidas y ganancias del día.

Donde:

R_{day} , precipitación (mm)

Q_{surf} , escorrentía superficial (mm)

E_a , evapotranspiración (mm)

w_{seep} , percolación (mm)

Q_{gwd} , agua subterránea (mm)

t , tiempo (día)

10.3.2 Precipitación

Cuando no existen datos de precipitación o es necesario completar datos, puede utilizarse el generador climático WXGEN incorporado en el modelo SWAT. El mismo proporciona datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación

solar para un período de n años usando una cadena de Markov de primer orden para definir si un día es lluvioso o seco.

La precipitación es modelada como un proceso de Markov de dos etapas. Las probabilidades de Markov son probabilidades de transición a un estado húmedo para el día actual basado en la clasificación del anterior como húmedo o seco. En los días húmedos, se usa una distribución gamma para modelar la cantidad de precipitación. Un día húmedo se define como un día con al menos 0.254 mm de lluvia.

10.3.3 Escorrentía superficial

Tal como se ha descrito anteriormente, la escorrentía es otra componente del ciclo hidrológico y se define como “el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre, y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 1989).

“El camino seguido por una gota de agua desde el momento en el cual alcanza la tierra hasta cuando llegue al cauce de una corriente es incierto” (Linsley et al., 1977).

La escorrentía superficial es aquella que proviene de la precipitación no infiltrada y corresponde al volumen de agua que avanza o escurre sobre la superficie del suelo.

El efecto de la escorrentía superficial a la escorrentía total es inminente y existirá durante la tormenta e inmediatamente después de que esta termine, siempre que la intensidad de la lluvia sea mayor que la capacidad de infiltración del suelo.

SWAT propone 2 métodos para la estimación de la escorrentía superficial:

1. El método del Número de Curva SCS, es el más comúnmente adoptado para predecir la escorrentía y no considera la intensidad y duración solamente el volumen de lluvia.
2. El método de Green-Ampt que puede simular los impactos de intensidad y duración de los procesos de infiltración.

10.3.4 Grupos hidrológicos de suelos

El Servicio de Conservación de los EE UU (NRCS) clasifica los suelos en 4 grupos hidrológicos de acuerdo a sus características de infiltración. El NRCS define un grupo hidrológico de suelos como un grupo de suelos que poseen potencia de escorrentía bajo tormentas similares y condiciones de cobertura (Neitsch et al., 2011).

- Grupo A: Estos suelos poseen una alta tasa de infiltración aun cuando se encuentran completamente mojados. Ejemplos de este tipo de suelos son la arena profunda, suelos profundos depositados por el viento y limos agregados.
- Grupo B: Suelos que poseen una tasa de infiltración moderada cuando están completamente mojados. Entre ellos se encuentran los suelos poco profundos depositados por el viento, la marga arenosa, etc.
- Grupo C: Tienen una baja tasa de infiltración cuando están completamente mojados tales como las margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcillas.
- Grupo D: son suelos que se expanden significativamente cuando se mojan como las arcillas altamente plásticas y los suelos salinos. Condiciones de humedad antecedente.

El SCS define tres (3) condiciones de humedad antecedente:

I. Condición seca

II. Condición normal

III. Condición húmeda

La curva de condición de humedad I es el menor valor diario que puede asumirse en condiciones secas. Los valores típicos de los números de curva en condiciones normales de humedad, es decir, la condición de humedad antecedente II, se encuentran listados en tablas.

10.3.5 Parámetro de retención del suelo S

SWAT permite elegir entre dos métodos para calcular el parámetro de retención del suelo.

1. Un método tradicional que permite que el parámetro de retención S varíe con el contenido de agua en el perfil del suelo.
2. Un método alternativo añadido al modelo que permite que el parámetro de retención S varíe con la evapotranspiración acumulada.

El cálculo del valor diario del CN como una función de la evapotranspiración acumulada se debe a que el método tradicional sobreestima la predicción de la escorrentía en suelos poco profundos. Mediante el cálculo del número de curva CN en función de la evapotranspiración, el valor es menos dependiente de la capacidad de almacenamiento del suelo y más dependiente del clima antecedente (Neitsch et al., 2011).

10.3.6 Ajuste de pendientes

Los números de curva tabulados para la condición de humedad II asume pendientes del 5%. Williams (1995) desarrolló una ecuación para ajustar el número de curva a diferentes pendientes.

Este ajuste de pendientes no se realiza en el modelo de forma automática por lo que el usuario debe indicar el valor de la pendiente que desea.

Escorrentía máxima o caudal pico

La tasa de escorrentía máxima es el flujo máximo de escorrentía que ocurre en un episodio de lluvia. El caudal pico es un indicador el poder erosivo de una tormenta y es usado para predecir la pérdida de sedimentos.

SWAT calcula el caudal pico con una variación del método racional. El método racional supone que la escorrentía máxima proveniente de un episodio de tormenta es

proporcional a la lluvia caída, supuesto que se cumple en forma más rigurosa en cuencas mayoritariamente impermeables o en la medida que la magnitud de la lluvia crece y el área aportante se satura

Teóricamente se basa en los siguientes criterios:

1. La intensidad de la lluvia en la cuenca vertiente son uniformes en toda su área y ocurre durante un periodo de tiempo igual al tiempo de concentración t_c .
2. El máximo caudal se produce cuando la superficie total de la cuenca contribuye a la escorrentía al final de la misma.
3. El coeficiente de escorrentía C es igual a un porcentaje de la intensidad de la tormenta.

10.3.7 Pérdidas de transmisión

Los cauces naturales en regiones áridas y semiáridas por lo general son efímeros. El flujo es ocasional y es posterior a la ocurrencia de tormentas, que son poco frecuentes. Cuando ocurre el flujo en cauces normalmente secos, el volumen de flujo es reducido por infiltración a través del lecho, de las márgenes y posiblemente de la llanura de inundación. Estas pérdidas por infiltración denominadas pérdidas de transmisión, no solo reducen el volumen del hidrograma, sino que también reducen el caudal pico.

Hipótesis:

- Toda el agua se pierde en el cauce.
- Las características de infiltración y otras características del cauce son uniformes.
- La concentración de sedimentos, temperatura, caudal inicial afecta las pérdidas de transmisión, pero la ecuación representa las condiciones promedio.
- El tramo del cauce es lo suficientemente pequeño para que el promedio del ancho y la duración sea representativo para todo el tramo.

- Una vez el volumen umbral ha sido satisfecho, el volumen de salida es linealmente proporcional al volumen de entrada.
- Una vez restada la pérdida promedio y el volumen de flujo entrante supera el umbral de volumen, el caudal máximo en la salida es linealmente proporcional al caudal máximo en la entrada.
- Para el cálculo del volumen y el caudal máximo, el aporte lateral se asume que ocurre al mismo tiempo que la entrada lateral aguas arriba.

10.3.8 Evapotranspiración

SWAT dispone de tres métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Estos son el método de Penman-Monteith, el método de Priestley y Taylor (1975) y el método de Hargreaves (1985).

10.3.9 Nutrientes

10.3.9.1 Cuantificación del nitrógeno en el suelo

SWAT monitorea 5 reservas de nitrógeno en el suelo. Dos de estas son formas inorgánicas y tres orgánicas.

El nitrógeno está presente en el suelo en forma orgánica y mineral. El nitrógeno orgánico puede estar asociado con los residuos de vegetación y la biomasa microbiana o a las sustancias húmicas del suelo. El nitrógeno que se encuentra en los restos de vegetación pertenece a la reserva orgánica fresca, mientras que el nitrógeno asociado al humus puede encontrarse en la reserva estable y en la reserva activa, además de que puede moverse de una reserva a otra. Por otra parte, el nitrógeno mineral se encuentra como amonio (NH_4) y como nitrato (NO_3), ambas reservas comprenden la reserva de nitrógeno mineral.

Los procesos de transformación del nitrógeno y su paso de una reserva a otra se resumen a continuación.

El modelo parte de las concentraciones iniciales de nitrógeno en el suelo se obtienen mediante:

- Introducción directa de la concentración de nitratos (NO_3^-) al suelo o en caso contrario, se calcula mediante una ecuación exponencial en función de la profundidad del terreno para el caso de los nitratos.
- Considerando la relación C/N presente en el suelo para el caso del nitrógeno orgánico.
- Considerando los niveles iniciales de amonio iguales a cero.

1. Descomposición y mineralización

- Mediante la mineralización y descomposición, el nitrógeno orgánico contenido en las reservas orgánica, fresca y activa se transforma en nitrógeno mineral que se añade a las reservas de nitrato. Estos procesos biológicos dependen de la temperatura y de la disponibilidad de agua en el suelo y están relacionados estequiométricamente con el carbono presente en el suelo.

2. Nitrificación y volatilización del amonio

- La nitrificación es un proceso de oxidación bacteriana de dos etapas que permite la transformación del amonio a nitrato y que depende de la temperatura y contenido de agua en el suelo.

- A través del proceso de volatilización, el amonio contenido en la reserva mineral se transforma en nitrógeno amoniacal en fase gas mediante carbonato cálcico o urea. Es función de la temperatura del suelo y la profundidad.

3. Desnitrificación

- Reducción bacteriana de nitrato a gas (N_2 o N_2O) bajo condiciones anaeróbicas. Es función del contenido de agua del suelo, temperatura y la presencia de fuentes de nitratos y carbono. Se estima que el nitrato perdido mediante este proceso es del 10-20%.

4. Deposición atmosférica de nitrógeno en forma de nitrato y amonio a través del viento y la lluvia.

5. Fijación u obtención del nitrógeno a través de la bacteria rhizobia fijada en las raíces de las legumbres.

10.3.9.2 Transformaciones del nitrógeno en el suelo

a. Mineralización, descomposición e inmovilización

Para el cálculo del proceso de mineralización, el modelo SWAT utiliza una adaptación del algoritmo del modelo de mineralización de PAPRAN considerando dos fuentes de mineralización:

1. La reserva de nitrógeno orgánico fresco
2. La reserva de nitrógeno orgánico de las sustancias húmicas

Tanto la mineralización como la descomposición son dependientes de la disponibilidad del agua y de la temperatura en el suelo. Para tomarlos en cuenta, se utilizan dos (2) factores en las ecuaciones de mineralización.

b. Nitrificación y volatilización

La nitrificación se define como el proceso de oxidación NH_4^+ a NO_3^- , realizado por un grupo de microorganismos autótrofos principalmente nitrobacterias que obtienen su energía a partir de este. Consta de un proceso de dos etapas: en la primera, las bacterias nitrosomonas que transforman el NH_4^+ en NO_2^- y la etapa posterior el

NO_2^- es convertido en NO_3^- por parte de las nitrobacterias. Este proceso es función de la temperatura y el contenido de agua del suelo.

La volatilización se utiliza para describir la pérdida de N del suelo como amoníaco (NH_3). Es función de la temperatura, profundidad, la capacidad de intercambio catiónico.

El modelo SWAT simula los procesos anteriores usando una combinación de los métodos desarrollados por Reddy et al. (1979) y Godwin et al. (1984). Con esto obtiene la cantidad total de nitrógeno perdido mediante nitrificación y volatilización y luego separa la cantidad correspondiente a cada proceso.

10.3.9.3 Cuantificación del fósforo en el suelo

SWAT monitorea seis (6) reservas de fósforo en el suelo, tres (3) de estas son reservas de fósforo inorgánico y tres (3) orgánicas.

Los pasos ejecutados por el modelo para la cuantificación del fósforo siguen el esquema siguiente:

1. Niveles iniciales de fósforo en el suelo

- Pueden ser introducidas las concentraciones de fósforo o en caso contrario
- Se establece una concentración inicial de fósforo de 5mg/Kg en todas las capas de suelo.
- Se calcula mediante una ecuación el fósforo mineral presente en la reserva activa.
- La concentración de fósforo de la reserva estable es 4 veces la concentración presente en la reserva activa.
- Se emplea la relación N:P para la asignación de los niveles de fósforo orgánico húmico
- Se establece que el fósforo de la reserva fresca es igual a cero

2. Mineralización y descomposición

- Dependen de la temperatura y de la disponibilidad de agua en el suelo.

3. Adsorción de fósforo inorgánico

4. Lixiviación

Concentraciones iniciales de fósforo en el suelo

La concentración inicial de fósforo en todas las capas de suelo es de 5 *mg/kg*. Esta concentración es representativa de un terreno virgen con vegetación nativa. En un terreno cultivado, una concentración de 25 *mg/kg* es representativa.

