

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

Tesis de Maestría

Maestría en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas

**INFLUENCIAS HIDROGEOMORFOLÓGICAS DE PRÁCTICAS
AGROPECUARIAS RECIENTES EN LA CUENCA DEL RÍO
GUAYQUIRARÓ (NORESTE DE ARGENTINA)**

Influences of new agricultural practices on the hydrogeomorphology of the Guayquiraró River watershed (Northeast of Argentina)

Tesista : BSc. Félix Riopel
felix.riopel@gmail.com

Director: Dr. Carlos Guillermo Ramonell

Co-Director: Ing. Pablo Daniel Spalletti



Foto cortesía de Luís Prevedel.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de figuras	5
Índice de tablas.....	10
Símbolos y abreviaciones frecuentes.....	11
Resumen.....	13
Abstract	14
Capítulo 1. Introducción y aspectos generales.....	16
1.1. Problemática de investigación	16
1.2. Área de estudio.....	18
1.3. Antecedentes de conocimiento	19
1.4. Objetivos e hipótesis	24
1.5. Alcances y límites de la tesis.....	25
1.6. Marcos conceptuales	25
1.6.1. Geomorfología, geomorfología fluvial e hidrogeomorfología.....	25
1.6.2. Ecosistema	26
1.6.3. Cuenca hidrográfica	26
1.6.4. Humedales.....	26
1.6.5. Territorio.....	27
1.6.6. Prácticas agropecuarias	27
1.6.7. Manejo integral de cuencas hidrográficas	27
1.7. Materiales	27
1.8. Métodos	29
Capítulo 2. Geografía regional	32
2.1. Geología, geomorfología y relieve	32
2.2. Clima.....	36
2.3. Hidrografía.....	37
2.4. Suelos	39
2.5. Vegetación.....	40
2.6. Demografía y socioeconomía.....	43
Capítulo 3. Caracterización hidrográfica, hidrológica e hidrogeomorfológica.....	45
3.1. Caracterización hidrográfica e hidrológica	45
3.1.1. Aspectos metodológicos.....	45
3.1.2. Topografía.....	47
3.1.3. Sistemas hidrográficos (SH)	52
3.1.4. Morfometría y jerarquía	54
3.1.5. Historial de las precipitaciones y de los caudales líquidos	56
3.2. Caracterización hidrogeomorfológica.....	62

3.3.1. Aspectos metodológicos.....	62
3.3.2. Unidades geomorfológicas.....	66
3.3.3. Funcionamiento hidrogeomorfológico	76
3.3.4. Migración lateral de los grandes cauces.....	89
3.3. Discusiones	95
3.3.1. Contexto fisiográfico y estructura hidrográfica.....	95
3.3.2. Dinámica hidrológica.....	97
3.3.3. Tendencias en la hidrogeomorfología.....	99
Capítulo 4. Las prácticas agropecuarias en el territorio de la cuenca.....	101
4.1. Evolución histórica y situación actual.....	101
4.1.1. Prácticas agropecuarias antiguas y tradicionales	101
4.1.2. Cambios recientes en las prácticas agropecuarias y transformaciones territoriales.....	103
4.1.3. Actividad agropecuaria actual	104
4.1.4. Modelo de producción arroceras.....	106
4.2. Coberturas terrestres, infraestructuras agropecuarias y manejos ingenieriles fluviales	110
4.2.1. Aspectos metodológicos.....	110
4.2.2. Límites metodológicos	115
4.2.3. Cambios en las coberturas terrestres	116
4.2.4. Represas arroceras.....	123
4.2.5. Embalses ganaderos (tajamares).....	125
4.2.6. Canalizaciones y terraplenes.....	125
4.2.7. Obras ingenieriles fluviales	130
4.3. Discusiones	133
Capítulo 5. Análisis del impacto de las prácticas agropecuarias recientes en las variables hidrológicas y geomorfológicas.....	135
5.1. Introducción.....	135
5.2. Aspectos metodológicos.....	136
5.2.1. Delimitación de la cuenca y de las subcuencas.....	136
5.2.2. Pendientes, suelos y coberturas terrestres.....	138
5.2.3. Unidades de respuesta hidrológica (HRU)	140
5.2.4. Datos meteorológicos	141
5.2.5. Ajustes suplementarios.....	142
5.2.6. Calibración y validación del modelo.....	142
5.2.7. Planteo de los escenarios.....	145
5.2.8. Límites metodológicos	145
5.3. Resultados.....	147

5.3.1. Balances hídricos	147
5.3.2. Hidrogramas y curva de duración de caudales	148
5.3.3. Producción de agua por subcuenca	154
5.3.4. Análisis comparativo a escala de subcuenca: naciente del Guayquiraró y arroyo Capivarí 157	
Capítulo 6. Discusión sobre las prácticas agropecuarias recientes y su vínculo con la hidrogeomorfología de la cuenca	163
6.1. Introducción	163
6.2. Efectos de las canalizaciones y terraplenes	163
6.3. Efectos de los embalses ganaderos (tajamares)	164
6.4. Efectos de las obras ingenieriles fluviales	164
6.5. Efectos de los cambios en las coberturas terrestres.....	166
6.6. Efectos de las represas arroceras.....	168
Capítulo 7. Propuestas para el manejo integral de cuenca hidrográfica	171
7.1. Contexto socioambiental	171
7.2. Mecanismos de gestión provincial actuales relativos a la hidrogeomorfología	173
7.3. Ejes del manejo	175
7.3.1. Manejo de las represas arroceras	175
7.3.2. Manejos fluviales.....	176
7.3.3. Ordenamiento territorial y fomento de la conservación	181
7.4. Propuestas de manejo.....	182
Capítulo 8. Conclusiones.....	184
Agradecimientos	188
Bibliografía	189
Participaciones en congreso relacionadas con la investigación de esta tesis.	199
ANEXO I	200
Proceso de delimitación de la cuenca y de los SH	200
ANEXO II	201
Procesamiento de los datos históricos meteorológicos e hidrológicos.....	201
ANEXO III.....	204
Compilación de datos de producción agropecuaria a escala departamental entre los años 2008 y 2021.....	204
ANEXO IV.	207
Detalles metodológicos para los mapeos de coberturas terrestres y los sondeos de infraestructuras agropecuarias.	207
ANEXO V	218
Parámetros suplementarios y calibrados para el modelo SWAT	218
ANEXO VI	225

Hidrogramas modelados completos	225
ANEXO VII	232
Foto aérea del arroyo Capivara y del río Guayquiraró (naciente)	232

Índice de figuras

Figura 1. Localización de la cuenca de estudio.	18
Figura 2. Estructura general de la tesis y métodos utilizados.	31
Figura 3. Relieve regional. Distorsión vertical 40x.	34
Figura 4. Mapas climáticos de las provincias de Corrientes y Entre Ríos. Precipitación media anual en Corrientes (mm), serie 1996-2006 (A). Temperatura media anual en Corrientes (°C), series 1996-2006 (B). Precipitación media anual en Entre Ríos (mm), serie 1971-2000 (C). Temperatura media anual en Corrientes (°C), series 1971-2000 (D). Adaptación de Panigatti et al. (2008) y Cruzate y Panigatti (2008).	36
Figura 5. Cuencas hidrográficas y ríos principales en la región sur de Corrientes y norte de Entre Ríos.	37
Figura 6. Perfil transversal con tipos de vegetación en el relieve de valles del sur de Corrientes y norte de Entre Ríos, según toponimia de varios autores.	41
Figura 7. Plano tipo de ambientes físicos y vegetación en la depresión del Sarandí-Barrancas, centro sur de Corrientes, según toponimia de varios autores.	42
Figura 8. Situación demográfica en la cuenca del río Guayquiraró y sus cercanías según el censo nacional de la República Argentina de 2010 (INDEC Argentina, 2010).	43
Figura 9. Segmentaciones ad hoc del río Guayquiraró y del arroyo Barrancas.	46
Figura 10. Topografía de la cuenca del río Guayquiraró. A) Modelo Digital de Terreno (MDT) adaptado del MDE-Ar v2.0 del IGN para la cuenca del río Guayquiraró. B) MDT específico a la DSB. C) Pendientes en la cuenca calculadas a partir del MDT divididas en 4 categorías discretas.	48
Figura 11. Ubicación en planta de los perfiles topográficos de las Figuras 12 y 13.	49
Figura 12. Perfiles topográficos transversales sobre el Modelo Digital de Terreno (MDT). Los perfiles están exagerados verticalmente. Se consigna en ellos información geomorfológica propia de la sección 3.2.	50
Figura 13. Perfiles topográficos longitudinales sobre el Modelo Digital de Terreno (MDT). Los perfiles están exagerados verticalmente. Se consigna en ellos información geomorfológica propia de la sección 3.2.	51
Figura 14. Mapa hidrográfico de la cuenca del río Guayquiraró	53
Figura 15. Jerarquía de la red hidrográfica según el sistema de Strahler (a partir de cauces de orden 3 en el RVCE y de orden 1 en el MAAP).	54
Figura 16. Hietogramas a escala anual (1980-2019); cuenca entera del río Guayquiraró (arriba), subcuenca de Paso Juncue (Guayquiraró superior) (centro), subcuenca de Paso la Llana (Barrancas-Sarandí-Ávalos) (abajo). Las líneas punteadas son los promedios de precipitaciones anuales. Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.).....	57
Figura 17. Hietograma mensual de la subcuenca Paso la Llana (arriba) e hidrograma mensual promedio en Paso la Llana (abajo). Faltan registros de los meses de septiembre 1980, agosto 1983, enero y febrero 1985, diciembre 1992 y de octubre y noviembre de 2013. Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.).....	58
Figura 18. Hietograma mensual del SH del Guayquiraró superior (arriba) e hidrograma mensual promedio en Paso Juncue (abajo). Faltan registros de los meses de junio, julio y agosto 1990, desde enero hasta mayo 1993, enero hasta abril 2000, agosto 2000, y abril 2008 hasta julio 2009. Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.).....	59

Figura 19. Hidro-hietograma mensual medio en Paso Juncue (Guayquiraró) y Paso la Llana (Barrancas). Datos del 1980-2019 (precipitaciones), 1975-2012 (caudales Juncue) y 1975-2013 (caudales Llana). Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.).....	61
Figura 20. Hidrogramas promedios mensuales normalizados en Paso Juncue (naranja) y Paso La Llana (rojo). Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.).....	61
Figura 21. Ubicación y descripciones de los tramos analizados. LV= longitud del valle, P= pendiente del valle, AA= límite aguas arriba, AB= límite aguas abajo.	64
Figura 22. Unidades geomorfológicas y regiones fisiográficas en la cuenca del río Guayquiraró (hidrografía de base: IGN).	66
Figura 23. Paisaje típico de los valles fluviales en el este de la cuenca del Guayquiraró, aproximadamente 15 km al sur de Cazadores Correntinos (arriba). Pequeña cañada a 1 km al este de la localidad de San Víctor (abajo).	69
Figura 24. Divisora plana, 13 km sobre la ruta 77 al norte del paraje La Paloma, departamento Curuzú Cuatiá, Corrientes.	70
Figura 25. Humedal resultante del accionar de hormigas en una divisora plana, cerca de la ruta 25, departamento Curuzú Cuatiá, Corrientes.	70
Figura 26. Planicie de inundación del río Guayquiraró superior, visto desde el puente entre San José de Feliciano y Sauce. Se aprecia al fondo un pantano tras-albardón constituido por un pajonal muy homogéneo y adelante, bosques ribereños sobre el albardón actual del cauce y un surco de erosión retrocedente.	72
Figura 27. Blanquizal cercano a la unión de los arroyos Capivarí y Guayquiraró. En la foto se observa un huevo de ñandú en centro inferior y atrás, un gran hormiguero.	73
Figura 28. La subcuenca del arroyo Saturno, entre el RVCE al este, el Guayquiraró medio al sur y el Barrancas al norte y al oeste, es parte de la unidad de las planicies fluviales antiguas. Allí, no hay aporte desde los abanicos aluviales, sino que el agua llega solamente a partir de las precipitaciones y algunas laderas cortas del talud que vincula el RVCE y el MAAP. Imagen Landsat 8TM del 27/01/2015.	74
Figura 29. Abanico aluvial del arroyo Ávalos, en una crecida importante. Imagen Landsat 5TM del 02/02/1988.	75
Figura 30. Un cauce de orden 1 parte de la subcuenca del arroyo Capivarí, aproximadamente 15 km al sur de Cazadores Correntinos. La presencia de árboles es característica de los cauces en la cuenca alta, pero no sistemática.	76
Figura 31. Arroyo Fortuna: cauce de orden 2 en la subcuenca del arroyo Chañar, Departamento Feliciano, Entre Ríos. Se evidencia la discontinuidad del canal por unos metros y, en primer plano, montículos de suelo en el canal resultados de procesos erosivos.	77
Figura 32. Arroyo San Víctor: cauce de orden 3, aproximadamente 5 km al oeste de la localidad de San Víctor. Tanto el lecho del arroyo como su valle están constituidos por limos y concreciones calcáreas que se transportan como gravas una vez erosionadas de las formaciones geológicas que las contienen.	78
Figura 33. El río Guayquiraró en su nacimiento (cauce de orden 3), departamento Curuzú Cuatiá, Corrientes. Se evidencian las márgenes severamente erosionadas y, en segundo plano, la obstrucción del canal por ramas.	79
Figura 34. El río Guayquiraró superior (cauce de orden 4), a la altura del puente entre San José de Feliciano, Entre Ríos, y Sauce, Corrientes. Se destacan las márgenes desnudas, la presencia de un bosque denso sobre el albardón del río y una cárcava de erosión retrocedente. La planicie y las márgenes son constituidas de limo arcilloso (esquina inferior derecha).	80
Figura 35. El río Guayquiraró superior en estiaje (cauce de orden 4). En las cercanías del paraje Las Mulas, Departamento Feliciano, Entre Ríos. Cortesía de Luis Prevedel, ANP Don Sebastián.	81
Figura 36. El arroyo de las Mulas en estiaje (cauce de orden 4). 5 km de valle antes de su desembocadura en el río Guayquiraró superior. Foto cortesía de Luis Prevedel, ANP Don Sebastián.	81

Figura 37. Ejemplo de la formación de un cauce en el MAAP (centro de la imagen), a partir de un paleo-cauce. Fuente: Google Earth.....	82
Figura 38. El arroyo Sarandí en su nacimiento, directamente al norte del puente sobre la ruta 30, departamento de Esquina, Corrientes.....	83
Figura 39. Cauce sin nombre (de orden 1): al norte de su paso bajo la ruta 126 a aproximadamente 15 km al este de Pueblo Libertador.	84
Figura 40. El arroyo Salinas (cauce de orden 2): aproximadamente 2,5 km de valle aguas arriba de su desembocadura en el arroyo Sarandí. Este arroyo drena una importante zona de esteros del MAAP, y como su nombre lo indica, tiene una salinidad marcada.	84
Figura 41. El arroyo Sarandí (cauce de orden 3) 3 km antes de la unión con el arroyo Barrancas, departamento Esquina, Corrientes. Se destaca que, a pesar de ser un cauce de orden 3, tiene dimensiones comparables con los cauces de orden 5 del RVCE (Barrancas, Guayquiraró y Ávalos.). .	85
Figura 42. El río Guayquiraró medio (cauce de orden 5): 5 km de valle aguas debajo de Paso Juncue, Departamento Esquina, Corrientes. En ese punto de observación, la margen cóncava se encuentra en el límite del valle fluvial, por lo que se aprecia a la Fm. Ituzaingó en la foto superior. La margen muestra evidencias de erosión, tanto por los taludes desnudos como por los derrumbes. Se destacan además las amplias barras de cauce, las dunas, los albardones y el denso bosque ribereño en la planicie de inundación. El río se encuentra en estiaje; la profundidad de agua es menor a 1 m.	86
Figura 43. El arroyo Ávalos (cauce de orden 5): a la altura de la ruta 25, límite entre los departamentos de Esquina y Sauce, Corrientes.	87
Figura 44. El río Barrancas inferior (cauce de orden 6): 8 km de valle antes de la unión con el río Guayquiraró. La margen está pisoteada por animales y su vegetación es escasa.....	88
Figura 45. Brazo principal del río Guayquiraró inferior, cauce de orden 6, a la altura del puente de la ruta 12, límite entre Corrientes y Entre Ríos.	89
Figura 46. Variaciones recientes en la morfología fluvial en planta, tramos 1, 2 y 3 (ver ubicación de los tramos en Figura 21).....	90
Figura 47. Variaciones recientes en la morfología fluvial en planta, tramos 4,5 y 6 (ver ubicación de los tramos en Figura 21).....	91
Figura 48. Procesos de cambio morfológico en los ríos aluviales. La amplificación (lateral extension), el traslado (translation), la rectificación por tangencia (neck cutoff) y la rectificación por desborde (chute cutoff) son fenómenos observables en la cuenca del Guayquiraró. La rotación, no representada en esta Figura, es un traslado con eje curvado. Fuente: Charlton (2007).....	93
Figura 49. Posible zona de trasvase de cuenca en el noroeste de la cuenca, en las cercanías del paraje Malvinas. Las aguas podrían vertirse desde la cuenca del río Corriente hacia la cuenca del río Guayquiraró (izquierda, 27 de enero 2015) o desde la cuenca del río Guayquiraró hacia la cuenca del río Corriente (derecha, 5 de diciembre de 2018) según los niveles hidrométricos en cada cuenca. Imágenes Landsat 8 (path/row: 226/81)	96
Figura 50. Hieto-hidrograma medio mensual aproximativo de la cuenca del Guayquiraró (suma de los caudales en las estaciones Paso Juncue y Paso la Llana).	98
Figura 51. Erosión que involucra el ensanchamiento de un cauce de orden 2. Departamento La Paz, Entre Ríos.	99
Figura 52. Tajamar en la cuenca alta del Guayquiraró, Curuzú Cuatiá.....	102
Figura 53. Ganadería ovina en las cercanías de Sauce, Corrientes.....	103
Figura 54. Establecimiento ganadero en la ruta 126 entre Sauce y Pueblo Libertador, Esquina.	105
Figura 55. Terraplén de una presa arrocera en las cercanías de Cazadores Correntinos, Curuzú Cuatiá, Corrientes. A la izquierda se observa el lago, en el centro la represa vegetada y a la derecha el fondo natural del valle fluvial.	108
Figura 56. Embalse arrocero en las cercanías de Cazadores Correntinos, Curuzú Cuatiá, Corrientes. En el mismo, algunos árboles muertos han quedado inundados, vestigios de la vegetación previa a la construcción de la presa.	108

Figura 57. Campo de arroz inundado en las cercanías de Cazadores Correntinos, Curuzú Cuatiá, Corrientes.....	110
Figura 58. Coberturas terrestres en la cuenca del Guayquiraró en 1987 (Resolución espacial 30 m).	118
Figura 59. Coberturas terrestres en la cuenca del Guayquiraró en 2019 (Resolución espacial 30 m).	119
Figura 60. Cambios en superficie de cobertura entre 1987 y 2019.....	120
Figura 61. Nuevas tierras agrícolas: cambios de coberturas entre 1987 y 2019 hacia Otros Cultivos y Barbecho (OCyB), Arroceras (AR) y Agua Superficial (AS).....	121
Figura 62. Pérdidas de tierras agrícolas: cambios de coberturas entre 1987 y 2019 desde Otros Cultivos y Barbecho (OCyB) y Arroceras (Ar).	122
Figura 63. Cartografía de las represas arroceras en la cuenca del río Guayquiraró (activas e inactivas).	123
Figura 64. Evolución temporal de los volúmenes retenidos por represas arroceras en la cuenca del Guayquiraró, desde 1992 hasta 2019 (en Millones de m ³).....	124
Figura 65. <i>Canalizaciones y terraplenes en la cuenca (relevamiento no exhaustivo)</i>	127
Figura 66. Terraplenes en el abanico aluvial del arroyo Barrancas.	129
Figura 67. El aspecto del arroyo Barrancas después de las obras efectuadas en 2017-2018 por la provincia de Corrientes. Fotos obtenidas desde el sitio web del ICAA.....	131
Figura 68. El arroyo Saturno antes de la obra ingenieril (arriba) y después (abajo). El ancho del canal pasó de ser 4 m a ser 15 m.....	132
Figura 69. Sabana en el MAAP, anteriormente un campo de cultivo. Departamento de Esquina, Corrientes.....	134
Figura 70. Proceso de delimitación de la cuenca del río Guayquiraró superior con el modelo SWAT.	137
Figura 71. Clases de pendientes (A), Series de suelos (B) y coberturas terrestres de 1987 (C) utilizados en el modelo SWAT.	138
Figura 72. Estaciones meteorológicas utilizadas en SWAT	141
Figura 73. Hidrograma de referencia: datos observados utilizados para la calibración. Periodo 01/01/1985 – 12/31/1989.	143
Figura 74. Hidrograma de calibración del modelo de cuenca. Periodo 01/01/1985 – 12/31/1989. (Línea gris: caudales observados, Línea azul: caudales modelados).....	144
Figura 75. Hidrograma de validación del modelo de cuenca, periodo 01/01/1990 – 12/31/1994. (Línea gris: caudales observados, Línea azul: caudales modelados).....	144
Figura 76. Balances hídricos por tipo de cobertura del suelo (estado actual).....	148
Figura 77. Hidrograma modelado de la crecida del año 1988.....	149
Figura 78. Hidrograma modelado de la crecida de 2000.....	150
Figura 79. Hidrograma modelado de la crecida de 2006.....	151
Figura 80. Hidrograma modelado de la crecida de 2016.....	152
Figura 81. Curva de duración de caudales	153
Figura 82. Mapas de producción de agua (promedios anuales en mm), a escala de subcuenca. Escenarios 1 y 2.	155
Figura 83. Mapas de producción de agua (promedios anuales en mm), a escala de subcuenca. Escenarios 3 y 4.	156
Figura 84. Subcuencas del río Guayquiraró superior en su nacimiento y el arroyo Capivarí. Imágenes del 2019.....	157
Figura 85. Hidrograma modelado del río Guayquiraró en su nacimiento. Año 1992.....	159
Figura 86. Hidrograma modelado del río Guayquiraró en su nacimiento. Años 2009-2010.	160
Figura 87. El río Guayquiraró superior (en su nacimiento) y el Capivarí. Fuente: Bing Aerial.	161

Figura 88. El río Guayquiraró superior (naciente) unos metros aguas arriba de su confluencia con el arroyo Capivarí.	162
Figura 89. El arroyo Barrancas directamente después de las obras de 2017-2018. Fotos obtenidas desde el sitio web del ICAA.	165
Figura 90. Ejemplos de cambios en las coberturas terrestres. Arriba, izquierda: hidromorfismo en campo de cultivo. Arriba, derecha: pérdida de BC a mano de OCyB. Abajo, izquierda: pérdida de SS a mano de OCyB. Abajo, derecha: pérdida de VH a mano de AR.	166
Figura 91. Cárcavas de erosión de hasta 5 m de ancho en campo.	167
Figura 92. Cambios territoriales en el departamento de Sauce, Corrientes, antes y después de la instalación de una arrocera (entre 1998 y 2008).	168
Figura 93. Camino rural inhabilitado por el desborde del arroyo Trochi, departamento de La Paz, Entre Ríos. Foto cortesía de Luis Prevedel.	171
Figura 94. En 2015 ocurrió la caída parcial del puente de la ruta 126 entre Sauce y Pueblo Libertador, ubicado aguas abajo de la unión natural del Sarandí con el Barrancas.	172
Figura 95. Ejemplo de deforestación en las cercanías a Las Mulás, Departamento Feliciano, Entre Ríos. Foto cortesía Luis Prevedel, ANP Don Sebastián.	173
Figura 96. La conexión entre los arroyos Sarandí y Barrancas se hará en los próximos años. Fuente: Google Earth.	178
Figura 97. La estabilidad de este puente cruzando el arroyo San Víctor está comprometida por la erosión afectándolo.	179
Figura 98. Realización de la obra ingenieril sobre el arroyo Barrancas en 2018.	180
Figura 99. Blanquizar en el Area Natural Protegida Don Sebastián. Foto cortesía de Luis Prevedel, ANP Don Sebastián.	182

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Guayquiraró y sus sistemas hidrográficos..	55
Tabla 2. Los 15 caudales diarios más altos registrados en el río Guayquiraró y en el arroyo Barrancas	60
Tabla 3. Características principales de las unidades geomorfológicas	67
Tabla 4. Cambios en la sinuosidad de los tramos analizados.	92
Tabla 5. Parámetros morfológicos por tramo y periodo de tiempo	94
Tabla 6. Superficies dedicadas a diferentes cultivos en la cuenca del Guayquiraró en invierno 2019 y verano 2020, a partir de Abelleyra et al. (2020)	105
Tabla 7. Superficie sembrada con los cultivos principales (arroz, soja total, maíz total y trigo total) en departamentos de la cuenca del Guayquiraró en los últimos años.....	106
Tabla 8. Clases de coberturas terrestres presentes en la cuenca del río Guayquiraró.	111
Tabla 9. Las represas arroceras en la cuenca del río Guayquiraró.	124
Tabla 10. Comparación de las represas arroceras y los embalses ganaderos (tajamares) en 1987 y 2019.....	125
Tabla 11. Canalizaciones en la cuenca; tipos, usos y ejemplos	126
Tabla 12. Superficies de las clases de pendientes, de los suelos y de las coberturas terrestres que forman los HRU	140
Tabla 13. Escenarios de modelación.....	145
Tabla 14. Balances Hídricos de los escenarios modelados (valores en mm)	147
Tabla 15. Leyes y mecanismos de gestión por parte de las provincias, de interés para la hidrogeomorfología de la cuenca	174

Símbolos y abreviaciones frecuentes

Específicos de esta tesis:

AS: Agua superficial

AR: Arrocera

BC: Bosque cerrado

DSB: Depresión del Sarandí-Barrancas

LO: Localidad

MAAP: Mega abanico aluvial del Paraná en los esteros del Iberá y del Ñeembucú

PAR: Prácticas agropecuarias recientes

RVCE: Relieve de valles correntino-entrerrianos

PS: Pastizal seco

SS: Sabana seca

UG: Unidad geomorfológica

VE: Vegetación escasa

VH: Vegetación hidrófita

OCyB: Otros cultivos y barbecho

De uso convencional o frecuente:

a.A.P.: años antes del presente

ACPA: Asociación Correntina de Plantadores de Arroz

BPA: Buenas prácticas agrícolas

CORUFA: Consejo Regulador del Uso de Fuentes de Agua

GEE: Google Earth Engine

HRU: Hydrologic Response Unit (Unidad de respuesta hidrológica)

IGN: Instituto Geográfico Nacional

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

ICAA: Instituto Correntino de Agua y Ambiente

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SMN: Servicio Meteorológico Nacional

Introducción y aspectos generales

SNAP: Sentinel Application Platform

MDE: Modelo Digital de Elevación

MDT: Modelo Digital de Terreno

MICH: Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas

MNC: Mapa Nacional de Cultivo

NBI: Necesidades básicas insatisfechas

SCP: Semi-Automatic Classification Program

WBT: White Box Tools

Resumen

La cuenca del Río Guayquiraró (provincias de Corrientes y Entre Ríos) se comparte entre el relieve de valles correntino-entrerrianos y el mega abanico aluvial del Río Paraná en los esteros del Iberá y del Ñeembucú. Esta región, tradicionalmente ganadera, experimenta cambios territoriales desde 1990, al llegar el cultivo de la soja y del arroz con represa. Se evaluaron las influencias de estas prácticas agropecuarias recientes sobre la hidrogeomorfología de la cuenca a través de la clasificación de imágenes satelitales, la medición del desplazamiento de los grandes cauces y la modelación hidrológica usando el Soil and Water Assessment Tool (SWAT), además de la caracterización productiva, hidrológica y geomorfológica. Se constataron efectos leves sobre el régimen hidrológico a escala de cuenca, pero efectos mayores a escala de subcuenca. Sobre el régimen sedimentario, las prácticas agropecuarias recientes podrían fomentar la incisión del relieve de valles correntino-entrerrianos y la aceleración en el desplazamiento del río Guayquiraró y del arroyo Barrancas. Las obras ingenieriles de acondicionamiento sobre este mismo arroyo son problemáticas a nivel hidráulico e hidrogeomorfológico, entre otros aspectos. Finalmente, se dilucidaron 12 propuestas de manejo integral de la cuenca, como, por ejemplo, la de realizar un plan de gestión hídrica en la depresión del Sarandí-Barrancas y de cartografiar las zonas inundables de la cuenca baja.

Palabras claves: Hidrogeomorfología; Represa arrocera; Guayquiraró; Depresión del Sarandí-Barrancas; SWAT.

Abstract

The Guayquiraró river basin (provinces of Corrientes and Entre Ríos) is shared between the valleys of Corrientes and Entre Ríos and the mega alluvial fan of the Paraná river in the Iberá and Ñeembucú Wetlands. This region, traditionally a cattle-raising area, has undergone territorial changes since 1990, with the arrival of soybean and rice cultivation with dams. The influences of these recent agricultural practices on the hydrogeomorphology of the basin were evaluated through the classification of satellite images, the measurement of the lateral migration of rivers and hydrological modeling using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), in addition to productive, hydrologic and geomorphologic surveys. At the basin scale, slight effects on the hydrological regime were noted, but greater effects at the sub-basin scale. On the sedimentary regime, new agricultural practices could participate in the incision of the valleys of Corrientes and Entre Ríos and the acceleration in the displacement of the Guayquiraró and Barrancas Rivers. The engineering works on the Barrancas River are problematic at hydraulic and hydrogeomorphological levels, among other aspects. Finally, 12 proposals for the integrated river basin management were elucidated, such as, for example, the implementation of a water management plan in the Sarandí-Barrancas depression and the mapping of flood zones in the lower basin.

Keywords: Hydrogeomorphology, Rice dams, Guayquiraró River, Sarandí-Barrancas depression, SWAT.

*" Y se vivirá junto a los arroyos
todos, todos los estados de alma
del agua. "*

Juan L.Ortiz.

Capítulo 1. Introducción y aspectos generales

1.1. Problemática de investigación

El presente estudio se centra en la cuenca hidrográfica del río Guayquiraró. Es un territorio de aproximadamente 9.000 km² compartido entre Corrientes y Entre Ríos, dos provincias del Noreste de la República Argentina (Figura 1).