10.3.9.4 Pesticidas

Lixiviación y lavado

La cantidad de pesticidas perdidas en el lavado se cuantifica mediante la expresión:

$$p_{stf, wsh} = fr_{wsh} * p_{stf}$$

Donde:

$p_{stf, wsh}$, es la cantidad de pesticidas retenido por el follaje perdido mediante lavado en *kgP/ha*

fr_{sw} , fracción de pesticidas lavado

p_{stf} , cantidad de pesticida retenido en el follaje

Degradación de pesticidas en el suelo

La degradación de pesticidas o su eliminación está dada por la ecuación cinética de primer orden:

$$p_{sts, ly, t} = p_{sts, ly, 0} * \exp(-K_{p, soil} * t)$$

Donde:

$p_{sts, ly, t}$, cantidad de pesticida en la capa de suelo en el tiempo t (*kgpst/ha*)

$p_{sts, ly, 0}$, es la cantidad inicial del pesticida en la capa (*kgpst/ha*)

k_p , *soil*, constante de velocidad de degradación o eliminación del pesticida en el suelo (1 día)

t , es el tiempo transcurrido desde que la cantidad de pesticida inicial fuera determinada (*días*)

10.3.10 Erosión de suelos y transporte de sedimentos

Según Einstein (1964):

“Cada partícula de sedimento que atraviesa una sección particular de un cauce debe satisfacer las dos condiciones siguientes: (1) debe haber sido erosionado en algún lugar en la cuenca aguas arriba de la sección, (2) debe ser transportada por el flujo desde el lugar erosionado hasta la sección”.

La erosión del suelo es un proceso que involucra el desprendimiento, transporte y deposición del material de suelo. En SWAT, se analiza la erosión que ocurre en la fase terrestre y posteriormente, a lo largo del cauce o red fluvial.

10.3.10.1 Ecuación Universal De Pérdida De Suelos: USLE (Universal Soil Loss Equation)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), es un modelo de regresión para predecir la erosión laminar y en surcos.

Para desarrollar el modelo se utilizaron seis (6) factores principales para describirlo:

1. R, índice de erosividad de la lluvia,
2. K, factor de erodabilidad
3. SL, factor topográfico,
4. C, factor de cubierta vegetal
5. P, prácticas y estrategias para el control de la erosión.

La expresión del modelo USLE es:

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

Donde SL, C y P son adimensionales.

De acuerdo con la ecuación 4.145, la erosión es vista como el producto de la erosividad de la lluvia (R), multiplicado por la resistencia del ambiente la cual está comprendida en el factor de erodabilidad (K), por el factor topográfico (LS), por las prácticas agrícolas y cubierta vegetal (C) y por las estrategias utilizadas para el control de la erosión (P).

Factor R. Es igual a la energía cinética multiplicada por la máxima intensidad de lluvia en 30 minutos (I₃₀) expresada en cm/h. Este índice corresponde al riesgo de erosión potencial en una región determinada donde la erosión laminar aparece un terreno desnudo con una pendiente del 9%.

Factor K. El factor de erodabilidad fue descrito como una función de los porcentajes de arena gruesa, arcilla, materia orgánica, permeabilidad y de la estructura del suelo. Varía en un rango de 0.7 para los suelos más frágiles a 0.01 para suelos más estables.

Factor SL. Depende de la longitud y de la pendiente.

Factor C. El factor de cobertura vegetal y manejo de cultivo fue definido como la relación de la pérdida de suelo de la tierra cultivada bajo condiciones específicas de labranza. El factor se encuentra en un rango de 0 a 1.0 dependiendo de la cobertura vegetal, estación de la cosecha y otras técnicas de manejo agrícolas.

Factor P. Este factor toma en cuenta los efectos de las prácticas de conservación en el control de la erosión. Es definido como la relación entre la pérdida de suelo usando una de estas prácticas y la pérdida de suelo usando cultivos en hileras en la parte superior e inferior de la pendiente.

Este modelo presenta el inconveniente de que solo es aplicable a la erosión laminar puesto que la fuente de energía es la lluvia, por lo tanto, no aplica para otros tipos de erosión.

10.3.10.2 Ecuación Universal Modificada de la Pérdida de Suelo: MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation).

Williams (1975) desarrolló el modelo MUSLE reemplazando el factor de energía de la lluvia con un factor de energía de la escorrentía. La ecuación fue desarrollada usando los datos de una tormenta individual en 18 cuencas en Texas y Nebraska y luego validada en 102 cuencas alrededor de los EE. UU. usando datos de escorrentía generados del componente hidrológico del modelo SWRRB (Williams, 1982).

De acuerdo con Jackson et al. (1986) las principales ventajas de este modelo son su simplicidad, la relevancia física y conceptual de sus factores, la gran cantidad de datos sobre la cual fue desarrollado el modelo y la capacidad de insertar consideraciones de gestión dentro de los factores de selección. Su desventaja radica en que, al tratarse de un modelo empírico no considera todos los factores físicos que afectan el rendimiento de sedimentos y generalmente hay errores bastante grandes relacionados con la pérdida de suelos USLE y la estimación de la escorrentía.

10.3.10.3 Esquema del cálculo de la erosión en SWAT

El proceso seguido por el modelo para el cálculo de la erosión consta de dos partes: la terrestre y la que se tiene lugar en el cauce.

- Fase terrestre. Erosión en cuenca.
- Uso de la Ecuación Modificada de Pérdida de Suelos (MUSLE) en cada HRU a paso diario.
- Obtención de la erosión anual promedio USLE con fines comparativos.
- En cauce:

- Ecuación de Bagnold basada en la potencia de escorrentía. Se obtiene la capacidad máxima de transporte en tramo perteneciente a cada subcuenca.

- La máxima concentración se compara con la concentración al inicio del tramo para conocer si se produce deposición o erosión. El transporte está limitado por la capacidad de transporte. Finalmente se realizan comprobaciones de tensión crítica.

Transporte de nutrientes, pesticidas y metales pesados

Los principales mecanismos de transporte de contaminantes se citan en los siguientes puntos:

- Los nitratos pueden moverse en el suelo a través de la escorrentía superficial, el flujo subsuperficial o por percolación.

- El nitrógeno orgánico se transporta en la escorrentía superficial asociado al sedimento, sobre todo, a los tamaños de partículas coloidales y arcillosas a nivel de HRU.

- El fósforo se mueve en el suelo principalmente por difusión. Algunas de las partículas de la solución de fósforo en el suelo pueden ser removidas y transportadas mediante la escorrentía superficial. También pueden transportarse asociados al sedimento mediante la escorrentía superficial. Esta fase está asociada a la carga de sedimentos en la HRU.

- Los pesticidas se mueven en solución mediante escorrentía superficial, el flujo subsuperficial y percolación, todo esto en función del tiempo de concentración y la cantidad de flujo. Al igual que el fósforo y el nitrógeno pueden transportarse asociados al sedimento en la escorrentía superficial.

10.3.10.4 TRANSPORTE DE PESTICIDAS

Los pesticidas en el suelo pueden ser transportados en la solución o atrapados en el sedimento. El reparto de los pesticidas entre la solución y las fases del suelo es

definido por el coeficiente de adsorción que es la proporción de la concentración de pesticidas en el suelo en la fase sólida y la concentración en la solución o fase líquida. El reparto de los pesticidas es dependiente de la cantidad de material orgánico en el suelo, el coeficiente de adsorción del suelo es introducido en el modelo normalizado para el contenido de carbono orgánico.

10.3.10.5 TRANSPORTE DE METALES PESADOS

SWAT permite agregar las cargas de metales pesados al flujo de la red y simula la trayectoria de los metales pesados a través de la red del cauce, pero no incluye ningún algoritmo para modelar los procesos internos en el flujo. Para determinar el movimiento de los metales pesados a través de la red principal utiliza ecuaciones simples de equilibrio, pero no incluye algoritmos en el modelo para determinar los procesos internos en el cauce (Neitsch et al., 2011).

11. SIMULACIÓN DE LA CUENCA EMBALSE LOS MOLINOS

11.1 Datos de partida y configuración del modelo

Para implementar el modelo SWAT, en primer lugar, es necesario recopilar la información topográfica, usos y cobertura del suelo y tipos. Luego estos datos son procesados con la ayuda de una herramienta SIG. Se ha utilizado QSWAT PLUS V 3.16.7-Hannover para la ejecución del modelo.

11.1.1 Datos de partida

Los datos de partida del modelo SWAT seleccionados han sido los siguientes:

- Modelo Digital de Elevaciones. describe la topografía y la geometría de la cuenca y las subcuencas; fue obtenido de la página del IGN con una resolución espacial de 5 m.

- Mapa de uso y/o cobertura del suelo: define el tipo de uso y cobertura actual del suelo en la cuenca. Casi toda la superficie de la cuenca corresponde a zonas de sierras y tiene pequeñas áreas agrícolas. Este mapa fue obtenido del portal <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/mapas> y tiene una resolución de 1 Ha. Se distinguieron 16 tipos de coberturas de acuerdo a lo detallado en las tablas 13 y 14. Las clases del mapa original de uso y/o cobertura del suelo fueron traducidas a las clases estándar del SWAT.
- Mapa del tipo de suelo: determina los diferentes tipos de suelo en el área de estudio; está asociado con la información que describe las propiedades físicas y químicas del suelo. Este mapa fue extraído del portal <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/mapas>.
- Datos climáticos. Los datos climáticos utilizados para simular los procesos hidrológicos en SWAT fueron obtenidos del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR en lo adelante) del National Center for Environmental Prediction (NCEP). Esta información es diaria e incluye la precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento para 1 estación. El conjunto de datos del CFSR consiste en pronósticos horarios de clima generados por el Sistema de Pronóstico Global del National Weather Service. Estos pronósticos son reinicializados cada 6 horas (horas de análisis=00, 0600, 1200 y 1800 UTC) usando información de la red de estaciones climáticas global y productos derivados de satélites. En cada hora de análisis, el CFSR incluye el dato pronosticado en la hora analizada previamente y el análisis de datos utilizados para reinicializar el pronóstico del modelo (Fuka, et al., 2013). La resolución horizontal del modelo atmosférico usado por CFSR es de 38 km con 64 niveles verticales que se extienden hasta 0.26 hPa, es decir, abarca prácticamente toda la atmósfera. Por otro lado, el modelo oceánico tiene una resolución horizontal de 0.25° cerca al ecuador y alrededor de 0.5° en las regiones

extra tropicales y 40 niveles. El modelo global de superficie tiene 4 niveles de suelo y el modelo de océano-hielo tres niveles. A este modelo se le agregaron datos de precipitaciones diarias acumuladas, de la estación La Cumbrecita, del tipo OMXH - MAGYA RAD_OMX que pertenece a Agricultura de Córdoba, estos datos abarcan el período 01-JUN-2015 al 21-11-2021. La mencionada información fue extraída del portal <https://newmagya.omixom.com/> .

Tabla 15: Cobertura y usos del suelo

Nro.	Cobertura y Uso del Suelo	Código SWAT	Nro.	Cobertura y Uso del Suelo	Código SWAT
1	Monte	rngb	9	Urbano Baja Densidad	urml
2	Matorral / Arbustal	shrb	10	Urbano Densidad Media	urmd
3	Pastizal Natural	rnge	11	Urbano Densidad Media	urmd
4	Pastizal Natural c/rocas o suelo desnudo	migs	12	Infraest. Vial	urld
5	Roca	migs	13	Cultivo Anual	agrc
6	Suelo Desnudo / Baja Cobertura Vegetal	migs	14	Pastura Implantada	agrc
7	Cuerpo de agua	migs	15	Pastura Natural Manejada	past
8	Infraest. Vial	migs	16	Plantación Forestal	pine

Tabla 16: Áreas de cobertura y uso del suelo

Cobertura	Area (Ha)	Porcentaje (%)
agrc	115.29	0.13
migs	23531.05	26.08
past	4858.76	5.39
pine	4509.8	5.00
rngb	7598.51	8.42
rnge	19332.81	21.43
shrb	24852.36	27.55
urld	361.65	0.40
urmd	1908.14	2.12
urml	208.17	0.23

11.1.2 Delimitación de la cuenca y definición de las HRUs.

La delimitación automática de la cuenca del embalse Los Molinos fue realizada en base al modelo digital de elevaciones. Los atributos topográficos de cada subcuenca, tales como el área y la pendiente se derivan del mismo. De igual manera, la longitud,

la pendiente, el ancho y la profundidad del cauce son obtenidos a partir de él. De esta delimitación resultó la división de la cuenca en treinta y un (31) subcuencas (ver fig. 33).

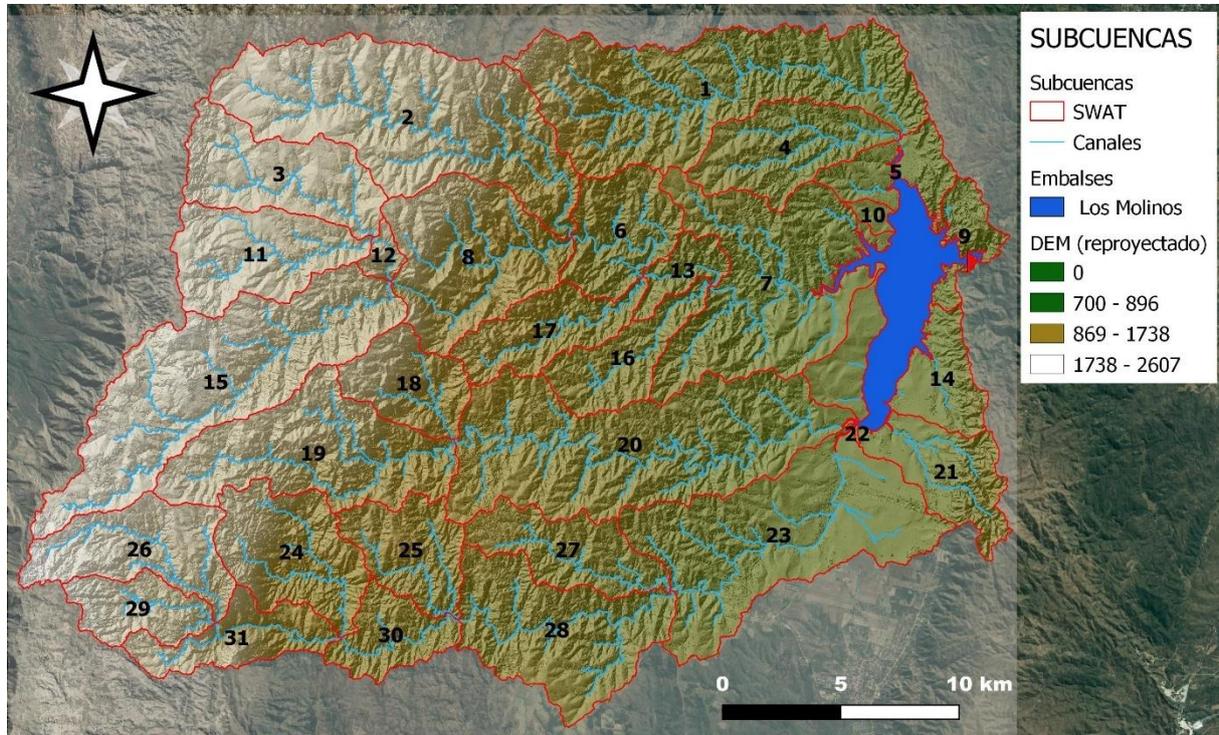


Figura 33 Subcuencas del modelo

El tipo de vegetación determina muchos componentes del ciclo hidrológico: requerimientos de agua total, demanda de riego, cantidad de agua perdida mediante evapotranspiración, escorrentía superficial, percolación y erosión. A partir de la imagen georreferenciada ráster de usos y coberturas del suelo descargado del portal <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/mapas> se distinguieron 16 tipos de coberturas (ver fig. 34 y Tabla 15). Las clases del mapa original de uso y/o cobertura del suelo fueron traducidas a las clases estándar del SWAT.

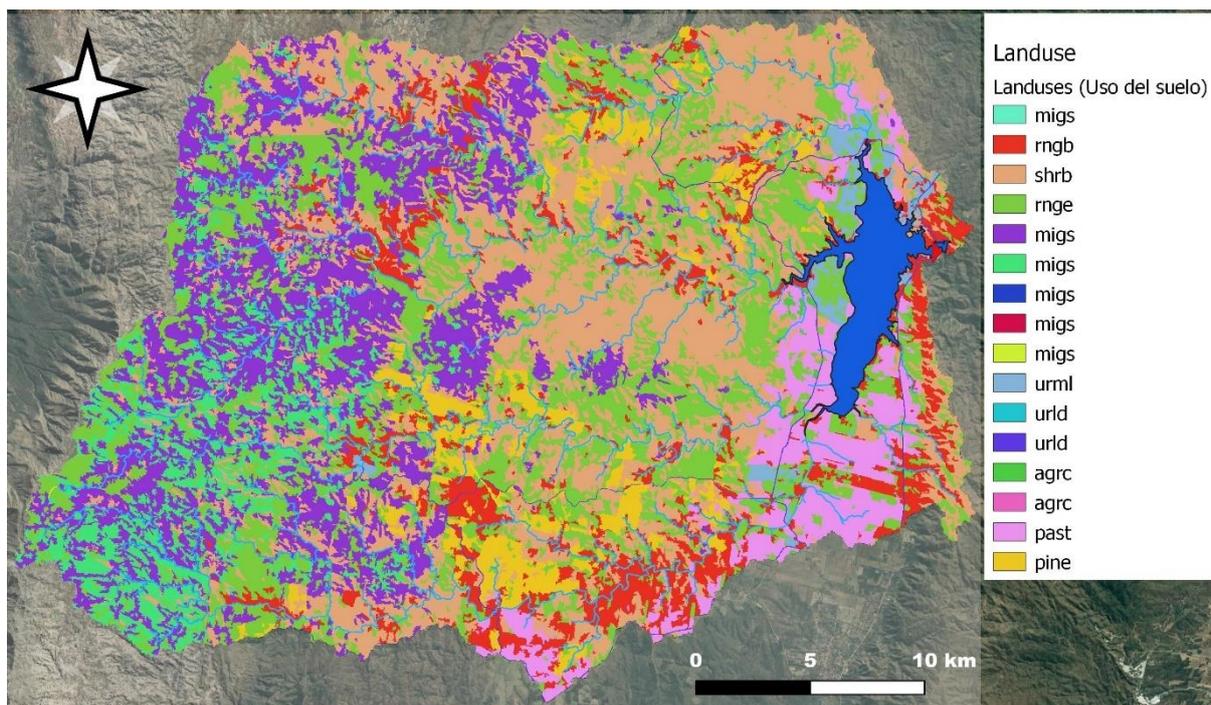


Figura 34 Usos y coberturas del suelo

Tabla 17: Distribución SWAT de Uso del Suelo (2018)

Código	(Ha.)	Porcentaje	Descripción
shrb	24852.36	27.55	Pastura natural con suelo desnudo
agrc	115.29	0.13	Cultivo ext. Anual
migs	23531.05	26.08	Matorral / arbustal
past	4858.76	5.39	Pastura natural manejada
pine	4509.80	5.00	Plantación forestal
rngb	7598.51	8.42	Monte
rngc	19332.81	21.43	Pastizal natural
urld	361.65	0.40	Urbano baja densidad
urml	20879.79	3.19	Urbano densidad media baja

Un mapa de pendientes fue deducido a partir del modelo digital de elevaciones definiendo las clases de pendientes entre los rangos de 0-5%, 5-15%, 15-25% y >25%.

En este se observa que, en casi un 40%, la superficie de la cuenca posee pendientes mayores al 25% (ver fig. 35 y Tabla 16).

Tabla 18: Distribución de pendientes

Pendiente (%)	Area (Ha)	Porcentaje
0-5.0	9417.1	10.44
5.0-15.0	22560.03	25.01
15.0-25.0	20469.09	22.69
> 25.0	35593.79	39.46

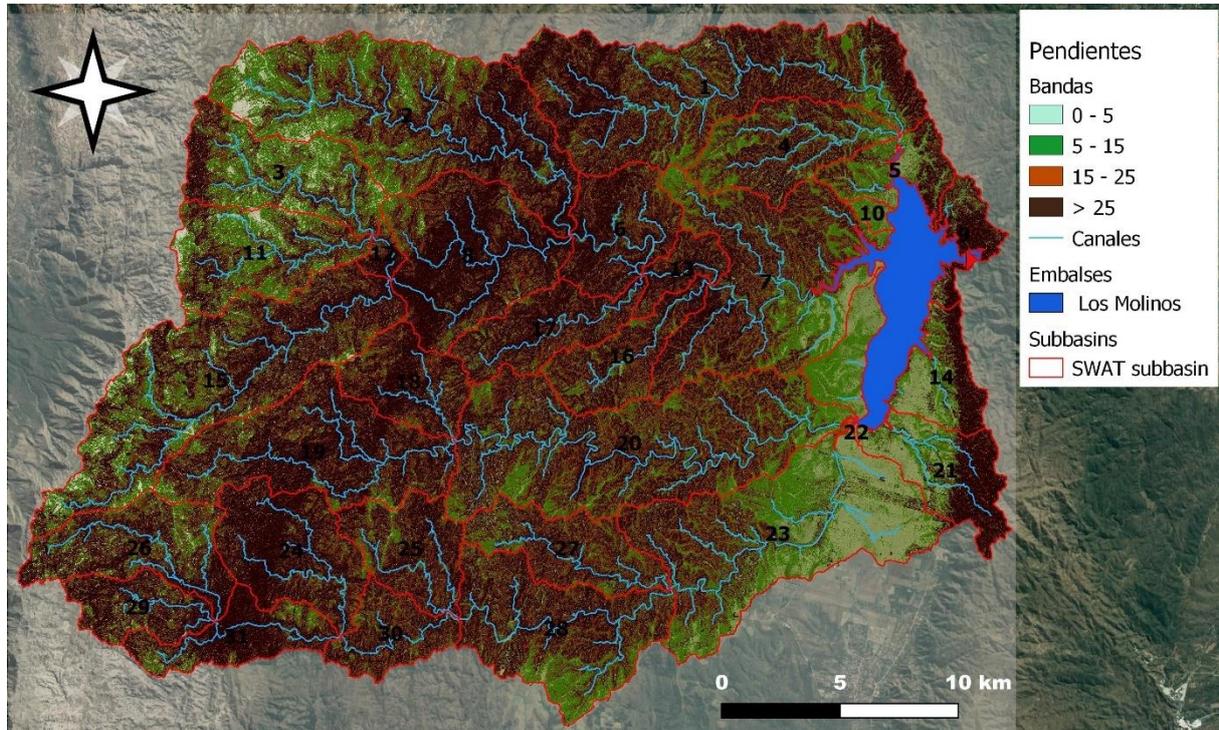


Figura 35 Mapa de pendientes

La distribución espacial de la clasificación de suelos se tomó del portal <https://www.mapascordoba.gov.ar/#/mapas>, y se asimilaron los tipos de suelos a los existentes en las bases de datos de QSWAT Plus, de acuerdo a las características de las series existentes en la mencionada página web, acorde a su contenido de arcilla, limo, arena, carbono, permeabilidad, textura, etc. De acuerdo a lo indicado en la fig. 36 y tabla 17.