En los últimos años se han remarcado presiones de origen antrópica sobre las cuencas hidrográficas de esta región. Al respecto, el Comité Intergubernamental Coordinador de los países de la cuenca del Plata (CIC Plata) mencionó, sobre los extensos humedales de la zona, que *"las prácticas de manejo de agua como endicamientos, canalizaciones y drenajes asociados a actividades agropecuarias afectan la estructura y el funcionamiento de estos sistemas de humedales"* (2016, p. 101). Específicamente, en la zona central de la Mesopotamia, un antecedente en ese sentido es el de Minotti (2017, p.157): *"[los] embalses para arroceras están generando la fragmentación y desaparición de las áreas de malezales, bañados de altura, y humedales fluviales"*. como Rodríguez et al. (2021, p.26): *"Se manifiesta el avance del cultivo sobre las planicies de inundación, el uso de agroquímicos y la modificación de humedales mediante represamiento y derivación del agua"*. En la cuenca del río Feliciano, lindante por el sur a la del Guayquiraró, Iriondo et al. (1985) avanzaban ya en lo siguiente: *"los procesos actuales están modificando parcialmente la morfología de la llanura aluvial, implantándose un sistema de energía considerablemente mayor. Las causas deben buscarse en la acción antrópica, ya que la explotación agrícola-ganadera de la cuenca provoca un aumento de la esorrentía y concentración de los picos de crecida"* (p. 154). Además, fue demostrado reiteradas veces la deforestación vinculada al avance de la agricultura, en Entre Ríos (Romero et al., 2007; Maldonado, et al., 2012; Schulz et al., s.f.) y, en menor medida, en Corrientes (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2007; Pohl Schnake & Vallejos Víctor, 2011; Navarro de Rau, 2012).

Por muchos siglos, el territorio de Entre Ríos y Corrientes se conformó de montes y pasturas donde se desarrolló la ganadería extensiva, la cual últimamente ha perdido importancia en beneficio de la agricultura (Valezuela de Mari, 2001; Conte et al., 2010; Bolsa de Cereales de Entre Ríos, 2018). Este fenómeno es parte de la expansión de la agricultura, particularmente sojera, en los años 1990 y 2000 en la Pampa Húmeda y fuera de ella, en regiones de la Argentina que tradicionalmente no eran agrícolas (Conte et al., 2010).

También en la década del 90, la creación del MERCOSUR provocó una expansión fuerte de la industria arrocera en Argentina, principalmente en Corrientes y Entre Ríos (Marano y Filipi, 2015). En esta década, las arroceras empezaron a construir embalses como fuente de agua

de riego, mucho más segura y económica, y complejas canalizaciones y nivelaciones del terreno, permitiendo la inundación y el siguiente drenaje del campo.

En Argentina, los estudios a gran escala relacionados a la actividad agropecuaria se han concentrado en la Pampa Húmeda, la principal zona productora del país. En territorios periféricos se sabe poco sobre los efectos de las transformaciones territoriales. Nunca se realizó un estudio científico dedicado a la cuenca hidrográfica del río Guayquiraró, a pesar de abarcar una superficie significativa de territorio.

Estas nuevas prácticas agropecuarias generan preguntas e incertidumbres de índole ambiental, de las cuales aquellas relacionadas a la hidrogeomorfología han recibido poco a ningún interés académico o estatal. Sin embargo, la hidrogeomorfología, un campo en sí multidisciplinar, recupera los vínculos e interdependencias bien conocidos entre la hidrología, la geomorfología, la ecología y la sociedad (Pool, 2010; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2013; Ashmore, 2015). Sin manejo adecuado, los cambios impuestos sobre las dinámicas hidrogeomorfológicas pueden provocar perjuicios y conflictos socioambientales, tales como daños a los ecosistemas ribereños y fluviales, degradación del suelo, contaminación del agua, conflictos para el uso del agua, perjuicios a infraestructuras, bajas del rendimiento y de la producción agropecuaria.

Las cuencas hidrográficas son escalas de trabajo oportunas para la evaluación de problemáticas territoriales y el desarrollo de un buen manejo del territorio. Son sistemas complejos donde una multitud de factores naturales y antrópicos interactúan con repercusiones, muchas veces difíciles de prever, involucrando procesos a distintas escalas espaciales y temporales (Schumm, 2007; Biedenharn et al., 2008; Wohl, 2014). Informaciones de todas las disciplinas son necesarias para lograr la comprensión del territorio y poder planificar un manejo integral de cuencas hidrográficas (MICH). El MICH permite preservar la sustentabilidad de la cuenca hidrográfica y mejorar la calidad de vida de los habitantes de la región (Gaspari et al., 2009).

Considerando las incertidumbres que las prácticas agropecuarias recientes (PAR) del Noreste de Argentina generan sobre los sistemas hidrográficos, se considera oportuno un estudio exploratorio y regional, enfocado en los posibles efectos de las PAR sobre las dinámicas hidrogeomorfológicas. Se decidió centrar el estudio en la cuenca hidrográfica del río Guayquiraró por ser un territorio con carencia notable de conocimiento y un caso de estudio interesante debido a su carácter biprovincial y su gran variabilidad fisiográfica.

1.2. Área de estudio

El río Guayquiraró tiene una cuenca hidrográfica que abarca un extenso territorio, tanto del sur de Corrientes como del norte de Entre Ríos. Incluye a parte de los departamentos de Esquina, Sauce y Curuzú Cuatiá en Corrientes, y La Paz, Feliciano y Federación en Entre Ríos.

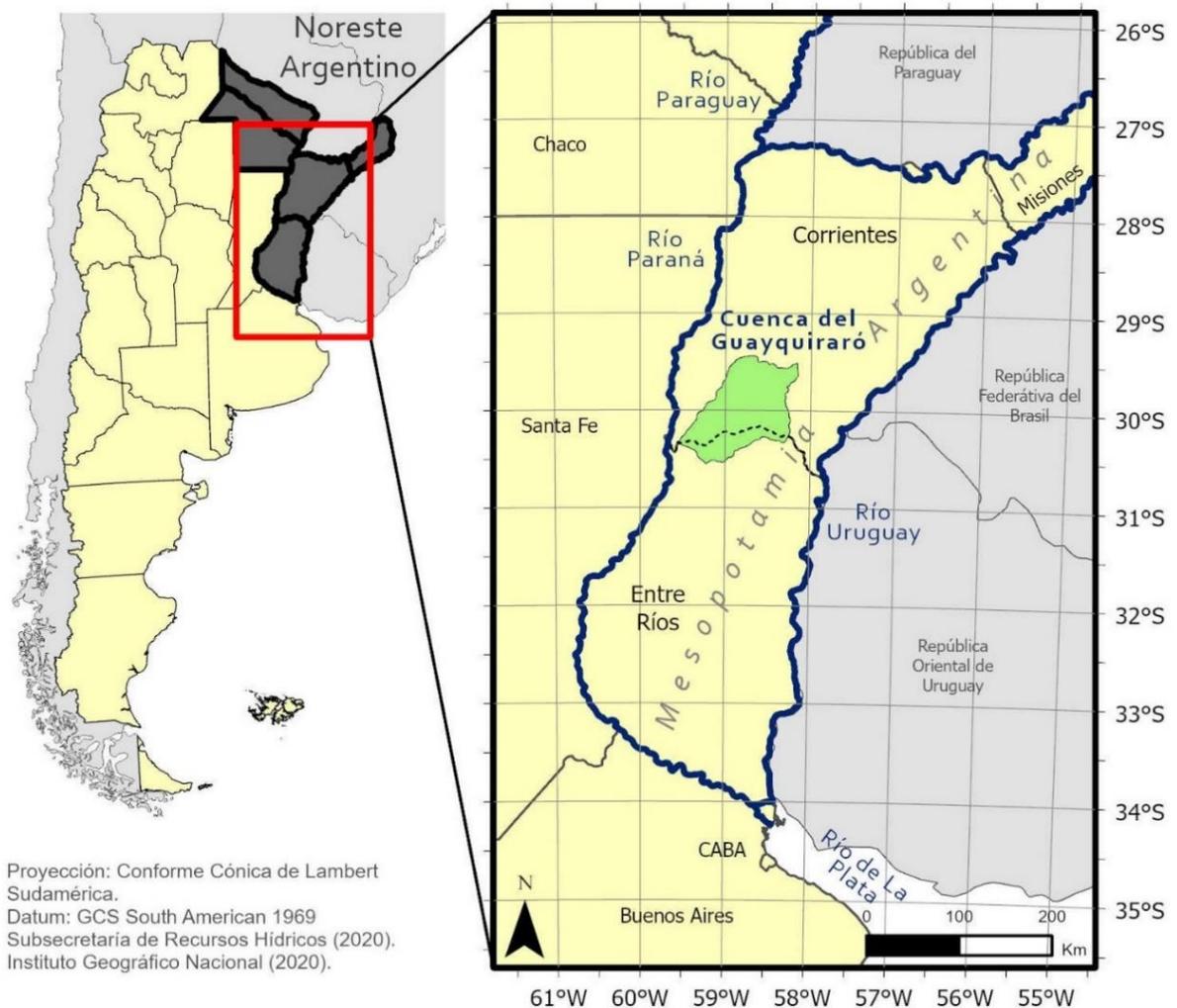


Figura 1. Localización de la cuenca de estudio.

Los cursos de agua en la cuenca tienen una orientación general de noreste a sudoeste, desembocando en el río Paraná a unos 40 km al norte de la ciudad de La Paz, Entre Ríos. Los límites de la cuenca se encuentran aproximadamente entre los paralelos $29^{\circ} 30' S$ y $30^{\circ} 30' S$ y entre las longitudes $58^{\circ} 00' O$ y $59^{\circ} 30' O$. La cuenca tiene una superficie aproximada de 9.000 km^2 y cotas aproximadas entre los 90 m.s.n.m. y 35 m.s.n.m. (Martínez, 2010), dándole características de cuenca de llanura, con una pendiente media general menor al 1%. Los cursos Barrancas, Ávalos y Sarandí son los tributarios principales del río Guayquiraró.

1.3. Antecedentes de conocimiento

La información antecedente en el área de estudio fue, en su gran mayoría, producida a escalas de trabajo diferentes a aquella de la presente tesis. Por lo tanto, la información queda diluida en escalas mayores (escalas regional-nacional, escala provincial) o fragmentada en escalas menores (escala departamental).

a) Fisiográficos

Existen varios estudios geológicos de escala mayor dando las bases fisiográficas para la región, tales como Santa Cruz y Herbst (1985), Aceñolaza (2007), Mira et al. (2015, 2016) y Santa Cruz et al. (2020).

La vegetación, ya sea desde la descripción ecológica o florística, ha sido descrita por Carnevali (1994), Burkart, Bárbaro, Sánchez y Gómez (1999); Matteucci et al., (2013) y Oyarzabal et al. (2017), en estos casos en una escala mayor a la cuenca. Ligier et al. (2001) han descrito y cartografiado la vegetación de los departamentos correntinos de Sauce y Curuzú Cuatiá en escala 1:200.000, a escala de paisaje, abarcando una parte importante de la cuenca del río Guayquiraró.

A nivel hidrológico, Giraut et al. (2009) trabajaron en la clasificación jerárquica de los sistemas hidrográficos de la provincia de Corrientes. En la década del 80, durante una colaboración técnica Italia-Argentina, se llevó a cabo un estudio de control de crecidas, drenaje y desarrollo agrícola en la cuenca del Sarandí-Barrancas, en el contexto de la dinámica de inundaciones recurrentes naturales que allí ocurrían. Lamentablemente, este documento no pudo ser consultado en el marco de esta tesis debido a que no había libre acceso al informe. De acuerdo con Cangiani (2002), la conclusión de estos estudios es que es necesario regular los recursos hídricos y modificar la estructura de la actividad agropecuaria para el desarrollo del sudoeste correntino. Sin embargo, se desconocen otras conclusiones y detalles sobre estos estudios.

En los últimos años se hicieron estudios de gran escala y de enfoque interdisciplinar, principalmente ecológico-hidrológico-geomorfológico, sobre humedales de la región (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2013; Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata, 2016; Benzaquen, et al., 2017). Las descripciones sobre la cuenca del Guayquiraró en estos trabajos son someras. Otro aporte valioso es el de Minotti (2017) sobre los humedales de la subregión malezales, tembladerales y arroyos litorales, y la breve descripción hidrológica de Boi y Galassi (2013a) del río Guayquiraró y su región. A pesar de incluir los esteros de la depresión del Sarandí-Barrancas en la zona delimitada geográficamente, no se los describe (Boi y Galassi, 2013b).

Esto dicho, la cuenca del río Guayquiraró carece de una caracterización hidrológica actualizada y completa.

a) Físico-productivos

Existen en la región varias cartografías de suelos, desde un enfoque productivo y taxonómico, de las cuales las fuentes de información más precisas, con descripciones a escala de serie, son los estudios en los departamentos de Sauce y Curuzú Cuatiá en escala 1:50.000 (Ligier et al., 2001), en los departamentos de Esquina, Goya y Lavalle en escala 1:100.000 (Ligier et al., 2012) y las cartas de suelos de Entre Ríos (Plan Mapa de Suelos – Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos, 1986, 1990). Mencionemos también la provincia de Corrientes en escala 1: 500.000 (Escobar et al., 1996) y un mapa de suelos a nivel nacional digitalizado de escala 1:500.000 (SAGyP – INTA, 1990).

Ligier et al. (2001, 2012) presentan además descripciones fisiográficas, tanto regionales como locales, incluyendo unidades de paisajes y descripciones de la vegetación. La información producida es georreferenciada y de libre acceso en el sitio web del Ministerio de Producción de Corrientes (<http://www.mptt.gov.ar/site13/index.php>).

Además, en esos trabajos el riesgo de erosión de los suelos está evaluado para cada serie, según la erodibilidad de la capa arable (factor K de la Universal Soil Loss Equation (USLE)) y el factor topográfico (Factor L x S de la USLE), sin tomar en cuenta la cobertura o el manejo. Sobre los suelos de Curuzú Cuatiá y Sauce, Ligier et al. (2001, p.117) afirman: "*La mayor proporción de series, se agrupan en clases altas y moderadamente altas de riesgo; corresponden a suelos con elevados contenidos de limo, susceptibles a la erosión laminar*". En Esquina, la gran mayoría de los suelos fueron clasificados como de riesgo moderado, moderadamente bajo o bajo ante la erosión hídrica. La cuestión de la erosión de los suelos también fue desarrollada en Ligier et al. (1998) y Ligier et al. (2000).

b) Antrópicos

Muñoz et al. (2005) se acercaron al problema de deforestación en Entre Ríos cartografiando las superficies de bosque en el año 2003 y afirmando que la situación en la provincia es "particularmente grave" (p.170). En el *Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos*, se destacaba la deforestación en las provincias de Entre Ríos y Corrientes, principalmente causada por el avance del cultivo de la soja, además de los problemas de erosión hídrica que éste conlleva (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2007).