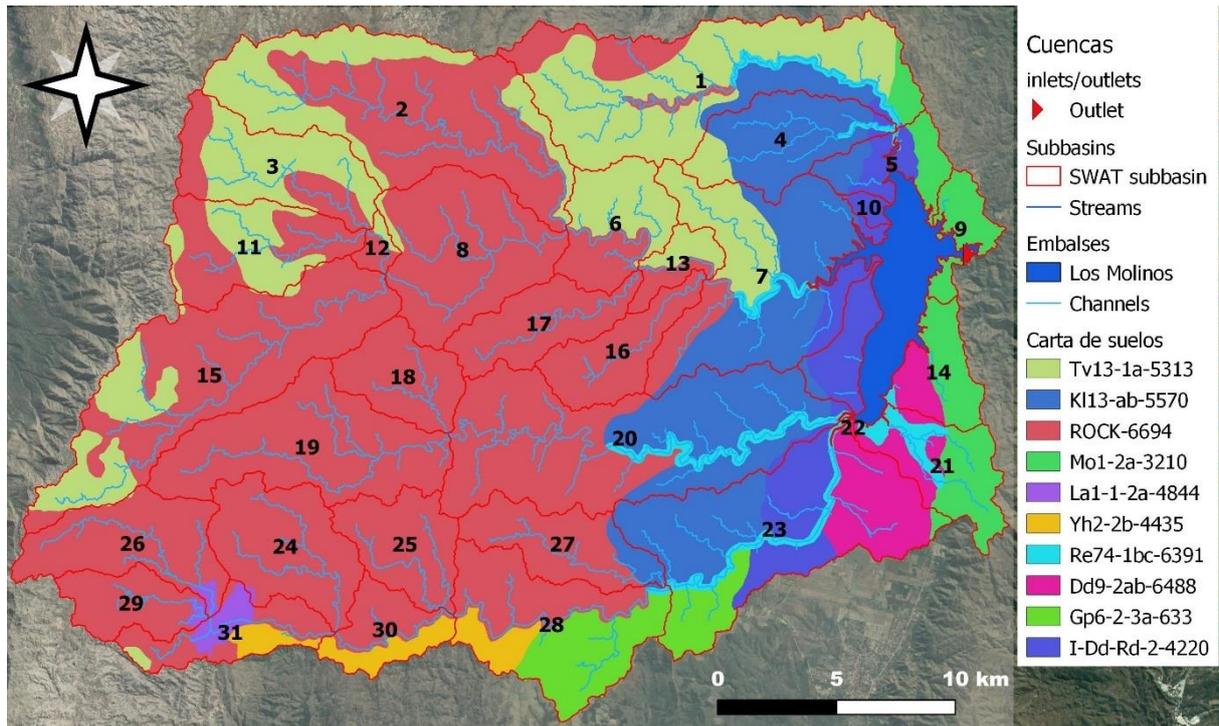


Figura 36 Clasificación de suelos

Tabla 19: Clasificación SWAT de suelos (2018)

ID	Código SWAT	Area (Ha)	Porcentaje (%)
	Tv13-1a-5313	15250.93	16.91
	Re74-1bc-6391	1950.89	2.16
	Kl13-ab-5570	10802.79	11.98
	ROCK-6694	45901.79	50.88
	Mo1-2a-3210	3605.33	4.00
	I-Dd-Rd-2-4220	3660.17	4.06
	Dd9-2ab-6488	2475.35	2.74
	Gp6-2-3a-633	2510.51	2.78
	La1-1-2a-4844	560.18	0.62
	Yh2-2b-4435	1322.06	1.47

Superponiendo las capas de uso y/o cobertura, tipo de suelos y distribución de las clases de pendiente, se han definido 5978 unidades de respuesta hidrológica HRUs en la cuenca (ver fig. 37).

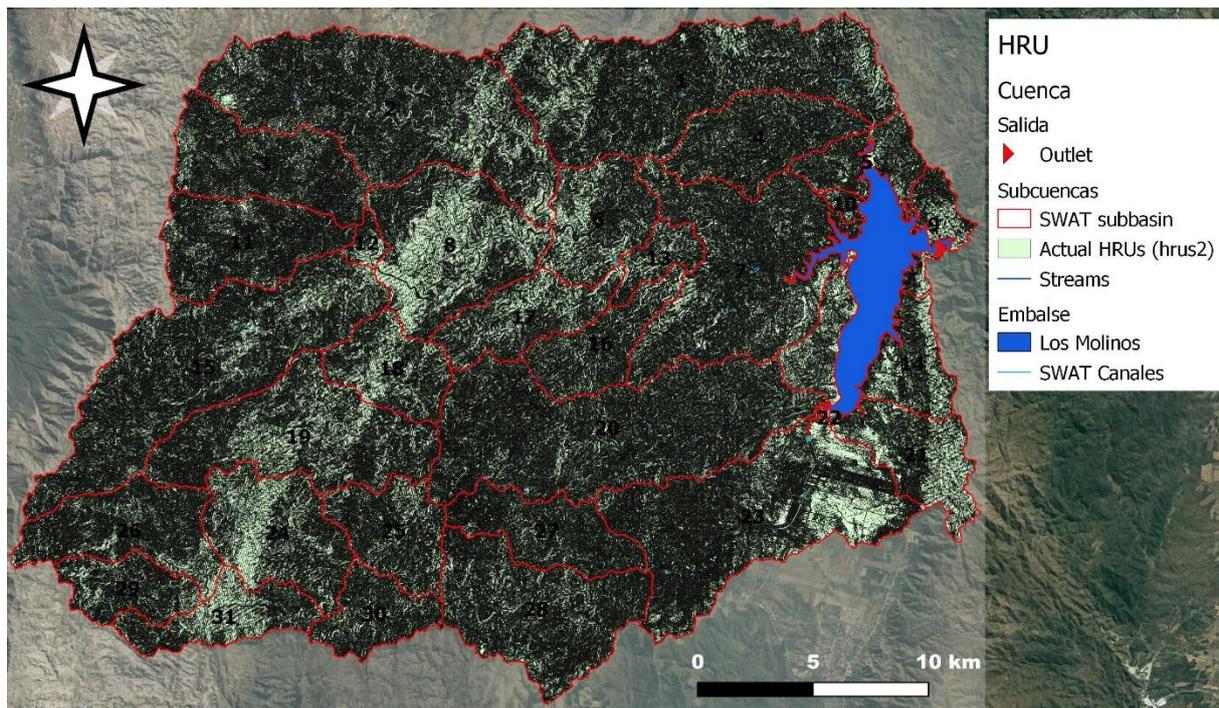


Figura 37 Unidades de respuesta hidrológica (HRU)

Finalmente, se ha ejecutado para el período 2015-2021, de los cuales los primeros dos (2) años son calculados como condición de borde para estabilizar todos los parámetros de entrada al modelo, principalmente aquellos relacionados con el balance hídrico. En total se han simulado 5 años a partir del año 2017 hasta el 2021.

Los datos de los radios urbanos para efectuar la primera simulación en QSAWT PLUS fueron obtenidos del portal <http://estadistica.cba.gov.ar/> de la Dirección General de Estadísticas y censos correspondientes al año 2008. En el caso de la segunda simulación, los datos de radios urbanos consolidados se obtuvieron de la página web <http://www.ordenamientoterritorialcba.com/> correspondientes al año 2018.

12. RESULTADOS

Los resultados se presentan en planillas comparativas entre los escenarios simulados. Se considera que esta modelación desarrollada es una primera aproximación para ser calibrada y validada en trabajos futuros.

12.1 Control a nivel de Cuenca

En primer lugar y a nivel de cuenca, se presentan de manera sintética y como datos a verificar de manera grosera, los resultados obtenidos del balance hídrico.

Luego de correr los dos modelos, en los que, la única diferencia existente entre ellos fue la carga de las superficies de los radios urbanos correspondientes a los años 2008 y 2018, se obtuvieron los promedios anuales del balance hidrológico, estos fueron calculados a nivel de cuenca y se muestran en las fig. 38 y 39.

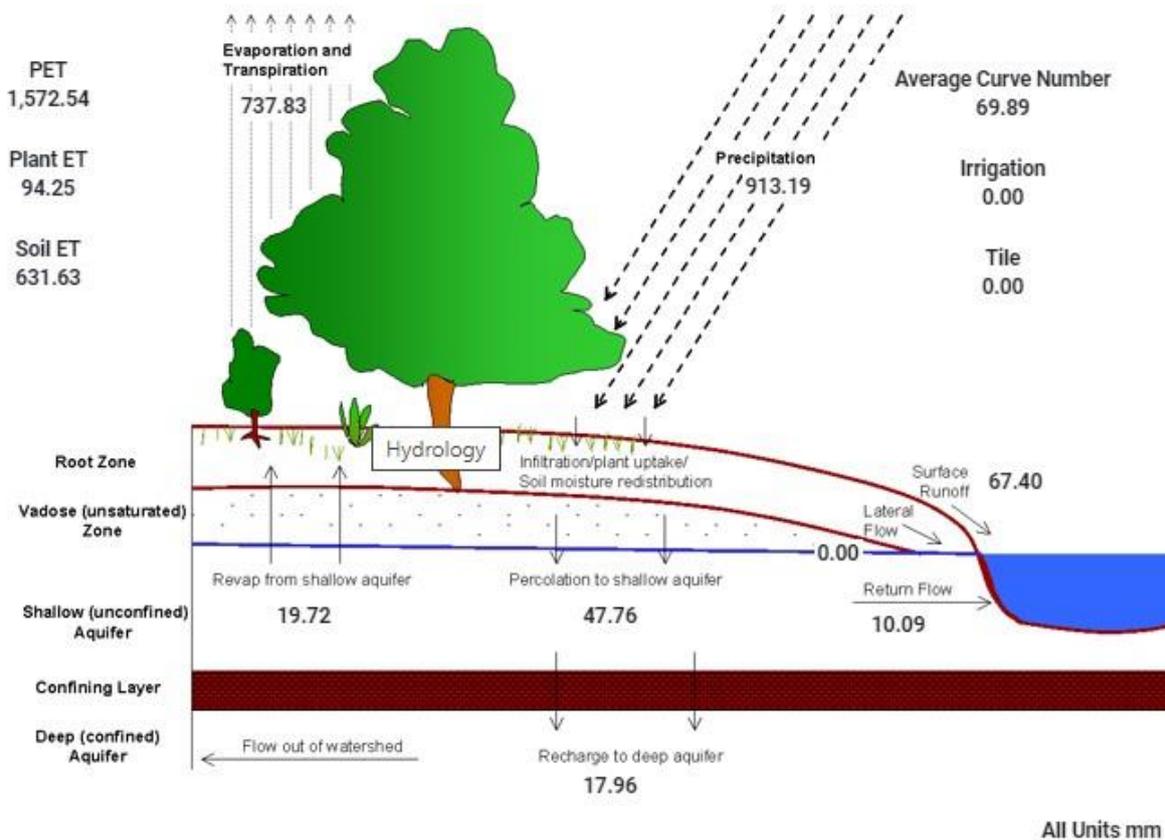


Figura 38 Balance hidrológico año 2008

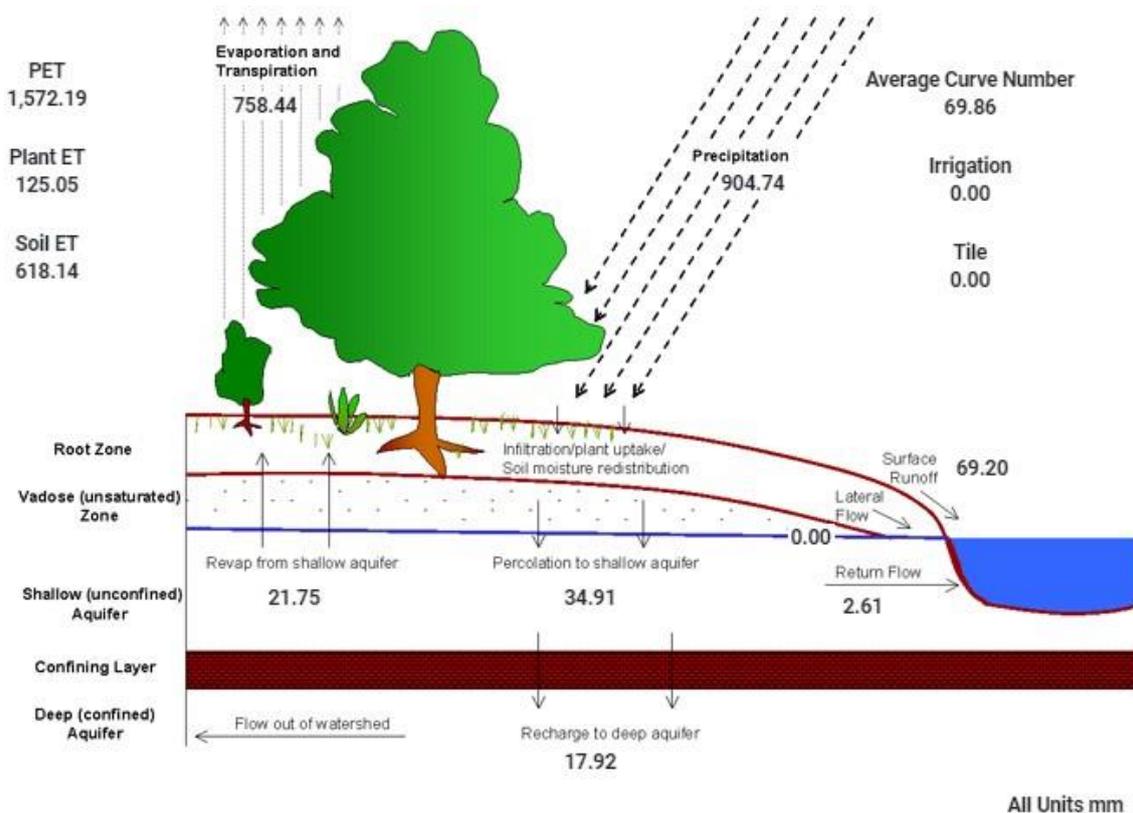


Figura 39 Balance hidrológico año 2018

12.2 Control a nivel de Embalse

El objeto del presente trabajo es obtener la cantidad de nutrientes y detectar los probables generadores que pueden llegar a causar la eutrofización del embalse, es por este motivo que se efectuaron las comparaciones de datos específicos tales como volúmenes de nitrógeno, nitratos, nitritos, fósforo y clorofila presentes en el agua del embalse.

A título informativo y con el objeto evitar errores groseros en la modelación, ya que muestran valores razonables, se presentan los resultados generales del balance hídrico del embalse.

Para comenzar, se presentan los promedios anuales generales de variables hidrológicas y de nutrientes existentes en el agua representados en las fig. 40 y 41. Es necesario resaltar que las mismas son el resultado de las modelaciones efectuadas por QSWAT Plus y representan un promedio anual de la serie de años modelados

(2018-2021). Como condición inicial se tomaron 30700 Hm3 de capacidad del embalse a nivel de vertedero.

En trabajos futuros, se recomienda validar estos resultados alcanzados con mediciones de campo, y antecedentes disponibles en trabajos académicos y/o agencias privadas o gubernamentales. En consecuencia, los resultados no deben ser tomados como concluyentes, sino como base para continuar el análisis en esta línea de trabajo.

Average Trapping Efficiency (%)	
Sediment	-24.64
Nitrogen	60.86
Phosphorus	-65.91
Average Water Loss (%)	
Total Removed + Losses	25.70
Evaporation	2.17
Seepage	0.00
Average Reservoir Trends	
Number of Reservoirs	1.00
Final/Initial Volume (Max)	1.46
Final/Initial Volume (Min)	1.46
Fraction of Period Empty (Max)	0.00

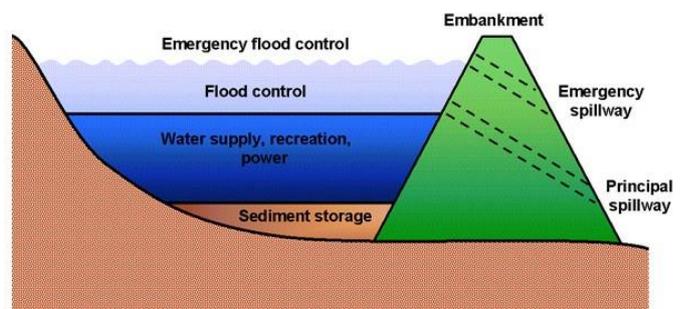


Figura 40 Balance hidrológico y nutrientes para el año 2021 con datos del censo del año 2008

Average Trapping Efficiency (%)	
Sediment	21.05
Nitrogen	74.86
Phosphorus	24.49
Average Water Loss (%)	
Total Removed + Losses	53.17
Evaporation	1.71
Seepage	0.00
Average Reservoir Trends	
Number of Reservoirs	1.00
Final/Initial Volume (Max)	2.68
Final/Initial Volume (Min)	2.68
Fraction of Period Empty (Max)	0.00

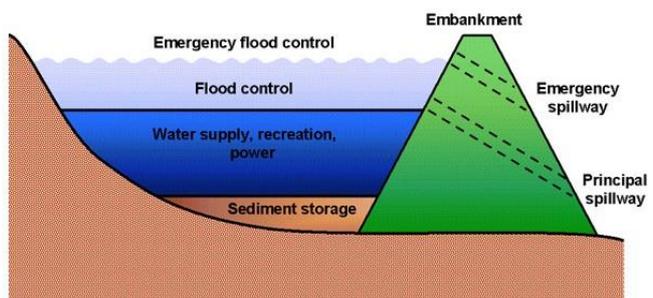


Figura 41 Balance hidrológico y nutrientes para el año 2021 con datos del censo del año 2018

12.2.1 Balance hídrico

Los resultados de los balances hídricos se presentan en porcentajes para destacar la variación entre los escenarios modelados. El modelo desarrollado se adjunta en formato digital en el presente trabajo para consulta de los resultados numéricos obtenidos.

La tabla 20 es una planilla comparativa entre las corridas del modelo para los escenarios simulados con datos del censo poblacional de los años 2008 y 2018, con valores expresados en volúmenes y promedios por año de simulación.

Tabla 20: Balance hídrico con datos del censo del año 2008

Año	Evaporación	Volumen Almacenado	Volumen Ingresado	Volumen Vertido
Date	Default-reservoir_yr-1-evap Ha-m	Default-reservoir_yr-1-flo_stor m3	Default-reservoir_yr-1-flo_in m3	Default-reservoir_yr-1-flo_out m3
2018	5930000.00	252000000.00	120000000.00	40300000.00
2019	6270000.00	251000000.00	115000000.00	117000000.00
2020	6390000.00	252000000.00	98600000.00	98400000.00
2021	4670000.00	250000000.00	161000000.00	166000000.00

Salida del modelo con superficies urbanizadas del año 2008 – Acumulados anuales

Tabla 21: Balance hídrico con datos del censo del año 2018

Año	Evaporación	Volumen Almacenado	Volumen Ingresado	Volumen Vertido
Date	Default-reservoir_yr-1-evap Ha-m	Default-reservoir_yr-1-flo_stor m3	Default-reservoir_yr-1-flo_in m3	Default-reservoir_yr-1-flo_out m3
2018	1910000.00	93300000.00	65700000.00	0.00
2019	3970000.00	190000000.00	96500000.00	0.00
2020	6180000.00	252000000.00	92400000.00	30300000.00
2021	4660000.00	250000000.00	157000000.00	162000000.00

Salida del modelo con superficies urbanizadas del año 2018 – Acumulados anuales

Tabla 22: Balance hídrico – Variación porcentual de escenarios considerando censos 2008 y 2018

Año	Evaporación	Volumen Almacenado	Volumen Ingresado	Volumen Vertido
Date	Default-reservoir_yr-1-evap %	Default-reservoir_yr-1-flo_stor %	Default-reservoir_yr-1-flo_in %	Default-reservoir_yr-1-flo_out %
2018	-67.79%	-62.98%	-45.25%	-100.00%
2019	-36.68%	-24.30%	-16.09%	-100.00%
2020	-3.29%	0.00%	-6.29%	-69.21%
2021	-0.21%	0.00%	-2.48%	-2.41%

Planilla comparativa correspondientes a las corridas de los años 2008 y 2018. Cabe destacar que los valores obtenidos son la sumatoria de los promedios de los volúmenes mensuales evaporados, almacenados, ingresados y vertidos.

12.2.2 Nutrientes

En lo que respecta a los valores por año de simulación de la presencia de nutrientes en el agua del embalse, se muestran discriminados por año en las tablas 23 y 24.

Tabla 23: Nutrientes año 2008

Año	Nitrógeno	Fósforo	NO3	Clorofila	NH3	NO2	Oxígeno Disuelto
Date	Default-reservoir_yr-1-orgn_stor kg	Default-reservoir_yr-1-sedp_stor kg	Default-reservoir_yr-1-no3_stor kg	Default-reservoir_yr-1-chla_stor kg	Default-reservoir_yr-1-nh3_stor kg	Default-reservoir_yr-1-no2_stor kg	Default-reservoir_yr-1-dox_stor Tn
2018	8830.00	2160.00	53700.00	739.00	4.99	0.75	1000.00
2019	7790.00	2630.00	64600.00	855.00	4.93	0.81	1380.00
2020	6460.00	3140.00	63000.00	982.00	4.53	0.74	1690.00
2021	6270.00	3600.00	63200.00	1090.00	4.19	0.62	2220.00

Salida del modelo con superficies urbanizadas del año 2008 – Acumulados anuales

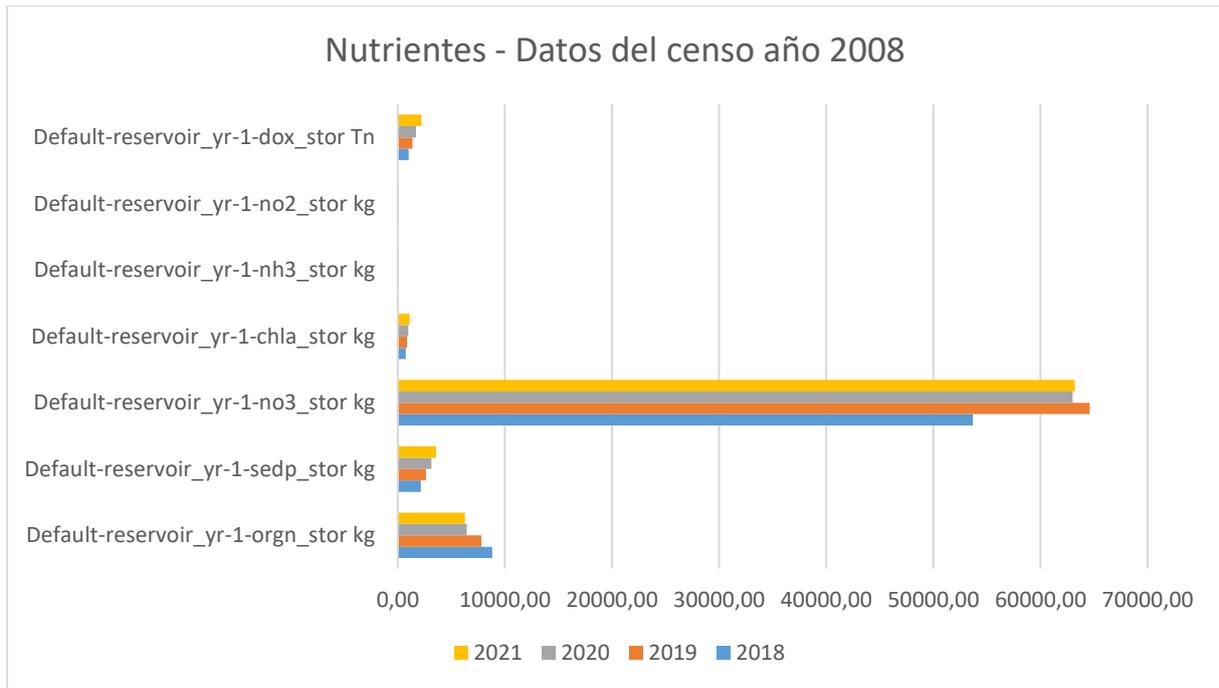


Figura 42 Nutrientes modelación año 2008

Tabla 24: Nutrientes año 2018

Año	Nitrógeno	Fósforo	NO3	Clorofila	NH3	NO2	Oxígeno Disuelto
Date	Default-reservoir_yr-1-orgn_stor kg	Default-reservoir_yr-1-sedp_stor kg	Default-reservoir_yr-1-no3_stor kg	Default-reservoir_yr-1-chla_stor kg	Default-reservoir_yr-1-nh3_stor kg	Default-reservoir_yr-1-no2_stor kg	Default-reservoir_yr-1-dox_stor Tn
2018	7020.00	1410.00	24200.00	434.00	6.01	1.15	299.00
2019	8860.00	2160.00	44300.00	712.00	8.30	1.53	683.00
2020	9250.00	2980.00	57500.00	963.00	9.56	1.74	1010.00
2021	8820.00	3720.00	59900.00	1130.00	8.68	1.45	1600.00