Duarte y Díaz (2007), Casermeiro (2007), Romero et al. (2007), Pohl Schnake & Vallejos Víctor (2011) y Maldonado et al. (2012) han vinculado la actividad arrocera con la

deforestación, ya sea en Corrientes o en Entre Ríos. Maldonado, Sione y Aceñaloza (2012) identificaron un total de 2820 ha de desmonte en el departamento de Feliciano entre agosto de 2009 y abril de 2011, desmonte asociado con nuevos proyectos de represas arroceras o con la expansión de establecimientos agrícolas preexistentes. Romero et al. (2007) mostraron a una escala temporal y espacial mayor la amplitud de la deforestación para departamentos del norte de Entre Ríos, que alcanzó 435.480 ha entre 1995 y 2003.

Por su parte, Ligier et al. asocian la deforestación a un largo proceso histórico de tala para el uso de la leña como combustible, y no al avance de la agricultura: "*La acción antrópica sobre estos ecosistemas ha modificado las extensas sabanas herbáceas y leñosas, en especial en ésta última, la extracción de madera para carbón y postes fue y es significativa. Si bien la actividad principal en la zona es del tipo ganadería bovino-ovino, el pastoreo ovino no permite la normal repoblación del espinillar y hay zonas, de escasa significancia geográfica, donde la agricultura (principalmente arroz y algo de soja y maíz) directamente ha eliminado la vegetación leñosa.*" (2001, p.48).

Basándose en mediciones empíricas, Fontán (2012) demostró que los embalses arroceros inundan bosques nativos en proporción relativamente baja: 18% y 4% en Curuzú Cuatiá y Sauce para el bosque nativo ribereño, mientras que 5% y 1% para el bosque nativo no ribereño.

Un antecedente importante sobre el cambio de cobertura en la región es Navarro de Rau (2012), quien cartografió a escala 1:250.000 el avance de la agricultura en los departamentos correntinos de Curuzú Cuatiá, Esquina, Mercedes, Monte Caseros y Sauce. Utilizó 9 clases principales y combinables (cultivos, bosques terrestres, pastizales, bosques regularmente inundados/anegados, herbáceas de esteros, herbáceas de cañadas-malezales, urbano, cuerpos de agua artificial y cuerpos de agua natural). Al respecto de los cambios de cobertura, la autora concluye: "*Si bien estos cambios no son de gran magnitud en comparación con otras regiones del país, hay indicios de estar estableciéndose en la región una clara intención hacia la agricultura, ya sea de secano como bajo riego.*" (Navarro de Rau, 2012, p.13).

Con excepción de la investigación de Navarro de Rau (2012), son muy pocos los estudios sobre el avance de la agricultura no arrocera en Corrientes. En Entre Ríos, hubo mayor cantidad de estudios sobre, por ejemplo, el cultivo de la soja (ej.: Gvozdenovici et al., 2015; Masin et al., 2015) con enfoque agronómico.

El mapa nacional de cultivos (MNC) del INTA de la campaña 2019/2020 resulta la fuente de información georeferenciada (ráster de resolución espacial de 30 m por 30 m) más actualizada sobre la producción agrícola en Argentina (Abelleyra et al., 2020).

El libro *Evaluación agrohidrológica de represas para riego en Entre Ríos*, publicado en 2007, es una colección de estudios y experiencias prácticas desde diferentes disciplinas científicas editado por la Universidad Nacional de Entre Ríos. Son notables los trabajos de Iturburu (2007) e Irigoyen (2007) que describen los aspectos técnicos de la implementación de embalses arroceros. También a nivel técnico, Currie y Ruberto (2003) calcularon el balance hídrico en una subcuenca arrocerá del Miriñay a partir de los métodos de Thornthwite y de Curva Número con el fin de justificar la instalación de una presa arrocerá. Un documento del Consejo Federal de Inversiones, particularmente interesante para la tecnicidad del modelo de producción arrocerá, resume las etapas en la implementación de una producción arrocerá con represa en los departamentos correntinos de Curuzú Cuatiá y Sauce (Fontán, 2012).

La guía de buenas prácticas agrícolas (Guía BPA) para el cultivo del arroz en Corrientes, patronada por INTA EEA Corrientes y la Asociación Correntina de Plantadores de Arroz (ACPA) en 2008, y el manual de buenas prácticas arroceras en Entre Ríos (Manual BPA), patrocinado por la fundación Proarroz en 2014, son importantes referencias para la sustentabilidad del modelo de producción arrocerá regional (INTA y ACPA, 2008; Carñel et al., 2014). Estas presentan informaciones técnicas relevantes sobre el riego del cultivo, además de varios otros aspectos técnicos y de manejo (uso de agroquímicos, cosecha, instalación, etc.). Sin embargo, no se aborda en ellos el manejo sustentable en las represas de los excedentes hídricos y sólidos, salvo una breve mención al caudal ecológico por Carñel et al. (2014).

Respecto del caudal ecológico, Currie y Montoya hicieron una revisión de varios métodos que se utilizan para su definición a nivel nacional e internacional (2019). Uno de estos métodos que, según los autores, ha sido utilizado en varios proyectos arroceros del noreste argentino, es de mantener un caudal que represente un 5% del volumen máximo del lago durante un cierto tiempo (30 a 100 días).

En 2014, Falcón, Currie y Michellod concluyeron que los valores de agroquímicos en varios puntos de la red hidrográficá aguas abajo de una arrocerá en Chaco estaban por debajo de los límites permitidos, además de no mostrar diferencias significativas en el ciclo del cultivo.

A nivel histórico, Domínguez et al. (2010) describieron los cambios sistémicos de la industria arrocerá en Corrientes en los años 90, incluyendo el aumento de uso de represas en esta época. Alarcón e Insaurralde (2011) escribieron sobre la evolución de las represas arroceras entre 1991 y 2010 en la cuenca del Miriñay.

Para el desarrollo socioeconómico, varios autores han remarcado el valor de los proyectos arroceros. Entre ellos, Fontán avanza: "*Estos proyectos ejercen un impacto ambiental*

socioeconómico positivo al incrementar las oportunidades laborales en el medio rural y en las actividades vinculadas a la transformación de las industrias molineras y la provisión de servicios conexos. Contribuyen siempre, desde este punto de vista a mitigar la desocupación en su área de influencia, a estabilizar la población rural y a mejorar los ingresos de las familias y sus posibilidades de acceso a bienes y servicios básicos existentes en la región." (2012, p.97). Es también reconocido que el cultivo del arroz crea más puestos de trabajo por superficie que los cultivos de secano: según el mismo autor, el sector ocupa 2 personas nuevas por año cada 100 ha de cultivo.

Sobre la gestión territorial del cultivo del arroz en la Mesopotamia, hicieron avances notables Ligier et al. (2001) con el mapeo de unidades cartográficas según potenciales de producción agropecuaria, Pagliettini y Gil (2008) y Manzán et al. (2012) en la valoración económica del agua en Entre Ríos y Corrientes, y Pagliettini et al. (2016) en la gestión integrada de recursos hídricos. Son también mencionables los aportes conceptuales de Ligier (2008) en la Guía BPA y Carñel et al. (2014) en el Manual BPA, para el ordenamiento territorial del arroz en Corrientes. Se avanzó también en la investigación sobre sistemas arroceros de rotaciones innovadoras, entre ellos la rotación arroz - pacú la cual es prometedora para la diversificación de la economía (Currie et al., 2015a, Currie y Reggie L., 2015). La guía de Fontán (2012) abarca varios aspectos relativos al cultivo del arroz en el sur de Corrientes (caracterización regional, hidrología - hidráulica, aspectos productivos y financieros, aspectos ambientales) y así constituye un antecedente regional notorio.

A partir de la reseña de bibliografía, se observan importantes carencias en varios campos del conocimiento científico en la región de la Mesopotamia central y principalmente en el territorio de la cuenca del Guayquiraró, destacándose las faltas en lo que atañe al funcionamiento hidrológico e hidrogeomorfológico de los ríos de la región, particularmente el Guayquiraró y sus tributarios. También, fuera de las menciones de Giraut et al. (2009) y Pagliettini et al. (2016), se destaca en la región la falta de trabajo con enfoque en MICH.

Finalmente, no se encontró información sobre la realización de estudios significativos dedicados exclusivamente a la cuenca del Guayquiraró, al contrario de otras cuencas de la región que han recibido mayor interés, por ejemplo, la cuenca del río Feliciano (ej.: Iriondo et al., 1985; Ramonell y Alberdi, 2015) o la cuenca del Miriñay (ej.: Alarcón e Insaurrealde, 2011; Pagliettini y Gil, 2008), lo cual repercute en una escasez de conocimiento para este territorio específico.

1.4. Objetivos e hipótesis

El objetivo de la tesis es evaluar la influencia de las prácticas agropecuarias recientes (PAR) sobre la hidrología y la geomorfología fluvial en la cuenca del río Guayquiraró y proponer mejoras de manejo a partir de la comparación con los existentes en la región.

Los objetivos específicos son:

- i) Determinar las influencias de las prácticas agropecuarias recientes sobre el régimen hidrológico y el régimen de erosión y sedimentación fluvial.
- ii) Evaluar cambios geomorfológicos recientes en cauces de la cuenca y justipreciar su relación con las prácticas agropecuarias recientes.
- iii) Comparar estrategias de gestión de las prácticas agropecuarias por parte de Corrientes y de Entre Ríos y proponer mejoras que contribuyan a la sustentabilidad de la cuenca.

La hipótesis general de trabajo propone que las PAR en la cuenca del río Guayquiraró provocan una respuesta hidrogeomorfológica en el sistema fluvial, y que esta respuesta justifica por lo menos la investigación y el monitoreo por parte de los organismos responsables, y probablemente también, la actualización de los mecanismos de gestión.

Sobre el régimen hidrológico e hidro-sedimentario, se espera que las PAR en la cuenca del río Guayquiraró favorezcan el escurrimiento del agua en ella como consecuencia de la deforestación y las canalizaciones, aun cuando las represas arroceras tengan el efecto hidrológico opuesto, es decir, de reducir el escurrimiento del agua en la cuenca. Este aumento en el escurrimiento probablemente provoque un aumento en la erosión en la cuenca.

Sobre los cambios geomorfológicos recientes, se espera que el aumento de la erosión fomente el dinamismo de los cauces principales de la cuenca. Sin embargo, se espera que la cuenca y los cauces tengan repuestas distintas en sus diferentes partes, considerando su tamaño y variabilidad geográfica, y porque el aporte de sedimento en un sistema hídrico no solo genera aluviones generales, sino también, una respuesta variable en los cursos fluviales (Schumm, 2007).

Los ríos son sistemas complejos y variables, difíciles de prever y cuyos funcionamientos raramente pueden ser simplificados a relaciones de tipo causa-efecto (Schumm, 2007). Es bien sabido que las cuencas hidrográficas y los ríos son sistemas resilientes (Biedenharn et al., 2008), lo cual sugiere que no necesariamente existan efectos tangibles a corto plazo en la cuenca hidrográfica como consecuencias de las PAR.

Finalmente, se espera que los mecanismos de gestión por parte de las autoridades no contemplen los aspectos hidrogeomorfológicos del manejo de cuenca, ya que estos suelen ser mal comprendidos o subestimados por las autoridades implicadas en la gestión del agua.

1.5. Alcances y límites de la tesis

Considerando la escasez de estudios dedicados a la cuenca del río Guayquiraró, este trabajo permitirá aumentar los conocimientos regionales en los campos de la hidrología y de la geomorfología fluvial y sobre las influencias que pueden tener prácticas agropecuarias sobre ellos, los cuales podrían servir de base para trabajos en otras cuencas de la región.

Será posible a futuro profundizar en los temas estudiados o abordar el mismo territorio desde otras perspectivas, contribuyendo así a la comprensión integral de la cuenca del Guayquiraró y del desarrollo socioeconómico regional.

Los conocimientos aportados en este estudio pueden ayudar en la resolución de conflictos socioambientales actuales, además de evitarlos o mitigarlos a futuro, gracias a la comparación del manejo de las prácticas agropecuarias por parte de Corrientes y de Entre Ríos y las propuestas de mejora que se harán.

Cabe aclarar que la sequía de 2022/2023 y los incendios en Corrientes de 2022 no serán tratados en esta tesis, ya que la planificación y la metodología de la tesis fueron definidas antes de la ocurrencia de estos eventos.

Finalmente, dado el tamaño de la cuenca, la variedad de prácticas agropecuarias (cultivos de secano, cultivo de arroz, ganadería, infraestructuras de drenaje, etc.) que se pretende estudiar y los límites de tiempo y recursos, se consideran las prácticas agropecuarias como las modificaciones físicas del espacio geográfico en pos de la producción agrícola y ganadera, pero no se incluye en esta definición las distintas prácticas de manejo a escala de lote (labranza mínima, siembra directa, chacra espejo, etc.). Por lo tanto, no se realizó un análisis comparativo de estos manejos agrícolas, pero sí se describen a grandes rasgos cuales son los manejos agrícolas más comunes en esta región.

1.6. Marcos conceptuales

1.6.1. Geomorfología, geomorfología fluvial e hidrogeomorfología

La geomorfología es *"la ciencia que estudia los fenómenos sobre y cerca de la superficie terrestre y se preocupa de las interacciones entre varios tipos de materiales y procesos,*

implicando los sólidos, líquidos y gaseosos" (Gutiérrez Elorza, 2008, p.2). La geomorfología fluvial es una subdisciplina de la geomorfología que se dedica a estudiar *"las interacciones entre las formas fluviales y procesos a un gran rango de escalas temporales y espaciales"* (traducción libre de Charlton, 2007, p.1).

La hidrogeomorfología se ha definido por Sidle y Onda (2004, p.598) como *"una ciencia interdisciplinaria que se enfoca en las interacciones y los vínculos entre procesos hidrológicos con paisajes o materiales del planeta Tierra y las interacciones entre los procesos geomórficos con el agua superficial y subsuperficial en distintas dimensiones espaciales y temporales"*. En Neiff et al. (2004, p.32) se la define como: *"combinación del clima, geomorfología de la cuenca e hidrología que colectivamente influyen en el funcionamiento de un humedal"*.

En el presente trabajo, se considera la hidrogeomorfología como el estudio de las formas y de los procesos físicos en la superficie terrestre en los cuales el agua es un factor dominante, y sus interacciones con los procesos hidrológicos intervinientes.

1.6.2. Ecosistema

Un ecosistema es un sistema hecho de una comunidad biótica y los elementos abióticos del medio (Christopherson, 2017). Se incluyen en él elementos vivos y no vivos como la vegetación, la fauna, las rocas, los sedimentos, los suelos y los humedales, pero además los procesos que regulan dichos elementos (Everard y Quinn, 2015). En este sentido, consideramos la hidrogeomorfología como parte del concepto amplio de ecosistema, ya que este mismo engloba procesos físicos determinantes de los medios y hábitats.

1.6.3. Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es una unidad morfológica integral en el espacio geográfico donde las aguas superficiales convergen hacia un mismo punto de desagüe según las líneas divisoras de las aguas de ese origen (Gaspari et al., 2013). La cuenca hidrográfica permite definir comportamientos físicos del agua, y por lo tanto las cuencas hidrográficas hacen parte del ecosistema. Desde el punto de vista del manejo del medioambiente, la cuenca hidrográfica es una escala de trabajo oportuna, ya que define un territorio donde una acción es susceptible de tener consecuencias aguas abajo o aguas arriba.

1.6.4. Humedales

Se adopta aquí una definición del ámbito nacional según la cual un humedal es *"un ambiente en el cual la presencia temporaria o permanente de agua superficial o subsuperficial causa flujos biogeoquímicos propios y diferentes a los ambientes terrestres y acuáticos. Rasgos*

distintivos son la presencia de biota adaptada a estas condiciones, comúnmente plantas hidrófitas, y/o suelos hídricos o sustratos con rasgos de hidromorfismo" (Benzaquen et al., 2017, p.22). La ocurrencia y las características de los humedales son muy dependientes de aspectos hidrogeomórficos: la estructura geomorfológica del paisaje, el régimen hidrológico y la litología (Benzaquen et al., 2017).

1.6.5. Territorio

El territorio es considerado como el espacio de interacción entre lo biofísico y lo social (Gaspari et al., 2013). Por lo tanto, la población, las prácticas culturales, las construcciones e imaginarios antrópicos en el espacio sumados al medioambiente biofísico constituyen el territorio.

1.6.6. Prácticas agropecuarias

En esta tesis, se consideran las prácticas agropecuarias como las modificaciones físicas del espacio geográfico por el hombre en pos de la producción agrícola y ganadera. Las prácticas a escala de lote (rotación de cultivos, cortinas de árboles, tipos de labranzas, etc.) no son consideradas en esta definición de prácticas agropecuarias. Tampoco se incluyen a la definición las cuestiones de índole agronómico como son la utilización de fertilizantes y de agroquímicos. Para ellas se prefiere el término de manejos agrícolas.

1.6.7. Manejo integral de cuencas hidrográficas

El manejo integral de cuencas hidrográficas (MICH) se define como: "*un conjunto de esfuerzos tendientes a identificar y aplicar opciones técnicas, socioeconómicas y legales que establecen una solución a la problemática causada por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables, así como en la integridad de las cuencas hidrográficas*" (Gaspari et al., 2009, p.14). Sus objetivos últimos son mejorar la calidad de vida de los habitantes y lograr la sustentabilidad del medioambiente (Gaspari et al., 2009).

1.7. Materiales

- Modelo Digital de Elevación (MDE) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), el MDE-Ar v2.0.

Con resolución espacial horizontal de 30 metros y una precisión vertical de aproximadamente 2 metros es un dato fundamental de la tesis ya que en él se basa la estructura topográfica de la cuenca. Es disponible para descarga en el sitio web del IGN (<https://www.ign.gob.ar/category/tem%C3%A1tica/geodesia/mde-ar>).

- Imágenes satelitales de las misiones Landsat (resolución espacial de 30 metros y temporal de 16 días, 1984 - actualidad).
Disponibles en línea de forma gratuita, en la plataforma Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).
- Imágenes satelitales de las misiones Sentinel (resolución espacial de 10 metros y temporal de 10 días, 2015 - actualidad).
Disponibles en línea de forma gratuita desde la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).
- Fotos aéreas de los tramos más bajos del río Guayquiraró y de los arroyos Barrancas y Sarandí los 8 y 12 de enero de 1975.
Las fotos fueron proporcionadas para el estudio gracias a la colaboración de la firma Prolnsa (Proyectos de Ingeniería S.A., una de las remanentes de la antigua Gerencia del Proyecto Paraná Medio de Agua y Energía Eléctrica S.E) con sede en la ciudad de Santa Fe.
- Imágenes satelitales de alta resolución espacial.
Disponibles en línea de forma gratuita, ya sea desde la plataforma Google Earth o desde Bing Aerial.
- Cartas de suelo del departamento de Sauce y Curuzu Cuatiá en escala 1:50.000 (Ligier et al., 2001)
- Cartas de suelo del departamento de Esquina en escala 1:100.000 (Ligier et al., 2012)
- Cartas de suelo de los departamentos de Entre Ríos en escala 1:100.000 (Plan Mapa de Suelos – Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos, 1986, 1990).
- Datos de precipitaciones diarias acumuladas en las estaciones La Esperanza, Malvinas Sur, Paso Juncue, Paso la Llana y Pueblo Libertador (Red Hidrológica Nacional, 2022), en la estación de Sauce (Servicio Meteorológico Nacional, 2022) y en la estación de Curuzú Cuatiá del Sistema de Información y de Gestión Agrometeorológica del INTA (INTA, 2022).
- Datos de caudal medio diario 1976 - 2017 en Paso la Llana (arroyo Barrancas) y 1985 - 2011 en Paso Juncue (río Guayquiraró).
Disponible desde la Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.)
- Datos de nivel hidrométrico con aforos puntuales en el puente de la RP28 entre Sauce y San Jose del Feliciano 2015 - actualidad
- Disponible desde la Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.)
- Datos de nivel hidrométrico con aforos puntuales en la estancia La Grela, 2020 - actualidad (río Guayquiraró).

Disponible desde la Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.)

- Datos de profundidad y volumen máximos de 3 embalses arroceros de la cuenca del río Guayquiraró en el departamento de Curuzú Cuatiá, Corrientes.

Proporcionado por la empresa gerente de la chacra arrocera. La ubicación exacta no se divulga para conservar la confidencialidad.

1.8. Métodos

En primer lugar, se analizan y describen la estructura biofísica y socioeconómica de la cuenca a escala regional a partir de una amplia búsqueda bibliográfica (Capítulo 2).

En segundo lugar, se hace la caracterización de la cuenca en sus aspectos hidrográfico, hidrológico, morfométrico e hidrogeomorfológico (Capítulo 3). Lo mismo se hace a través del procesamiento y análisis del MDE en un Sistema de Información Geográfica (SIG), la cartografía de la red hídrica y la definición de los límites de la cuenca y de sus subcuencas, la definición de parámetros de morfometría y el análisis del historial de precipitaciones y de los datos de caudal del río Guayquiraró y del arroyo Barrancas. La hidrogeomorfología de la cuenca se describe con detalle a partir de fotointerpretación y del recorrido a campo de esta. Finalmente, se cartografían tramos de los cursos Guayquiraró, Barrancas y Sarandí en los años 1975, 2001 y 2020, y se miden así las tasas de migración lateral (m/año) entre estos años.

En tercer lugar, se describen y analizan las prácticas agropecuarias propias del territorio de la cuenca a través de una búsqueda bibliográfica, del recorrido al campo, de consultas con expertos locales y de un relevamiento por fotointerpretación y por procesos de teledetección (Capítulo 4). En especial, se cuantificaron los cambios de coberturas terrestres entre los años 1987 y 2019 por clasificación de imágenes satelitales utilizando los programas SNAP, Google Earth Engine y QGIS (QGIS.org, 2022). En dos ocasiones se pudo visitar una estancia arrocera en el departamento de Curuzú Cuatiá, Corrientes, contando con 3 represas. Las demás represas arroceras (16) fueron estudiadas desde el gabinete a partir del MDE e imágenes satelitales.

En cuarto lugar, se usa una modelación numérica, el modelo hidrológico SWAT, para evaluar la influencia de los cambios en usos de suelo y de las represas arroceras en la hidrología de la cuenca del río Guayquiraró superior (aguas arriba de Paso Juncue) (Capítulo 5). Con este modelo se obtienen balances hídricos e hidrogramas según diferentes escenarios. Además,

se lleva a cabo un análisis comparativo a escala de subcuenca integrando así los aspectos biofísicos y antrópicos descritos anteriormente.

En quinto lugar, se discuten los vínculos entre las prácticas agropecuarias recientes y la hidrogeomorfología de la cuenca a partir de los resultados obtenidos en los capítulos previos (Capítulo 6).

En último lugar, se describen el contexto socio ambiental actual en la cuenca, establecido a partir de búsqueda bibliográfica y de consultas a ribereños de la cuenca realizadas durante el recorrido de campo, así como los mecanismos de gestión actuales en relación con los temas tratados (Capítulo 7). Finalmente, a partir de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores y tomando en cuenta los mecanismos de gestión actuales, se hacen propuestas de manejo para mejorar la sustentabilidad de la cuenca hidrográfica.

La estructura general de esta metodología se presenta en la Figura 2. Se presentan las metodologías detalladas en cada capítulo.

Varias salidas de campo se llevaron a cabo: el 19 de agosto 2021, del 1 al 4 de noviembre 2021 y del 19 al 21 de agosto 2022. La cuenca se encontraba con niveles de agua bajos para las recorridas del año 2021, y niveles medio bajos para las del año 2022. Las salidas de campo permitieron recopilar información crucial sobre varios parámetros de las modelaciones hechas en gabinete, además de ser la base de las descripciones geomorfológicas fluviales y aportar a la comprensión general del área de estudio.

Los resultados del estudio se representan por medio de tablas, gráficos, esquemas conceptuales y mapas. Un SIG es de amplio uso a lo largo del estudio, siendo la herramienta con la cual se colecta y analiza buena parte de la información, y donde se produce la cartografía. Los mapas están proyectados en Universal Transverse Mercator 21 S, Datum WGS 1984, salvo en el caso que otra proyección sea referida. Los programas *ArcGIS*, *Sentinel Application Platform* (SNAP) y *QGIS* (QGIS.org, 2022) son los utilizados para las tareas de teledetección y de SIG, según las necesidades de cada análisis. Los plugins permiten ampliar los programas y usar una variedad importante de herramientas. *Whitebox tools*, *Semi-Automatic Classification Program* (SCP, Congeda, 2021) y *ArcHydro* son plugins de acceso libre que sirven en varias etapas del trabajo. En el caso de procesos de teledetección particularmente demandantes a nivel informático, se usa el software en línea de acceso libre *Google Earth Engine* que posee alta capacidad de proceso. Los datos no espaciales se tratan en Microsoft Word, Microsoft Excel 15 y/o R Studio 1.3.

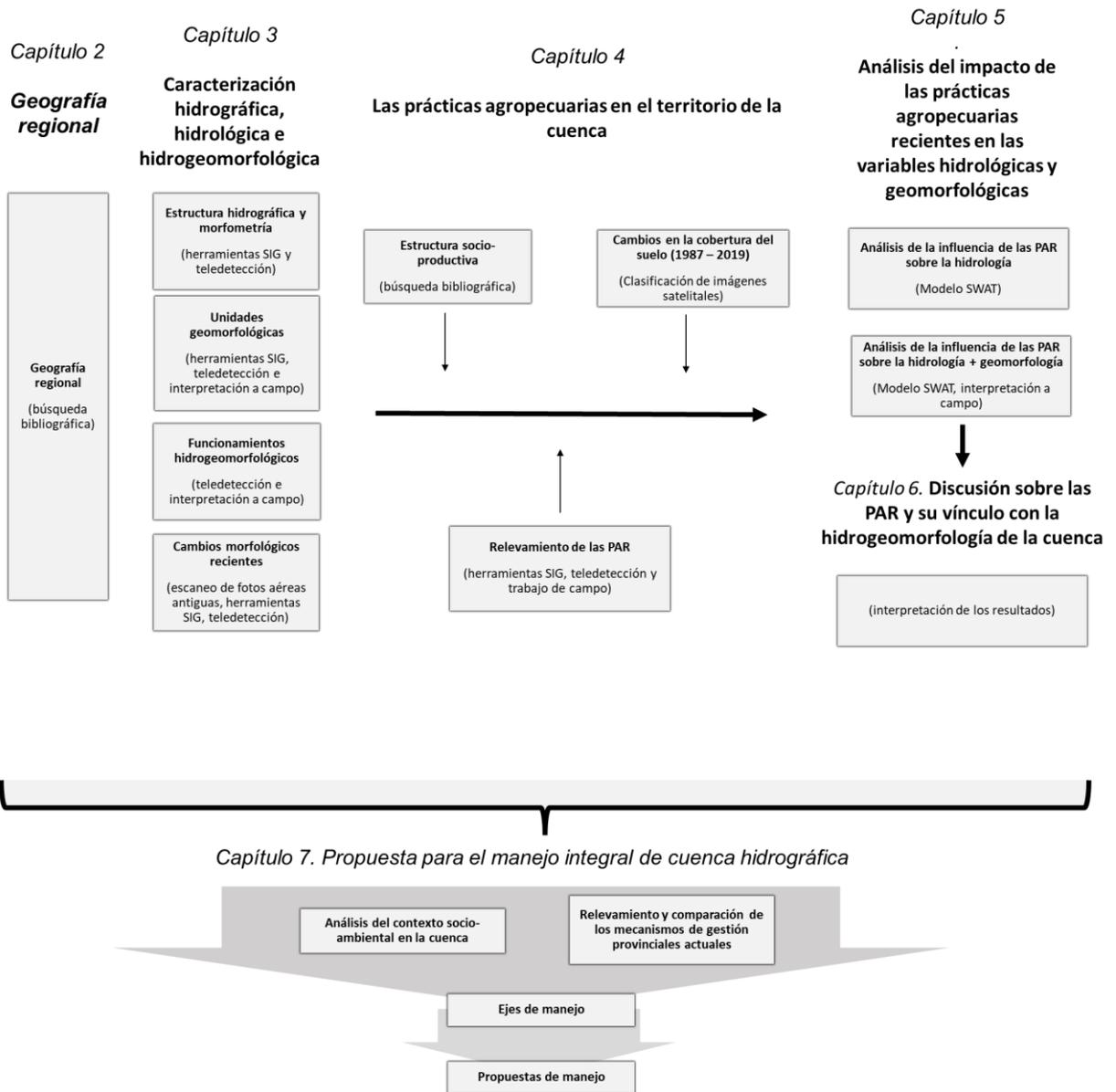


Figura 2. Estructura general de la tesis y métodos utilizados.

Capítulo 2. Geografía regional

2.1. Geología, geomorfología y relieve

El relieve macrorregional, es decir, las grandes planicies que conforman la cuenca sedimentaria del río Paraná, tienen como expresión regional tierras bajas en el noroeste de la provincia de Corrientes y tierras altas en su centro-sudeste, que se continúan hacia el sur en la provincia de Entre Ríos (figura 3).

Conocidas como “cuchillas”, las tierras altas de Corrientes y Entre Ríos han recibido varias otras terminologías: planicies del Pay Ubre (Bruniard, 1966), planicie de erosión oriental (Herbst y Santa Cruz, 1985; Escobar et al., 1996), lomadas entrerrianas y del sur de Corrientes (Aceñolaza, 2007) o planicies poligenéticas correntinas (Santa Cruz et al., 2019). Estas tierras forman una planicie remodelada por erosión hídrica, con cimas amplias y largas laderas. La estructura del zócalo rocoso influencia fuertemente el patrón de drenaje de esta superficie, particularmente en Corrientes (Rodríguez et al., 2021; Iriondo y Khroling, 2022). La elevación de las cimas se encuentra generalmente entre 70 y 80 m.s.n.m., alcanzando los 130 m.s.n.m. en el alto de Mercedes (Figura 2).

Depósitos de areniscas y coladas basálticas de fines del Mesozoico, ambas incluidas en el Grupo Serra Geral – Solari (Herbst y Santa Cruz, 1985) hacen la base estructural subsuperficial de estas tierras altas en su porción norte, precisamente en el alto mercedefío. Hacia el sur, se han acumulado por encima del Grupo Serra Geral depósitos terciarios de limolitas arenosas o arcillosas agrupadas bajo el nombre de Fm. Fray Bentos (Iriondo y Khroling, 2022). Esta aflora puntualmente en Corrientes, incluyendo zonas de los arroyos Ávalos y Barrancas (Aceñolaza, 2007).