Salida del modelo con superficies urbanizadas del año 2018 – Acumulados anuales

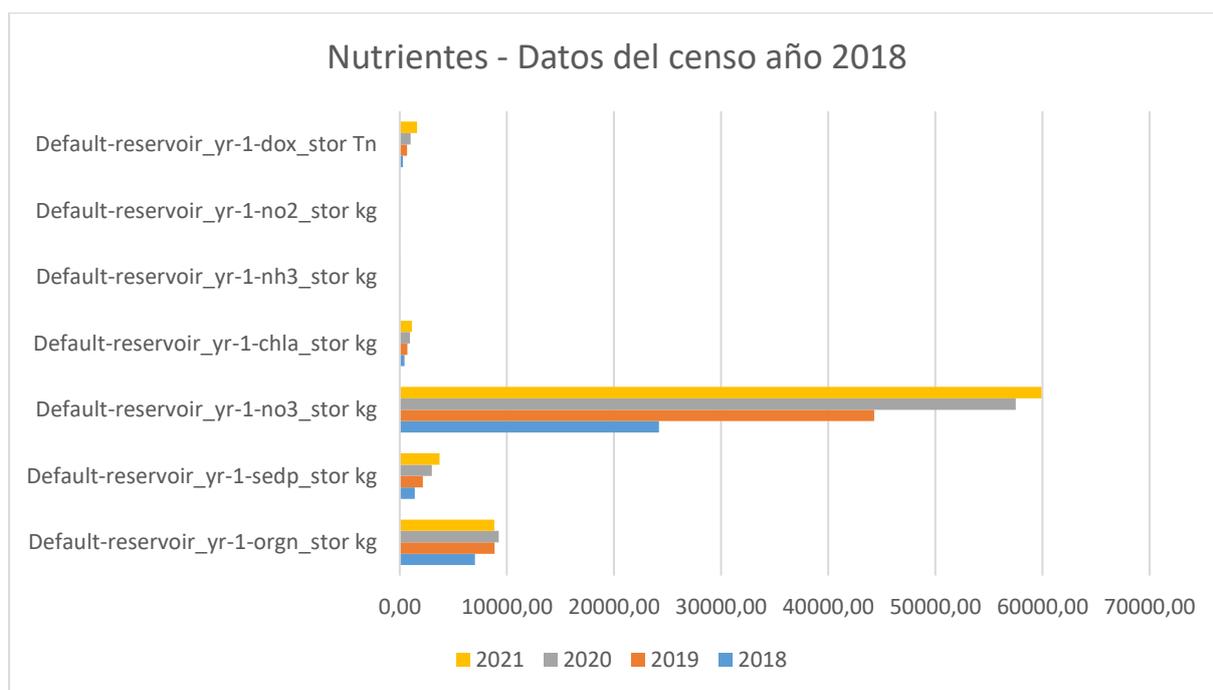


Figura 43 Nutrientes modelación año 2018

Asimismo, se obtuvo un resumen con los promedios anuales de algunos indicadores calculados para el embalse Los Molinos (tabla 25).

Tabla 25: Nutrientes – Porcentajes comparativos entre los escenarios simulados

Año	Nitrógeno	Fósforo	NO3	Clorofila	NH3	NO2	Oxígeno Disuelto
Date	Default-reservoir_yr-1-orgn_stor kg	Default-reservoir_yr-1-sedp_stor kg	Default-reservoir_yr-1-no3_stor kg	Default-reservoir_yr-1-chla_stor kg	Default-reservoir_yr-1-nh3_stor kg	Default-reservoir_yr-1-no2_stor kg	Default-reservoir_yr-1-dox_stor kg
2018	-1810.00	-750.00	-29500.00	-305.00	1.02	0.40	-701000.00
2019	1070.00	-470.00	-20300.00	-143.00	3.37	0.72	-697000.00
2020	2790.00	-160.00	-5500.00	-19.00	5.03	1.01	-680000.00
2021	2550.00	120.00	-3300.00	40.00	4.49	0.83	-620000.00
Porcentajes							
2018	-20.50%	-34.72%	-54.93%	-41.27%	20.44%	52.52%	-70.10%
2019	13.74%	-17.87%	-31.42%	-16.73%	68.36%	89.59%	-50.51%
2020	43.19%	-5.10%	-8.73%	-1.93%	111.04%	136.73%	-40.24%
2021	40.67%	3.33%	-5.22%	3.67%	107.16%	135.39%	-27.93%

Planilla comparativa correspondientes a las corridas de los años 2008 y 2018. – Acumulados anuales.

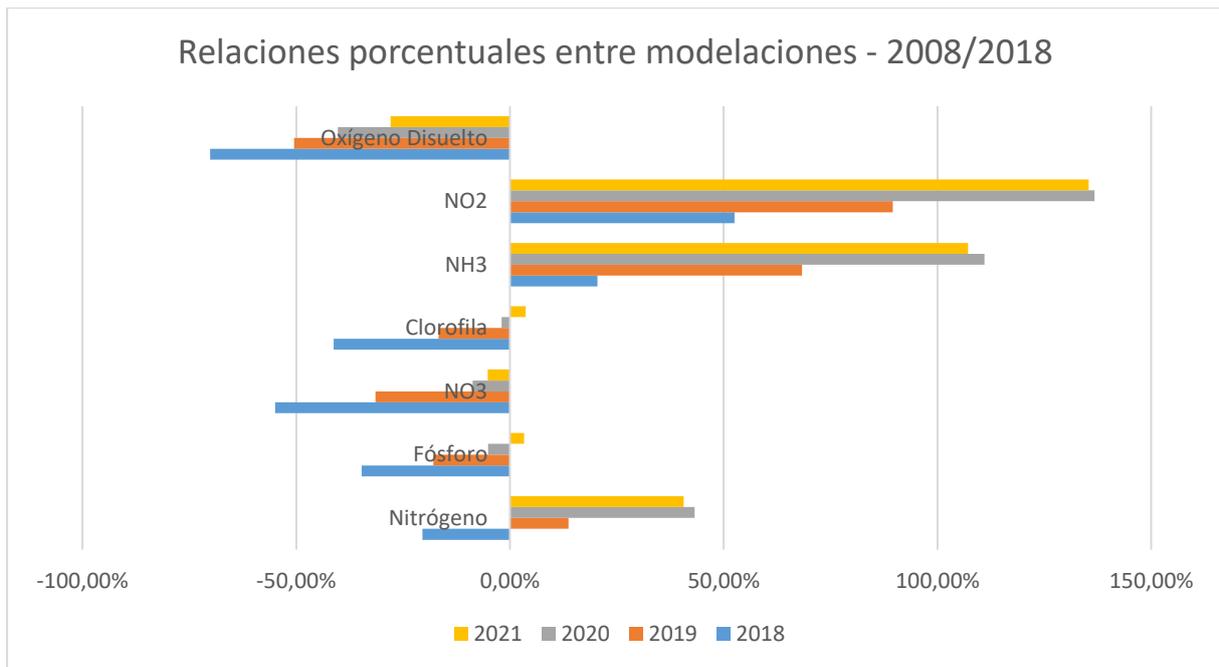


Figura 44 Variaciones porcentuales de nutrientes

13. DIAGNÓSTICO PRESUNTIVO

Para poder realizar el diagnóstico, se buscó independizar los resultados de las unidades y cantidades en las que SWAT los presenta. Con este fin solo se tomaron los promedios de las diferencias de los valores acumulados anuales entre los dos escenarios planteados. Restaría en una instancia posterior, calibrar y validar estos valores obtenidos con estudios y relevamientos de campo.

En virtud de estos resultados, para la serie de años 2018 a 2021, se puede observar una tendencia al incremento de los valores de todas las variables analizadas (fig. 45), según el siguiente detalle:

- Un aumento en los porcentajes de los volúmenes de nitrógeno almacenado en el embalse (-20.50% para el año 2018 a un 40.67% para el año 2021), este elemento produce una reducción del oxígeno disuelto de las aguas superficiales y es uno de los elementos responsables de las floraciones de organismos fotosintéticos (eutrofización).

- Un incremento significativo en el contenido de amonio (20.44% para el año 2018 a un 107.16% para el año 2021). Este compuesto se produce de forma natural por la descomposición de la materia orgánica y a pesar de que en su forma natural es abundante en el ambiente, también puede ser introducido a través del drenaje y los fertilizantes.
- Un crecimiento del oxígeno disuelto almacenado al final de cada período (-70.10% para el año 2018 a un -27.93% para el año 2021).
- Un incremento en el contenido de fósforo almacenado (-34.72% para el año 2018 a un 3.33% para el año 2021).
- Un crecimiento considerable en los volúmenes de nitritos (52.52% para el año 2018 a un 135.39% para el año 2021), la presencia de un exceso de nitritos provoca la contaminación de las aguas a todos los niveles (indicador de contaminación de carácter fecal reciente).

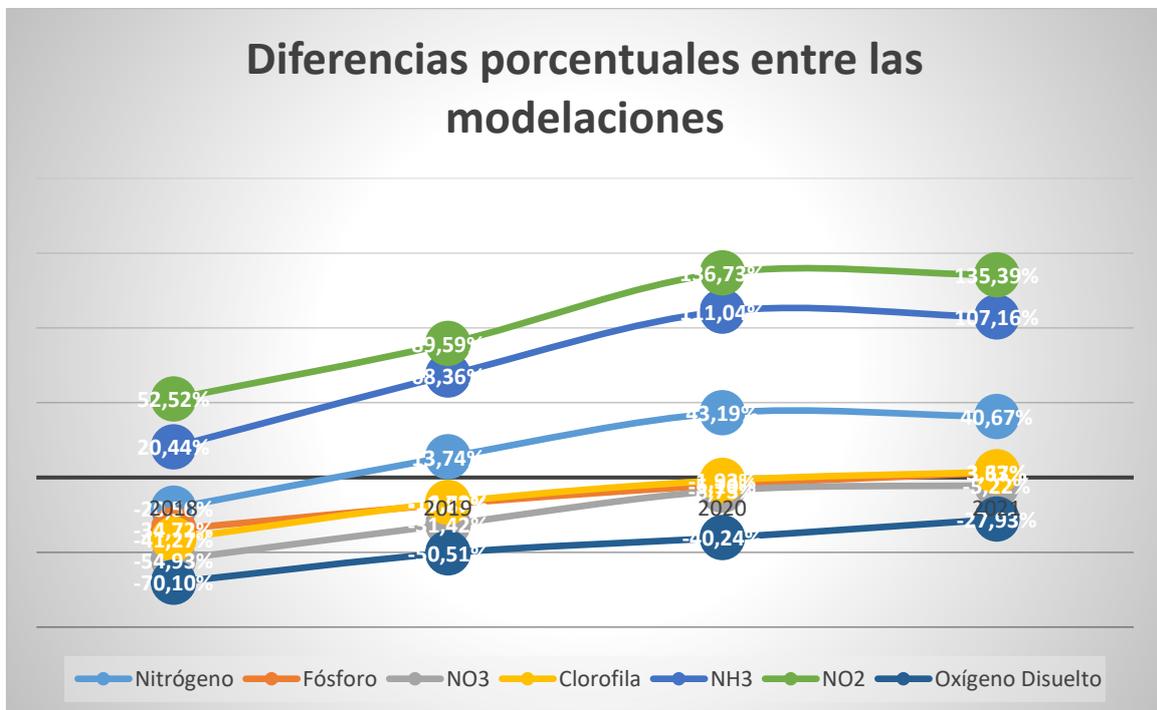


Figura 45 Tendencias de las variaciones porcentuales de nutrientes

En aguas superficiales, bien oxigenadas, el nivel de nitritos no suele superar 0.1 mg/l.

Los nitritos también se forman durante la biodegradación de nitratos, nitrógeno amoniacal u otros compuestos orgánicos nitrogenados y se utiliza como indicador de contaminación fecal en aguas naturales.

Según la carta de suelo del Departamento Santa María, Potrero de Garay tiene un 90% de su territorio con suelos bien drenados, de franco a franco arcilloso en subsuelo y suaves pendientes naturales. Esto hace que Potrero de Garay sea una localidad con altas probabilidades de adaptar el sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial y terrenos de infiltración, y que los mismos funcionen adecuadamente. Como la depuración final del agua residual es en subsuelo, no es adecuado usar este tipo de sistema en las cercanías del embalse o de los ríos que atraviesan la localidad. De lo contrario, se podría aportar un contenido alto de nutrientes y microorganismos al embalse. Siete de los once barrios de Potrero de Garay se ubican en el perilago, lo que hace que solo cuatro barrios podrían optar por el sistema de infiltración (Nadal, 2010).

Teniendo en cuenta que es práctica común en esta zona el uso de sistemas naturales de tratamiento, como son los humedales artificiales de flujo subsuperficial y terrenos de infiltración (campo de percolación) por los que se vuelcan aguas no tratadas, se infiere que el incremento en los valores de nutrientes se relaciona a esta causa, especialmente por la presencia de nitritos, ya que estos son indicadores de contaminación fecal.