En cuanto a las tierras bajas, hacen parte del mega abanico aluvial de los Esteros del Iberá y Ñeembucú (MAAP), formado por el río Paraná a partir de la regresión del mar argentino del continente (Ramonell, 2021). El gran río transitó por el territorio actual de la provincia de Corrientes durante el Plioceno y hasta el Pleistoceno tardío, cuyo último recorrido antes de tomar su eje actual norte-sur podría bien ser la faja hoy en día ocupada por los Esteros del Iberá y el río Corrientes (Orfeo, 2005). Esta faja en el MAAP toma el nombre de Depresión Poligenética del Iberá (Herbst y Santa Cruz, 1985) o depresión Iberana; es una planicie sin relieve frecuentemente anegada e inundada. Se divide en tres sectores: la depresión del Iberá al norte, la depresión del río Corriente en el medio y la depresión del Sarandí-Barrancas (DSB) en el sur (Herbst y Santa Cruz, 1985), de los cuales el último sector pertenece a la cuenca del río Guayquiraró.

A lo largo de este trabajo, se usarán las terminologías relieve de valles correntino-entrerrianos (RVCE) y mega abanico aluvial del río Paraná en los Esteros del Iberá y del Ñemmbucú (MAAP) para referirse a las tierras altas y bajas respectivamente, siendo las dos grandes regiones fisiográficas de la cuenca del río Guayquiraró. La DSB es la expresión local del MAAP.

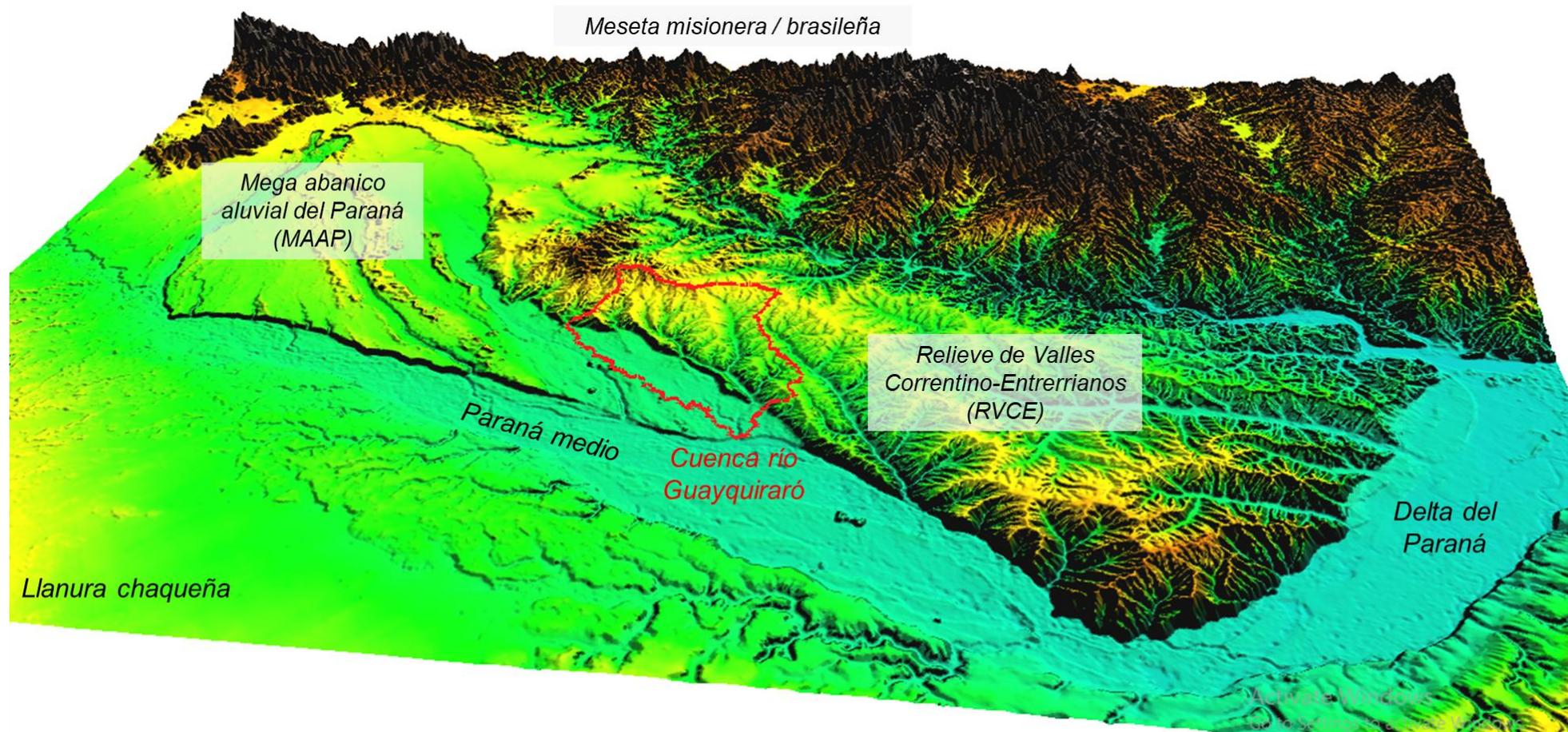


Figura 3. Relieve regional. Distorsión vertical 40x.

Los depósitos arenosos depositados por el río Paraná desde que empezó a divagar por el Noreste Argentino hasta la contemporaneidad se reúnen bajo el nombre de Fm Ituzaingó (Iriondo, 1980). El mapa geológico de la provincia de Corrientes (Herbst y Santa Cruz, 1995) muestra esta formación aflorando en fondos de valles de la cuenca del río Guayquiraró, tanto en las tierras altas como en las tierras bajas. Asimismo, estos depósitos deben encontrarse en toda la DSB a relativamente poca profundidad debajo de la Fm Toropí-Yupoí (la cual está indicada en superficie para la DSB en el mapa geológico).

Esa última formación, de poco espesor, se constituye de limos, arcillas y arenas finas, depositadas en ambientes pantanosos durante el Pleistoceno tardío sobre la casi totalidad de la provincia de Corrientes (Santa Cruz, Orfeo y Pereyra 2019) y, por ende, de una buena parte de la cuenca del río Guayquiraró. En Entre Ríos, la Fm Hernandarias comparte varias características, por lo cual se las suele considerar emparentadas lateralmente. A pesar de las similitudes, la Fm Hernandarias tiene una granulometría generalmente más arcillosa y es algo más antigua (Aceñolaza, 2007).

Finalmente, los rellenos aluviales holocenos y actuales de granulometría variada en la mayoría de los cursos de Entre Ríos han sido agrupados bajo el nombre de Fm La Picada (Iriondo, 1980), aunque esta formación no ha sido identificada en Corrientes.

Por lo mencionado, la reconstrucción de la historia geológica de la región y su cartografía presentan carencias importantes, principalmente en cuanto a la descripción de las formaciones cuaternarias en superficie. De hecho, la reciente contribución de Santa Cruz et al. (2020) no ha avanzado en resolver la confusión alrededor de la Fm Toropí-Yupoí, la cual es de por sí una combinación de depósitos que no han sido diferenciados claramente, además del problema de la delimitación y relación espacial con la Fm Hernandarias. La geología de superficie de la DSB también ha sido pobremente descrita.

2.2. Clima

Según la clasificación de Köppen, la región estudiada se divide entre un clima templado pampeano en el sur de Entre Ríos y un clima subtropical sin estación seca desde el norte de Entre Ríos hasta el norte de Misiones (Bustos et al., 2018).

En la región del río Guayquiraró, la temperatura media anual varía entre los 19°C al sur y los 20°C al norte (Figura 3). La temperatura máxima media mensual de enero es la más alta del año, con un valor por encima de 32°C tanto en la serie 1961-1990 como en la de 1981-2010 (Servicio Meteorológico Nacional, s.f.). A su vez, la mínima media mensual más baja ocurre en julio, con valores alrededor de 8°C en la serie 1981-2010 y ligeramente por encima de 8°C en la serie 1961-1990 (Servicio Meteorológico Nacional, s.f.).

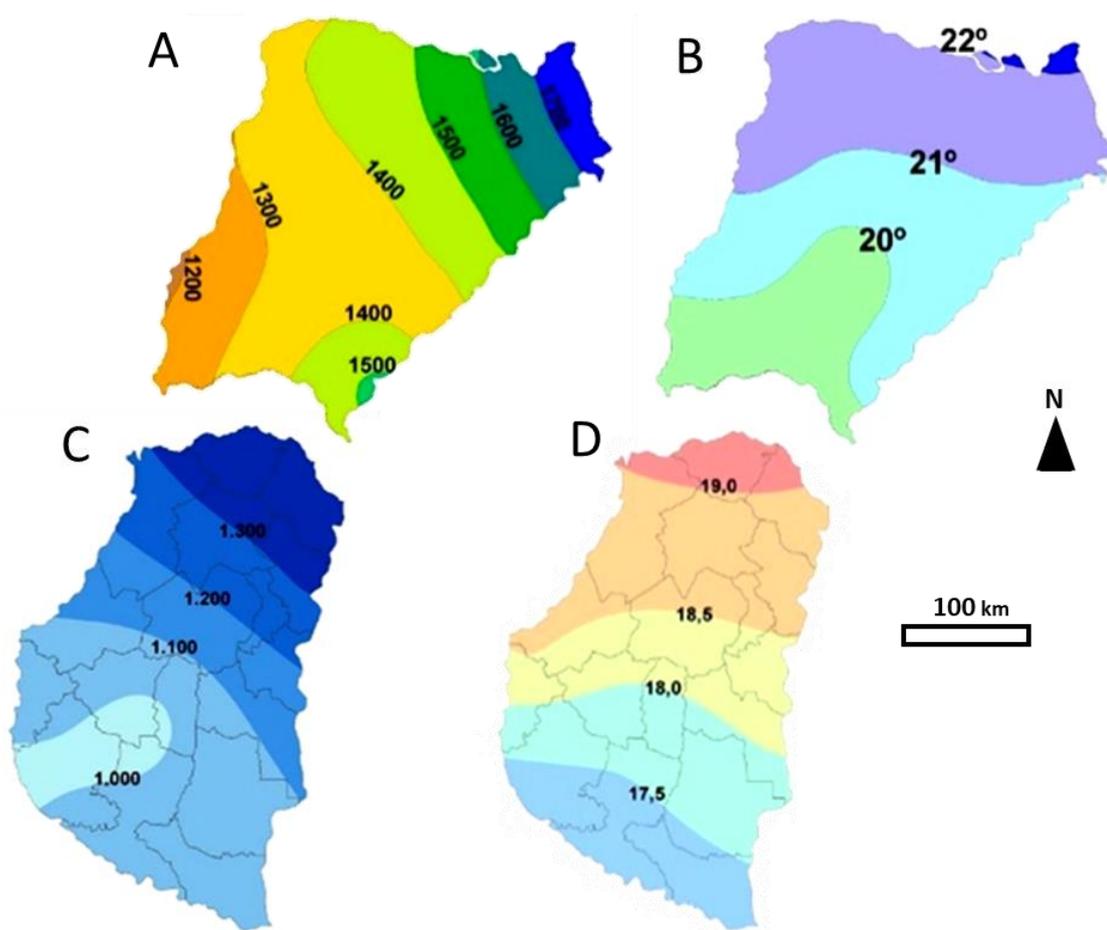


Figura 4. Mapas climáticos de las provincias de Corrientes y Entre Ríos. Precipitación media anual en Corrientes (mm), serie 1996-2006 (A). Temperatura media anual en Corrientes (°C), series 1996-2006 (B). Precipitación media anual en Entre Ríos (mm), serie 1971-2000 (C). Temperatura media anual en Corrientes (°C), series 1971-2000 (D). Adaptación de Panigatti et al. (2008) y Cruzate y Panigatti (2008).

Las precipitaciones medias anuales varían espacialmente entre los 1200 mm y 1400 mm anuales, con una tendencia al aumento hacia el este-noreste (Figura 4). Las precipitaciones

son abundantes en primavera y en otoño, mientras que son escasas en invierno y en verano, época en la cual las precipitaciones a menudo no superan la evapotranspiración (Escobar et al., 1996; Servicio Meteorológico Nacional, s.f.)

2.3. Hidrografía

En Corrientes y en Entre Ríos, el drenaje se orienta hacia el río Paraná en el oeste y hacia el río Uruguay en el este (Figura 5).

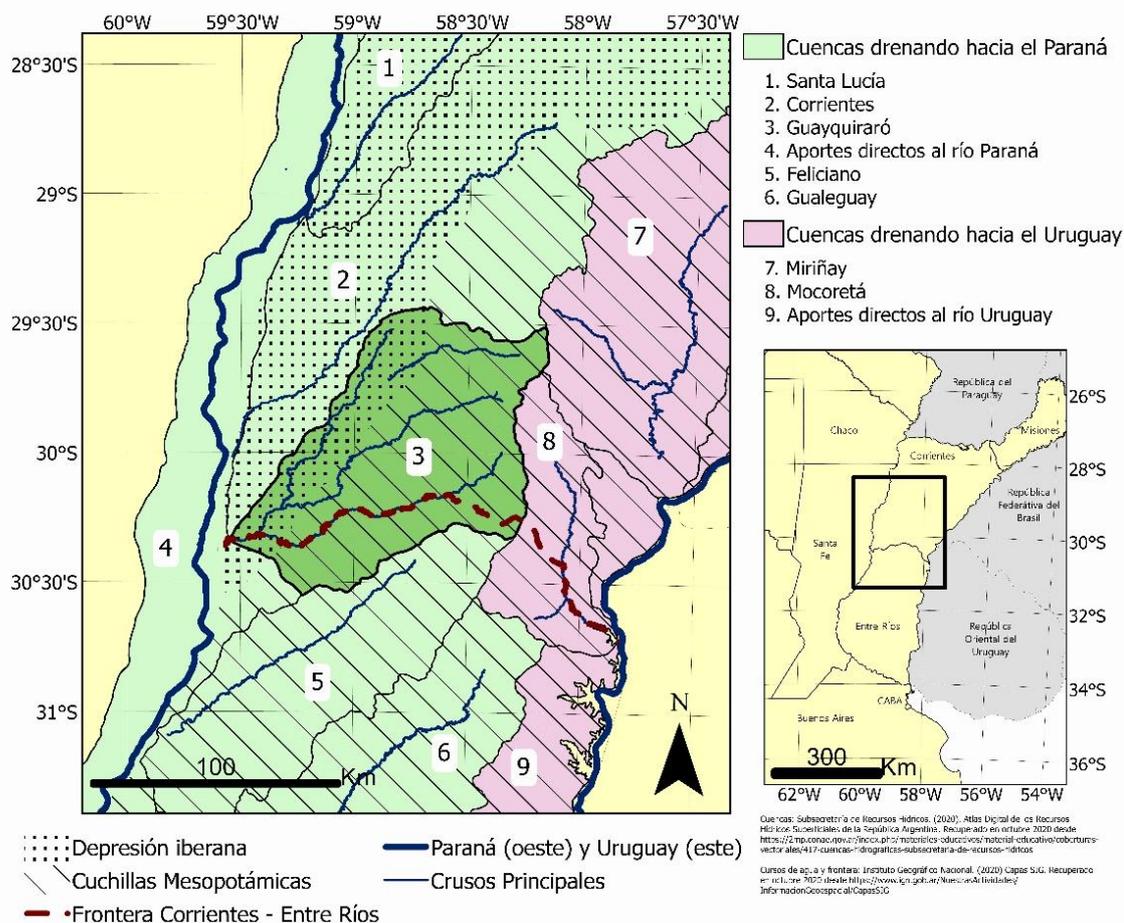


Figura 5. Cuencas hidrográficas y ríos principales en la región sur de Corrientes y norte de Entre Ríos.

El límite sur de la cuenca del río Guayquiraró se organiza a partir de tributarios cortos, de subcuencas de poca extensión, mientras que, de su lado norte, los tributarios tienen subcuencas más grandes, dándole a la cuenca asimetría, característica que comparte con la cuenca del río vecino Feliciano (Plan Mapa de Suelos Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos, 1986). Los límites norte y noreste de la cuenca se encuentran en las tierras altas de Corrientes donde se desarrollan, además de las del río Guayquiraró, las nacientes de varios ríos de la región: el río Mocoretá, el río Miriñay y el arroyo María Grande. En el noroeste y oeste, el

límite se encuentra en las tierras bajas del noroeste de Corrientes, con la presencia del río Corriente que llega a correr paralelo al arroyo Sarandí a solamente 13 km de distancia.

En las tierras altas, el patrón de drenaje ha sido descrito como dendrítico (Herbst y Santa Cruz, 1985; Giraut et al., 2019), rectangular a semirectangular (Plan Mapa de Suelos Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos, 1986) y angular y enrejado/angular en la cuenca del Yaguarí (Rodríguez et al., 2021). En la depresión iberana, Giraut et al. describen al drenaje como: "*un escurrimiento de tipo difuso, en manto, no encauzado, desarrollado sobre áreas de exiguo relieve que, ante situaciones extremas, puede comportarse como una única unidad*" (2019, p.18)

El paisaje hidrográfico se conforma de humedales de diversas características con una amplia toponimia para describir a estos últimos, la cual es por lo general poco coherente. Se rescatan en el siguiente párrafo algunas definiciones.

Los bañados de altura ocurren en las partes altas del relieve, algunas casi cóncavas, donde se acumula agua y a menudo se encuentra un microrelieve gilgai irregular y cubetas interconectadas (Minotti, 2017). Los esteros son "*humedales densamente vegetados por plantas palustres y acuáticas, con aguas permanentes o semipermanentes, que tienen un estrato orgánico turboso cubriendo el fondo*" (Neiff et al., 2004, p.27). Las cañadas, también ocasionalmente llamadas esteros, son humedales longitudinales originados por arroyos de cabecera que han sido colmatados con sedimentos (Minotti, 2017). Aguas abajo, los cursos principales ocupan anchos paleovalles donde se desarrollan extensas cañadas, esteros, bañados y bosques ribereños, a veces reunidos bajo el nombre de humedales fluviales (Minotti, 2017). Según la reciente clasificación de Rodríguez et al., (2021) en la vecina cuenca del arroyo Yaguarí, al este del río Guayquiraró, se encuentran humedales en la planicie de inundación (bosque en galería, pantano tras-albardón, cárcavas/surcos de erosión, paleocauces), en las cabeceras y tributarios menores (manantial, cauce) y en el corredor ribereño (bosque en galería). Los autores describen tres humedales antrópicos: las arroceras, los embalses para riego y los tajamares.

En los meses de otoño y primavera los cursos de agua suelen ser más caudalosos, mientras que en invierno y verano se encuentran en estiaje. En verano, las temperaturas altas generan una importante evapotranspiración que repercute en una sequía general en la cuenca. En invierno, son las bajas precipitaciones que producen una baja del nivel de agua. Abril y mayo son normalmente los meses con los caudales más altos en los ríos de la región, y agosto y septiembre los más bajos.

2.4. Suelos

Los suelos en la región son ricos en materia orgánica (Rubio et al., 2019), tienen una proporción alta de sedimentos finos y por lo tanto una baja permeabilidad (Plan Mapa de Suelos Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos, 1986; Solier et al., 2007). Transitan períodos de excesos de agua, ya sea por encharcamiento, anegamiento, inundación o por el efecto de napas colgadas (Ligier et al., 2001) además de que poseen características marcadas de hidromorfismo (Ligier et al., 2001; Solier et al., 2007; Rubio et al., 2019), *slickensides* y grietas, por la presencia de arcillas expandibles de tipo montmorillonita (Herbst y Santa Cruz, 1985; Ligier et al., 2001).

En el centro de la Mesopotamia argentina, según la cartografía del atlas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca y el INTA (1990), se encuentran principalmente cinco órdenes de suelos del sistema estadounidense de clasificación Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999): los molisoles, los vertisoles, los alfisoles, los inceptisoles y los entisoles.

Los molisoles son suelos especialmente fértiles, oscuros y de alta proporción de materia orgánica, típicos de llanuras herbáceas. En la cuenca son predominantes y se encuentran tanto en colinas suaves o en depresiones con fuerte influencia del agua (suborden de Aquolls).

Los vertisoles son suelos con alta tasa de arcilla expandible, que generan importantes grietas verticales durante la estación seca. Son dominantes en varias zonas de Corrientes y Entre Ríos (SAGyP – INTA, 1990), donde, específicamente en Corrientes, suelen estar asociados con el microrelieve gilgai (Escobar et al., 1996). Cuando se ubican en pendientes suelen experimentar erosión ya que su alto contenido de arcilla favorece el escurrimiento superficial (Solier et al., 2007). Junto con los molisoles, son los suelos más comunes en la cuenca del río Guayquiraró.

Los alfisoles son suelos caracterizados por tener un horizonte A delgado, pálido y pobre en estructura, seguido por un horizonte B oscuro, denso y arcilloso (Rubio et al., 2019). Son poco permeables, de superficies relativamente recientes y susceptibles al encharcamiento (Armando Alberto Tasi, 2009).

Finalmente, los entisoles e inceptisoles son órdenes de suelos parecidos, ya que ambos son poco desarrollados, generalmente no cuentan con un contenido importante de arcilla y se encuentran en el mismo tipo de ambientes. Su material parental no ha sido estable el tiempo suficiente para permitir su desarrollo pedogenético, ya sea por erosión o por sedimentación frecuentes. Los entisoles son dominantes en la eco-región de Esteros del Iberá según Ferrer y Panegatti (Inédito, 2010, en Panegatti, 2010).

2.5. Vegetación

A nivel ecológico según la clasificación de ecorregiones del territorio argentino, la cuenca del río Guayquiraró se reparte entre las ecorregiones de los Esteros del Ibéra y la del Espinal (Burkart et al., 1999; Matteucci et al., 2013). El Espinal es una región natural de llanura caracterizada por un bosque denso o abierto de especies xerofíticas. La parte del Espinal donde se encuentra la cuenca del río Guayquiraró, el complejo Cuchillas Mesopotámicas, se constituye de un estrato de árboles pequeños, un estrato intermedio de arbustos con cobertura de hasta 50 % y de un estrato herbáceo complejo según Matteucci et al., (2013)

La eco-región Esteros del Ibéra incluye el estero homónimo y otros menores, con paisajes de "lagunas, embalsados de vegetación flotante, esteros y bañados [...] y cordones arenosos" (Burkart, Bárbaro, Sánchez y Gómez, 1999). En el complejo de planicies del Este, en el cual se encuentra parte de la cuenca del río Guayquiraró, los patrones ecológicos son de sabanas inundables varios meses al año, bosques ribereños densos y parches de bosque denso a semi-denso (Matteucci et al., 2013)

A nivel fitogeográfico, la cuenca del río Guayquiraró entra en su gran mayoría en la unidad fisonómica-florística del "*Bosque de esclerófitas con Prosopis affinis (Nandubayzal y Selva de Montiel)*", basándose en Oyarzabal et al. (2017, p.48). Las esclerófitas son plantas de hojas duras adaptadas a largos periodos de sequía, que suelen ser arbustos o arboles pequeños.

En el bosque esclerófila, se definieron las comunidades del "Bosque xerofítico abierto de P. affinis" y "Sabana abierta con gramíneas megatérmicas o mesotérmica e individuos de P. affinis o Acacia caven". El ñandubay (*P. affinis*) es la especie emblemática, acompañada por el quebracho blanco (*Aspidosperma quebrachoblanco*), el tala (*Celtis ehrenbergiana*) y el algarrobo negro (*Prosopis nigra*). Además, Oyarzabal et al. mencionan los bosques de galería con especies paranaenses en las orillas de los cursos fluviales (2017).

Al noroeste del bosque de esclerófitas, cerca de la localidad de Esquina en Corrientes, se encuentra la unidad "Sabana de Andropogon lateralis y Paspalum notatum", donde se encuentran palmares (*Butia yatay*), bosques de higrófitas en albardones antiguos, herbáceos palustres en esteros y bañados, bosques en galerías en las orillas de los cursos y las especies arbóreas del bosque xerofítico abierto (Oyarbazal et al., 2017).

A las descripciones ecológicas se suman los trabajos de Ligier et al. (2001, 2012) y Escobar et al., (1996) para describir, a nivel espacial local y en grandes rasgos, a las comunidades de

vegetación y sus relaciones con la topografía. Se presentan dos esquemas tipo a modo de síntesis, tanto en las tierras altas (Figura 6) como en la DSB (Figura 6).

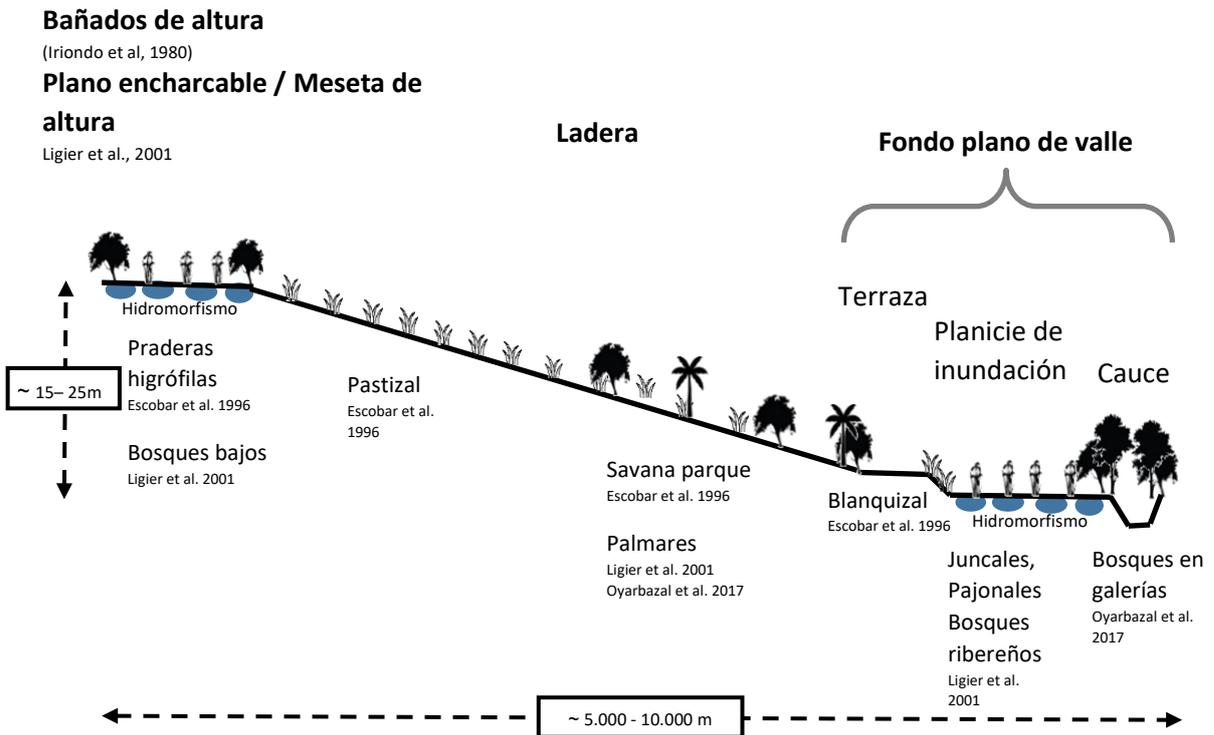


Figura 6. Perfil transversal con tipos de vegetación en el relieve de valles del sur de Corrientes y norte de Entre Ríos, según toponimia de varios autores.

En la Figura 5, la topografía es fundamental en la organización de las comunidades de vegetación, razón por la cual se presenta un perfil transversal. En la Figura 6, la casi ausencia de relieve hace que la topografía pierda relevancia, por lo cual se optó por un esquema en planta. Algunos elementos hidrogeomorfológicos presentes en las figuras serán desarrollados más profundamente en el capítulo siguiente. En ambos esquemas, no se contemplan las modificaciones antrópicas (canalizaciones, tajamares, etc.).

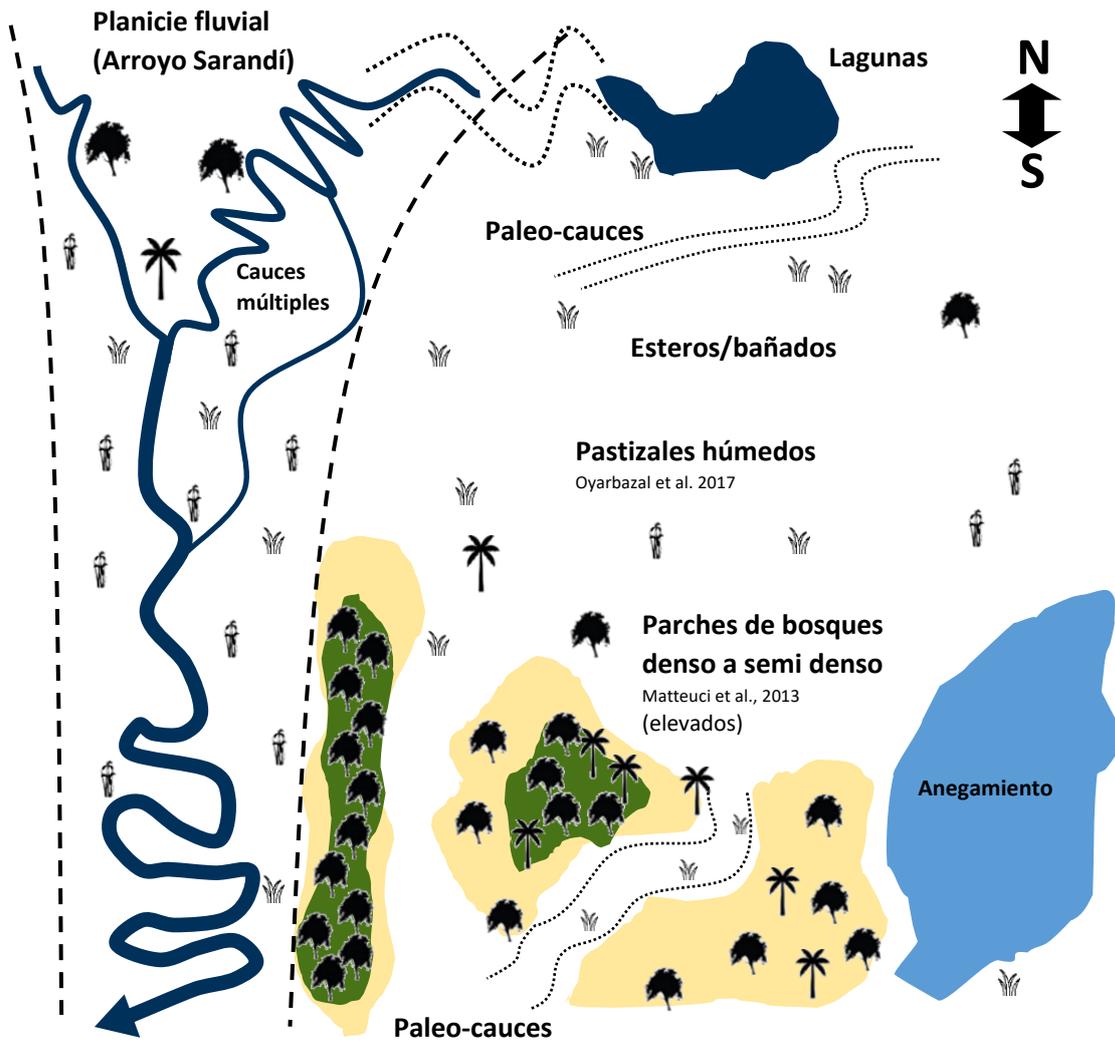


Figura 7. Plano tipo de ambientes físicos y vegetación en la depresión del Sarandí-Barrancas, centro sur de Corrientes, según toponimia de varios autores.