Otros trabajos sobre la eutrofización del agua en Los Molinos, atribuyen la carga de nutrientes a la ganadería, por lo que quedaría para una instancia posterior el estudio y la verificación del tipo de bacterias presentes lo que nos daría un indicio acerca de su posible origen.

14. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta la modelación de dos escenarios de simulación realizada con el modelo SWAT, cubriendo el periodo 2017-2021, atendiendo el cambio en las imágenes ráster en el uso del suelo de acuerdo a las áreas ocupadas por los radios urbanos de los años 2008 y 2018.

La superficie de los radios urbanos correspondientes al año 2008 era de 10.11 km² y la del año 2018 de 29.57 km², estos valores representan un incremento del 292.48% en este lapso de tiempo (10 años).

Los resultados de las modelaciones indican una tendencia al aumento de todas las variables contempladas en las modelaciones, siendo el contenido de oxígeno disuelto el único indicador favorable.

En un todo y de acuerdo a los resultados obtenidos, se deduce que estos porcentajes de aumento tienen relación directa con el incremento en la superficie urbanizada.

El modelo numérico simulado se entrega en archivo digital adjunto quedando disponible como herramienta de gestión de los organismos públicos que lo requieran.

Entendiendo que los resultados alcanzados deben ser calibrados y validados con un periodo de datos de campo en trabajos futuros.

Bibliografía

- Aguas subterráneas de la Provincia de Córdoba / Blarasin, Mónica... [et.al.]; compilado por Blarasin, Mónica; Cabrera, Adriana; Matteoda, Edel. - 1a ed. - Río Cuarto: UniRío Editora, 2014. E-Book.
- Mariñelarena, Alejandro, Mac Donagh, María E., Donadelli, Jorge y Casco, María A. (2016). "Un Caso Inusual De Eutrofización En El Embalse Río Tercero: El Posible Rol de dos Bioinvasores"
- Alfaro, M., & Salazar, F. (2005). Ganadería y contaminación difusa, implicancias para el sur de Chile. *Agricultura Técnica*, 65(3), 330-340
- Allen, R. G., L. S. Pereira, M. Smith, D. Raes, and J. L. Wright. 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131: 2-13.
- Nadal, Ana Florencia (2010) "Propuestas de Sistemas de Remediación Sanitaria para Localidades Serranas: Caso Potrero de Garay"
- Andreazzini, M. J., Degiovanni, S. B., Cantú, M. P., Grumelli, M. T., & Schiavo, H. (2013). Análisis e interpretación paleoambiental de secuencias del Cuaternario superior en pampas de altura del sector centro-sur de la Sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*, 20(2), 85-104.
- Aparicio, F. J. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Editorial Limusa.
- Arnold, J. G., & Williams, J. R. (1987). Validation of SWRRB—simulator for water resources in rural basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), 243-256.
- Arnold, J.G., et al. (1998) *Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development 1*. Wiley Online Library, Hoboken.
- Bazán et al., (2005) "Teledetección y modelado numérico para el análisis de la calidad de agua del embalse Los Molinos, Córdoba, Argentina"
- Bazán, R. (2006). "Evaluación de la calidad del agua, nivel de eutrofización y sus consecuencias en el embalse Los Molinos (Córdoba)". Tesis de Maestría en Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Bazán, R.; Corral, M.; Pagot, M.; Rodríguez, A.; Oroná, C.; Rodríguez, M.I.; Larrosa, N.; Cossavella, A.; Del Olmo, S.; Bonfanti, E.; Busso, F. (2005). Teledetección y modelado numérico para el análisis de la calidad de agua del embalse Los Molinos, Córdoba, Argentina. *Ingeniería Hidráulica en México*. Instituto Mexicano Tecnología Agua. Vol.20 N°2. pp. 121 - 135. Ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ISSN 0186-4076. Indexada Latindex 6784.
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R) USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059-6086.
- Berois, N., Arezo, M. J., Chalar, C., Brauer, M. M., & Barros, C. (2007). Ultrastructure and protein composition of the oocyte envelope in the whitemouth croaker (*Micropogonias furnieri*, Desmarest, 1823, Sciaenidae, Perciformes). *Journal of Applied Ichthyology*, 23(1), 34-39.
- Carignano, C., Cioccale, M., & Rabassa, J. (1999). Landscape antiquity of the Central-Eastern Sierras Pampeanas (Argentina): geomorphological evolution since Gondwanic times. *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband*, 245-268.
- Chiogna, Gabriele & Majone, Bruno & Paoli, Karina & Diamantini, Elena & Stella, Elisa & Mallucci, Stefano & Lencioni, Valeria & Zandonai, Fabiana & Bellin, Alberto. (2015). A review of hydrological and chemical stressors in the Adige catchment and its ecological status. *The Science of the total environment*. 343. 10.1016/j.scitotenv.2015.06.149. Sharpley, 1995
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada* (1era ed.). Bogotá: McGRAW-HILL
- Cioccale, M. (1999). La pequeña edad del hielo en la región central de la República Argentina. *Estudios Geográficos*, 60(235), 249-270.

- Corral, M. (2005). "Modelación de procesos de transporte y de calidad del agua en el embalse Los Molinos". Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos Hídricos, F.C.E.F y N, UNC, Córdoba., R.A.
- Cossavella (2001) Carranza, P. M., et al. "Calidad del agua del río Segundo (Xanaes) en relación a la topografía y las actividades antrópicas en la cuenca." (2001).
- Cossavella, A. (2003). "Influencia de efectos antrópicos y naturales en el proceso de eutrofización de las aguas del embalse Los Molinos I". Tesis de Maestría. Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina.
- Craswell, E. T., & Godwin, D. C. (1984). The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals grown in different climates (No. REP-3326. CIMMYT.).
- Moreno Franco, Daniela Paola, Quintero Manzano, Jacqueline y López Cuevas, Armando (2010) "Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia"
- Einstein, H. A., & Shen, H. W. (1964). A study on meandering in straight alluvial channels. *Journal of Geophysical Research*, 69(24), 5239-5247.
- Fernández Bedini, Micaela (2017). Proyecto De Control De Erosión Hídrica- Los Molinos, Córdoba
- Franco, D. P. M., Manzano, J. Q., & Cuevas, A. L. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78, 25-33.
- Fuka, D. R., Walter, M. T., MacAlister, C., Degaetano, A. T., Steenhuis, T. S., & Easton, Z. M. (2014). Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 28(22), 5613-5623.
- Carnicelli, Cossavella, Lubrina, O' Mill, Rodríguez, Roqué (2014) "Programa de monitoreo de calidad de agua del Embalse Los Molinos, Córdoba-Argentina"
- García, I. and Dorransoro, C. 2005. Contaminación por Metales Pesados. En *Tecnología de Suelos*. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. <http://edafologia.ugr.es>.
- Gassman, P., Reyes, M., Green, C., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: historical development, application, and future research directions. *Transaction of the ASABE*, 50(4), 1211-1250. doi:10.13031/2013.23637
- Gordillo, C. y Lencinas, A, 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En Leanza, A.F. (ed.) *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias, 1-39, Córdoba.
- Idal, J. R. H., & Borja, D. B. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water assessment tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del río las juntas. *revista geoespacial*, 12, 106-122.
- Weber, Juan F., Baigorri Ocampo, Santiago (2019). "Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina)"
- King, L. C. (1953). Canons of landscape evolution. *Geological Society of America Bulletin*, 64(7), 721-752.
- Kinnell, Peter. (2005). Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review. *Hydrological Processes*. 19. 2815 - 2844. 10.1002/hyp.5788.
- Langa Sánchez, A.; Pagot, M.; Rodríguez, A.; Martínez Capel, F. (2009). "Estudio de caudales ecológicos en ríos de la provincia de Córdoba". Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. INA-UNSE-IAHR. Salta ISBN 978-987-25153-2-4
- Larrosa, N. (2006). "Identificación de fuentes de contaminación fecal en el embalse Los Molinos. Diferenciación de su origen humano y/o animal". Tesis de Maestría en Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Linsley, Ray, Kohler Max, Paulus Joseph. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Mc Graw-Hill. 2da Edición. México, D.F.

- Löbens, Stefan & Sobel, Edward & Bense, Frithjof & Wemmer, Klaus & Dunkl, István & Siegesmund, Siegfried. (2013). Refined exhumation history of the northern Sierras Pampeanas, Argentina. *Tectonics*. 32. 1-20. 10.1002/tect.20038.
- Luti, R., M. Bertrán de Solís, F. Galera, N. Muller de Ferreira, M. Berzal, M. Nores, M. Herrera y J. Barrera 1979 Vegetación. En *Geografía Física de la Provincia de Córdoba*, editado por J. Vazquez, R. Miatello y M. Roque, pp. 297-368. Editorial Boldt, Buenos Aires.
- M. Bonansea, R. Bazán, M. Pagot, L. Pinotti, C. Ledesma & C. Rodríguez (2014). Utilización De Imágenes Aster y Landsat Para El Monitoreo De La Concentración de Clorofila-A En El Embalse Los Molinos, Córdoba, Argentina
- María I. Rodríguez, Ana Cossavella, Claudia Oroná, Nancy Larrossa, Marcelo Avena, Andrés Rodríguez (2000) "Estudios Preliminares De La Calidad De Agua Y Sedimentos Del Embalse San Roque Relacionados Al Proceso De Eutroficación"
- Rodríguez, María Inés; Cossavella, Ana; Bazán, Raquel; Corral, Mariano; Oviedo, Silvia; Rodríguez, Andrés; Bustamante, María Alejandra; Angelaccio, Carlos Martín; López, Fabián; Busso, Fanny & Bonfanti, Enzo "Efecto De Los Incendios En La Calidad Del Agua De Los Embalses San Roque Y Los Molinos, Córdoba". XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. 9 al 14 de mayo 2005 Mendoza.
- Salas Quispe, Mario Kevin (2019). Estimación de la Carga de Sedimentos en la Cuenca del Río Pitumarca Mediante el Uso del Modelo Swat - Lima, Perú
- Cirerol, Nancy Aranda (2004). "Eutrofización Y Calidad Del Agua De Una Zona Costera Tropical"
- Narváez M., López C., Reinoso I., Minaya V. Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253, Quito, Ecuador "Modelación de nutrientes y evaluación de uso de suelo usando la herramienta de agua y suelo (SWAT), Caso de estudio: Cuenca del Río Coca"
- Picone, Natasha; Linares, Santiago (2014). "Propuesta metodológica para la extracción y análisis de densidades urbanas mediante teledetección y SIG. Caso de estudio: ciudad de Tandil, Argentina"
- Nebel, B. J., & Wright, R. T. (1999). *Ciencias ambientales: ecología y desarrollo sostenible*. Pearson educación.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. R., & Williams, J. R. (2009). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation*. Texas: Grasslan, Soil and Water Research Laboratory, ARS.
- Neitsch, Susan & Arnold, Jeff & Kinry, J.R. & Williams, J.R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation*. Version.
- Nguyen HH, Recknagel F, Meyer W, Frizenschaf J, Shrestha MK. Modelling the impacts of altered management practices, land use and climate changes on the water quality of the Millbrook catchment-reservoir system in South Australia. *J Environ Manage*. 2017 Nov 1;202(Pt 1):1-11. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.07.014. Epub 2017 Jul 14. PMID: 28715676.
- Penck, A. (1924). *Das Antlitz der Alpen*. *Naturwissenschaften*, 12(47), 1000-1007.
- Randall, R.A., Germain, S., Inman, G.J., Bates, P.A., and Hill, C.S. (2002) Different Smad2 partners bind a common hydrophobic pocket in Smad2 via a defined proline-rich motif. *The EMBO journal*. 21(1-2):145-156.
- Reddy, K. R., Khaleel, R., Overcash, M. R., & Westerman, P. W. (1979). A nonpoint source model for land areas receiving animal wastes: I. Mineralization of organic nitrogen. *Transactions of the ASAE*, 22(4), 863-0872.
- Formica, Stella Maris; Sacchi, Gabriela Andrea; Campodonico, Verena Agustina; Pasquini, Andrea Inés y Cioccale, Marcela Alejandra (2015). "Modelado De Calidad De Agua En Ríos De Montaña Con Impacto Antrópico. Caso De Estudio: Sierra Chica De Córdoba, Argentina"
- Tuppad, P., Douglas-Mankin, K., Lee, T., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2011). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/water quality model: extender capability and wider adoption. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 54(5), 1677-1684
- Vázquez, Juan B.; Miatello, R. y Roqué M. (1979): *Geografía Física de la Provincia de Córdoba*. Editorial Boldt, Argentina.

- Vazquez-Amabile, G., et al. (2017). Análisis de agroquímicos y nitratos en cursos y aguas subterránea de cuencas rurales del oeste y sudeste de Buenos Aires. Productividad y medio ambiente, 61.
- Vitor Vieira Vasconcelos, Paulo Pereira Martins Junior, Renato Moreira Hadad (2012). "Caracterização Ambiental Da Bacia Do Rio Paracatu"
- Weber, J. Stehli, P., Jorquera, E. (2013). Modelación matemática del impacto hidrológico de incendios en una cuenca de las sierras de Córdoba. Primer Congreso Iberoamericano de protección, gestión, eficiencia, reciclado y reúso del agua-CIPGER, mayo 2013, Córdoba, Argentina
- Williams, J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resour. Bull., 11(5): 965-974.

Consultas en web

- «Copia archivada». Archivado desde el original el 12 de febrero de 2017. Consultado el 11 de febrero de 2017.
- http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/6083/ingenieriapresasescollera.pdf
- <http://www.diquesdecordoba.com.ar/ubicaciones/>
- «El complejo Los Molinos». EPEC, Empresa Provincial de Energía de Córdoba.
- <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/abusos-y-apropiaciones-en-los-lagos-y-rios-de-todos>
- <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/concesion-vencida-conexiones-peligrosas-y-otras-irregularidades>
- <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/riesgo-flotante-en-el-lago-los-molinos>
- «Copia archivada». Archivado desde el original el 12 de febrero de 2017. Consultado el 11 de febrero de 2017.
- http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/el-lago-los-molinos-cada-vez-mas-cerca-del-san-roque#!#cxrecs_s
- <https://www.ina.gov.ar/legacy/pdf/Cirsa-Limnologia-27%20Fitoplanctonica%20y%20los%20molinos.pdf>
- <https://www.ina.gov.ar/legacy/pdf/Cirsa-Limnologia-13%20SAN%20ROQUE%20Y%20LOS%20MOLINOS.pdf>
- <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/viewFile/8892/9730>
- <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/jose-de-la-quintana-un-lugar-para-desconectarse>
- Wikimedia Commons alberga una categoría multimedia sobre Dique Los Molinos.
- Sitio del Organismo Regulador de Seguridad de Presas
- CordobaGlobal.com.ar
- Hidrografía de Córdoba para ver en Google Earth
- <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>
- Sereno, 1997
- <https://datosestadistica.cba.gov.ar/dataset/localidad-potrero-de-garay-mapas-y-capas>
- Mapas Córdoba
- Ordenamiento territorial
- <https://portal-aprhi.opendata.arcgis.com/pages/sigrh-sihm>
- PIHC - SIGRH SIHM
- <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae>
- <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae>
- <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- <https://sgainacirsa.ddns.net/cirsa/mapas/pmpd.xhtml>
- <https://estrucplan.com.ar/programa-de-monitoreo-de-calidad-de-agua-del-embalse-los-molinos-cordoba-argentina/>
- https://www.citypopulation.de/php/argentina-cordoba_s.php?cityid=14147230
- <https://www.municipalidad-argentina.com.ar/municipalidad-potrero-de-garay.html>
- <http://www.ciisa.inv.efn.uncor.edu>
- <https://earthdata.nasa.gov/>
- <https://www.usgs.gov/labs/spec-lab>
- <https://newmagya.omixom.com/>
- <http://siga2.inta.gob.ar/#/>
- <https://snop-ppo.obraspublicas.gob.ar/Municipalities/Details/3a03c42c-8c4a-4d5e-85c3-e7db3fc28fed>

15. ANEXOS

15.1 ANEXO I



INFORME DE MONITOREO EMBALSE LOS MOLINOS

MUESTREO 16/11/17

En el embalse se realizaron mediciones en 8 sitios de muestreo (centro, presa, desembocaduras de los ríos Los Espinillos, San Pedro, confluencia de los ríos Los Reartes y del Medio, en zona de playa Solar del Lago y en los sectores de tomas de agua de Potrero de Garay sobre Los Espinillos y San Pedro). Se informan datos de oxígeno disuelto; transparencia; temperatura; pH y conductividad. Se detallan observaciones de campo, y recomendaciones de acuerdo al cianosemáforo establecido en las directrices sanitarias para el uso seguro de aguas recreativas*.

OBSERVACIONES:

La concentración de oxígeno disuelto en el centro del embalse supera el nivel de saturación hasta los 5 m de profundidad, con un valor a nivel sub-superficial de 9,3 mg/L y disminuye paulatinamente hasta 6,1 mg/L en el fondo. En la zona de la presa la columna de agua se halla sobresaturada hasta los 10 m y disminuye abruptamente a los 15 m. A nivel subsuperficial se registra un valor de 8,87 mg/L y en el fondo de 2,8 mg/L. Las zonas de las desembocaduras a nivel subsuperficial registran valores entre 7,6 y 8,8 mg/L. En el área de la desembocadura de Los Espinillos se registra en el fondo una concentración de 3,19 mg/L. Las tomas de agua a nivel subsuperficial en San Pedro y Los Espinillos tienen valores de 10,8 mg/L y 8,8 mg/L, respectivamente. El sector de playa Solar del Lago registra una concentración de 9,74 mg/L.

La transparencia en el centro del embalse es de 0,5 m y en la presa de 1,6 m. En las desembocaduras: Los Reartes 2,75 m, Los Espinillos 1 m y San Pedro 0,5 m. En el centro, la temperatura del agua disminuye paulatinamente desde la superficie (21,4 °C) hasta el fondo (18,3 °C). En la presa el valor subsuperficial es de 22,5 °C y en el fondo de 16,9 °C. En la desembocadura del río Los Espinillos el valor subsuperficial es de 21,9 °C y en el fondo de 18 °C. Las desembocaduras de los ríos Los Reartes y San Pedro registran una temperatura promedio en toda la columna de agua de 18,7 °C y 21 °C, respectivamente. En los sectores de las tomas de agua a nivel subsuperficial en San Pedro y Los Espinillos, tienen una temperatura de 24,4 °C y 23,8 °C, respectivamente. El sector de playa Solar del Lago a nivel subsuperficial tiene una temperatura de 23,5 °C.

El pH en el centro, desembocadura de Los Espinillos y

presa tiene un valor promedio a nivel subsuperficial de 9,3 y



en el fondo de 8,6. El sector de la desembocadura de Los Reartes posee un valor promedio 8. En el sector de la desembocadura del San Pedro, playa Solar del Lago y tomas de agua varía entre 9,4 y 9,8.

La conductividad

media en el embalse es de 133 µS/cm. La coloración del agua es verde intensa con una masa espesa de cianobacterias, a excepción de la desembocadura de Los Reartes y toma ubicada en Los Espinillos (se observan acúmulos finos en suspensión). En la zona del club APYCAC se observan manchas verdeazules y olor putrefacto.

La cota del embalse es de 47,9 m; 5,1 m por debajo del nivel de vertedero.

INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

Se observa una disminución en el nivel del embalse. Las mediciones de temperatura del agua indican que el embalse se halla en mezcla. La presencia de hipoxia en los sectores de presa y desembocadura Los Espinillos es resultado de los procesos de descomposición bacteriana de la abundante biomasa de cianobacterias. El pH mayor a 9 y la sobresaturación de oxígeno muestra una intensa actividad fotosintética de las microalgas.

La transparencia del agua es inferior al valor medio del embalse (1,5 m), siendo el origen de la turbidez la presencia de cianobacterias. La masa espesa verde y en acúmulos, se asocia a la presencia de cianobacterias (*Microcystis aeruginosa*, potencialmente tóxicas). En algunas zonas se observa la de declinación o senescencia que se manifiesta por la presencia de olores, espumas y coloración verdeazulada debida a los pigmentos (ficocianinas) propias de cianobacterias liberadas cuando éstas mueren y hay ruptura de sus células. Las condiciones meteorológicas calma, y altas temperaturas, combinada con una baja en los niveles de caudales propios de la época y la concentración de nutrientes indujeron a la floración de cianobacterias observada.

De acuerdo a las observaciones de campo y percepción visual registradas en el día del monitoreo el riesgo asociado para uso recreativo es **alto**.

Laboratorio de Microbiología y Biotecnología -Box 209. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. UNC
Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, X5016GCA

Teléfono: 0351-4333078 | <http://www.portal.efn.uncor.edu/>

15.2 ANEXO II

Decreto 847/16 - Estándares de calidad para vertido de los efluentes líquidos

Podex Ejecutivo
Córdoba

ANEXO I: Estándares de calidad para vertido de los efluentes líquidos.

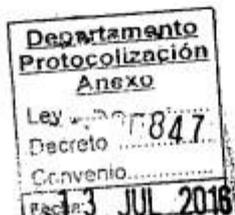
1. Efluentes líquidos vertidos a CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES

Estándares Físicos

Estándares	Unidades	Valor máximo permitido
Temperatura	°C	≤ 40
pH	UpH	6 a 9
Sólidos sedim. 10 min	ml/L	≤ 0,5
Sólidos sedim. 2 hs	ml/L	≤ 1
Sólidos suspendidos	mg/L	≤ 40

Estándares Químicos

Estándares	Unidades	Valor máximo permitido
Aluminio	mg/L	≤ 5
Arsénico	mg/L	≤ 0,5
Bario	mg/L	≤ 2
Boro	mg/L	≤ 2
Cadmio	mg/L	≤ 0,1
Cianuros	mg/L	≤ 0,1
Cobalto	mg/L	≤ 2
Cobre	mg/L	≤ 0,1
Compuestos fenólicos	mg/L	≤ 0,05
Cromo hexavalente	mg/L	≤ 0,1
Cromo total	mg/L	≤ 1
Cloro residual	mg/L	≤ 0,1
Demanda de Cloro	mg/L	satisfecha
Detergentes	mg/L	≤ 1- 0,5 (*)
Estaño	mg/L	≤ 4
Fósforo Total	mg/L	≤ 10 - 0,5 (*)
Fluoruros	mg/L	≤ 1,5
Hidrocarburos	mg/L	≤ 10
Hierro	mg/L	≤ 1
Manganeso	mg/L	≤ 0,5
Mercurio	mg/L	≤ 0,005
Níquel	mg/L	≤ 2
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₄)	mg/L	≤ 3



Ing. EDGAR MANUEL CASTELLO
Secretario de Recursos
Hídricos y Coordinación
Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos

Nitrito	mg/L	≤ 0,3
Nitrato	mg/L	≤ 10
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	≤ 20 - 10 (*)
Plata	mg/L	≤ 0,001
Plomo	mg/L	≤ 0,5
Selenio	mg/L	≤ 0,1
Sodio	mg/L	≤ 250
Sulfuros	mg/L	≤ 1
Sulfatos	mg/L	≤ 500
Sustancias solubles en éter etílico	mg/L	≤ 20
Zinc	mg/L	≤ 2

Estándares Biológicos y Orgánicos

Estándares	Unidades	Valor máximo permitido
DBO ₅	mg/L	≤ 40 o 30 (*)
DQO	mg/L	≤ 250
Coliformes Totales	NMP/100 mL	5000
Coliformes Termotolerantes (**)	NMP/100 mL	1000

Plaguicidas

Estándares	Unidades	Valor máximo permitido
Plaguicidas organoclorados	mg/L	Ausencia
Plaguicida organofosforados	mg/L	≤ 0,1
Plaguicida total	mg/L	≤ 0,1

(*) Para lagos, embalses o lagunas y ríos o arroyos tributarios a estos cuerpos de agua.

(**) Para vertidos en cuerpo de agua de contacto directo deberá además analizarse *Escherichia coli*.

2. OBSERVACIONES PARA CURSOS DE AGUA SUPERFICIALES:

Temperatura: a 50 metros del punto de descarga el incremento de temperatura del cuerpo del agua no debe superar los 3°C.

Sólidos sedimentables en 2 hs: Se exigirá su eliminación cuando sea aconsejable por las características o por el estado higiénico del curso de agua receptor del