2.6. Demografía y socioeconomía

Los habitantes de la región se reparten en ciudades pequeñas, en localidades rurales, en parajes rurales o de manera dispersa en el territorio. La Figura 8 muestra los diferentes departamentos incluidos y las localidades en la cuenca, o cercanas a ella. Sauce es el único departamento integralmente parte de la cuenca del río Guayquiraró y, por lo tanto, se usan los datos de este departamento para aproximar la situación sociodemográfica en la cuenca.

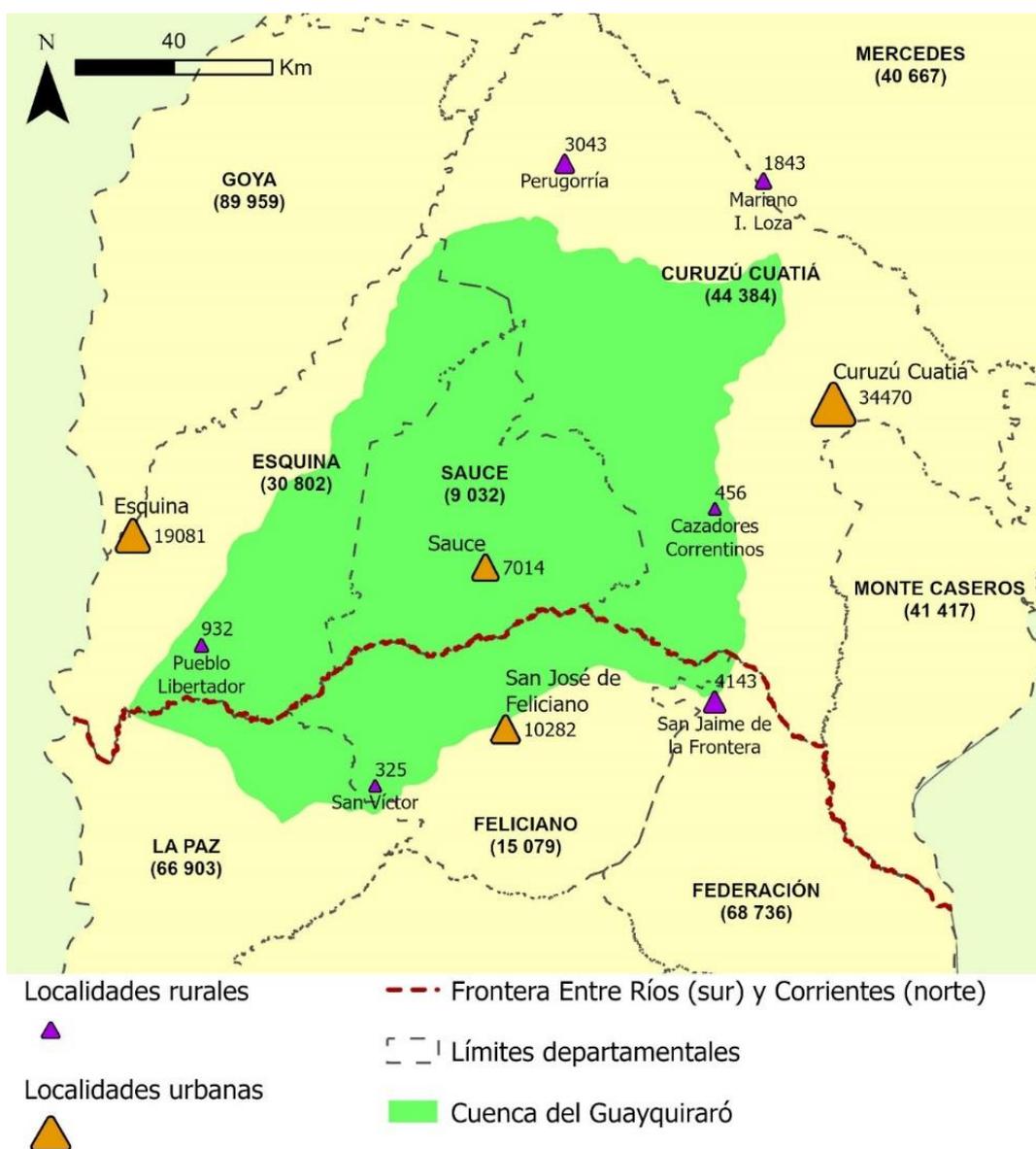


Figura 8. Situación demográfica en la cuenca del río Guayquiraró y sus cercanías según el censo nacional de la República Argentina de 2010 (INDEC Argentina, 2010).

Al comparar los datos del departamento de Sauce con los otros departamentos de la región, es el menos poblado, con solamente 9273 habitantes en 2010 (Plan Estratégico Participativo

Corrientes 2030). La densidad poblacional en el departamento de Sauce es de 5,3 personas/km² ¹.

Sauce y San José del Feliciano son las dos únicas ciudades dentro de los límites topográficos de la cuenca. Se suman las localidades rurales de Pueblo Libertador y Cazadores Correntinos en Corrientes, San Víctor y San Jaime de la Frontera en Entre Ríos. El norte de la cuenca tiene particularmente poco habitantes. A pesar de la baja densidad de población, la presencia de habitantes en todo el territorio de la cuenca se aprecia al recorrerla.

Las estadísticas de necesidades básicas insatisfechas (NBI) del INDEC muestran el problema de la pobreza en la cuenca del Guayquiraró. En 2010, el porcentaje de hogares con por lo menos una NBI en el departamento de Sauce era de 14,4 %, justo por debajo del promedio provincial (15,1 %). En Curuzu Cuatiá y en Esquina, el porcentaje llega a 12,9 % y 17,9 % respectivamente. En Entre Ríos, el departamento de Feliciano es uno de los más pobres con 15,6 % de hogares con NBI en 2010, mientras que La Paz y Federación tienen 12,4 % y 10,8 % respectivamente. Por lo tanto, todos los departamentos están por encima del promedio provincial entrerriano de 8,0 %. En 2009, 67 % de la población del centro-sur de Corrientes alcanzó a terminar el nivel primario escolar y solamente 32 % el nivel secundario (Plan Estratégico Participativo Corrientes 2030, 2021).

A nivel cultural, la caza, la pesca y la tala de leña son actividades tradicionales que siguen teniendo mucha relevancia en la población local (Miceli, 2015). La falsa nutria, el carpincho, el curiyú, el yacaré y una amplia gama de aves y peces son cazados para el consumo propio y la venta. Por lo tanto, la calidad y la integridad del agua y de los ecosistemas naturales, los hábitats de dichas especies tienen mucha importancia en la supervivencia, la sostenibilidad económica y la cultura de los habitantes locales (Miceli, 2015).

Relacionado a diferentes factores, como el avance de los cultivos forestales y la pérdida de accesibilidad en tierras utilizadas para la pesca y la caza, ha habido un éxodo hacia pueblos y ciudades por parte de la población rural en Corrientes (Miceli, 2015). El éxodo fue comprobado a través de las discusiones con pobladores locales en nuestras visitas al campo, sumándose como factores la falta de oportunidades laborales y la baja en rendimiento para productores de pequeña escala.

¹ A modo de comparación, en Villaguay, centro de Entre Ríos, la densidad poblacional es de 7,8 personas/km² y en Corrientes Capital, la densidad es de 813,5 personas/km² (INDEC Argentina, 2010).

Capítulo 3. Caracterización hidrográfica, hidrológica e hidrogeomorfológica

3.1. Caracterización hidrográfica e hidrológica

3.1.1. Aspectos metodológicos

a) Definición de las regiones fisiográficas

Se delimitaron el RVCE y el MAAP por dibujo en pantalla en un SIG, utilizando como referencia el MDE a escala 1:100.000. La nitidez de la frontera entre las dos regiones fisiográficas permitió la realización de esta tarea con suficiente precisión.

b) Definición de los cauces

Se construyó una capa de cauces basándose en un mosaico de imágenes satelitales. Las imágenes usadas fueron tomadas entre el 1 de octubre 2019 y el 28 de febrero 2020 desde el satélite Sentinel 2A, con resolución espacial de 10 m. Se digitalizaron los cauces por dibujo en pantalla en un SIG, visualizada a escala 1:70.000.

En el RVCE se consideraron los cauces a partir de aquellos de tercer orden, que son los cursos de agua visibles a tal escala, más las líneas de bosques ribereños en los fondos de valles (impiden ver la superficie, pero indican la presencia de un curso de agua). Los valles sin curso de agua (cañadas) no fueron mapeados. En el MAAP se consideraron todos los cauces visibles, aún si fueran de orden 1.

El arroyo Barrancas y el río Guayquiraró recibieron denominaciones *ad hoc* para facilitar las descripciones (**Figura 9**): el Barrancas superior, de su nacimiento hasta la salida del RVCE; el Barrancas medio, de su salida del RVCE hasta su unión con el Sarandí; el Barrancas inferior, de su unión con el Sarandí hasta su desembocadura con el Guayquiraró; el Guayquiraró superior, de su nacimiento hasta la salida del RVCE; el Guayquiraró medio, de su salida del RVCE hasta su unión con el Barrancas, y el Guayquiraró inferior, de su unión con el Barrancas hasta su desembocadura en la llanura aluvial del Paraná.

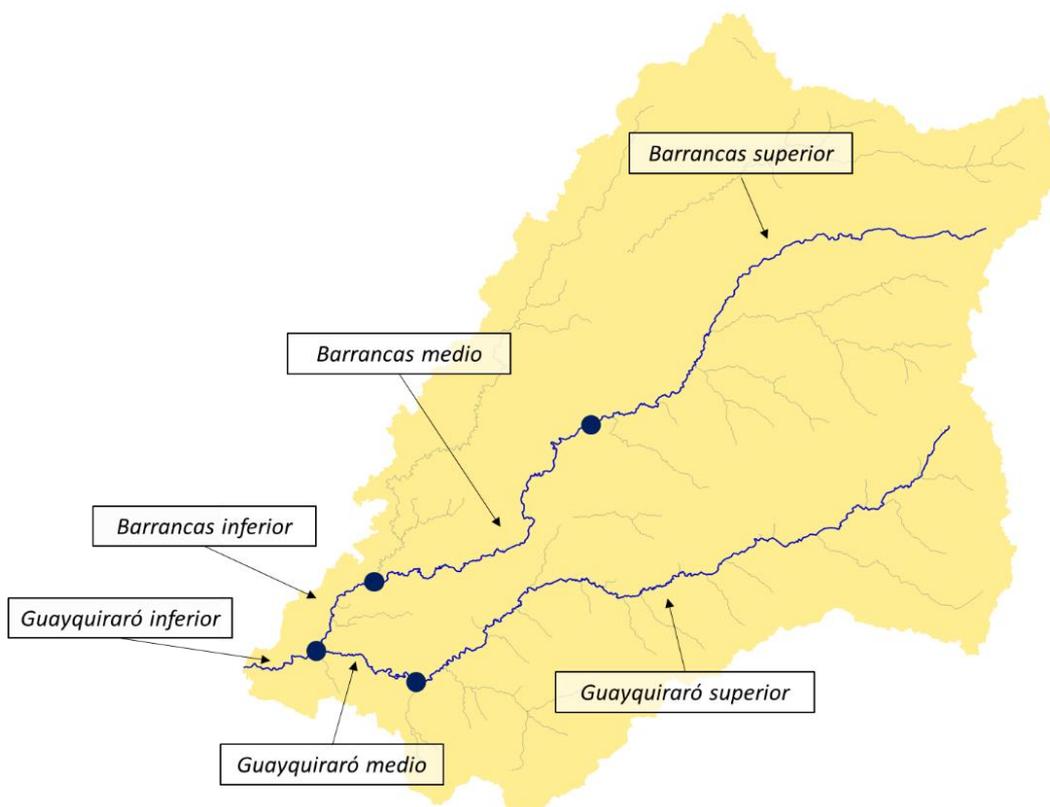


Figura 9. Segmentaciones ad hoc del río Guayquiraró y del arroyo Barrancas.

c) Definición de las cuencas

Se delimitó la cuenca hidrográfica del río Guayquiraró de forma automatizada utilizando el plugin *ArchHydro* del programa ArcGIS y el modelo digital de elevación Ar-MDE 2.0 del IGN y las capas *corrientes de agua permanentes e intermitentes* del IGN. Se definieron además las subcuencas principales de la cuenca, llamadas sistemas hidrográficos (SH). Para establecer los cierres de los SH, se tomaron en cuenta la conformación de la red hídrica y las dos regiones fisiográficas. Se los delimitaron en el SIG según la misma metodología que para la cuenca entera².

Los detalles de esta metodología, incluyendo las herramientas geomáticas usadas pueden consultarse en el anexo I.

d) Historial y análisis de precipitaciones y caudales en la cuenca

Datos históricos de varias estaciones meteorológicas e hidrométricas en la región de la cuenca del río Guayquiraró fueron aprovechadas para caracterizar el régimen pluviométrico e

² El SH del Sarandí-Barrancas medio fue modificado manualmente posteriormente a su delimitación para retirar los SH del Ávalos y del Barrancas superior.

hidrológico de dicha cuenca. Los detalles en la metodología para el procesamiento de estos datos se pueden consultar en el anexo II.

3.1.2. Topografía

En la topografía se destacan las dos regiones fisiográficas: la del MAAP y la del RVCE (Figura 10). En el RVCE, las pendientes son cercanas al 1 % en los interfluvios locales y mayores a 1,3 % en zonas específicas. Las divisoras entre las subcuencas son particularmente planas.

Como parte de la cuenca del Guayquiraró, el MAAP es una franja de aproximadamente 130 km de largo por 30 km de ancho, en dirección noreste–sudoeste, de baja elevación y de relieve muy escaso. Las pendientes son casi todas menores a 0,4 %.

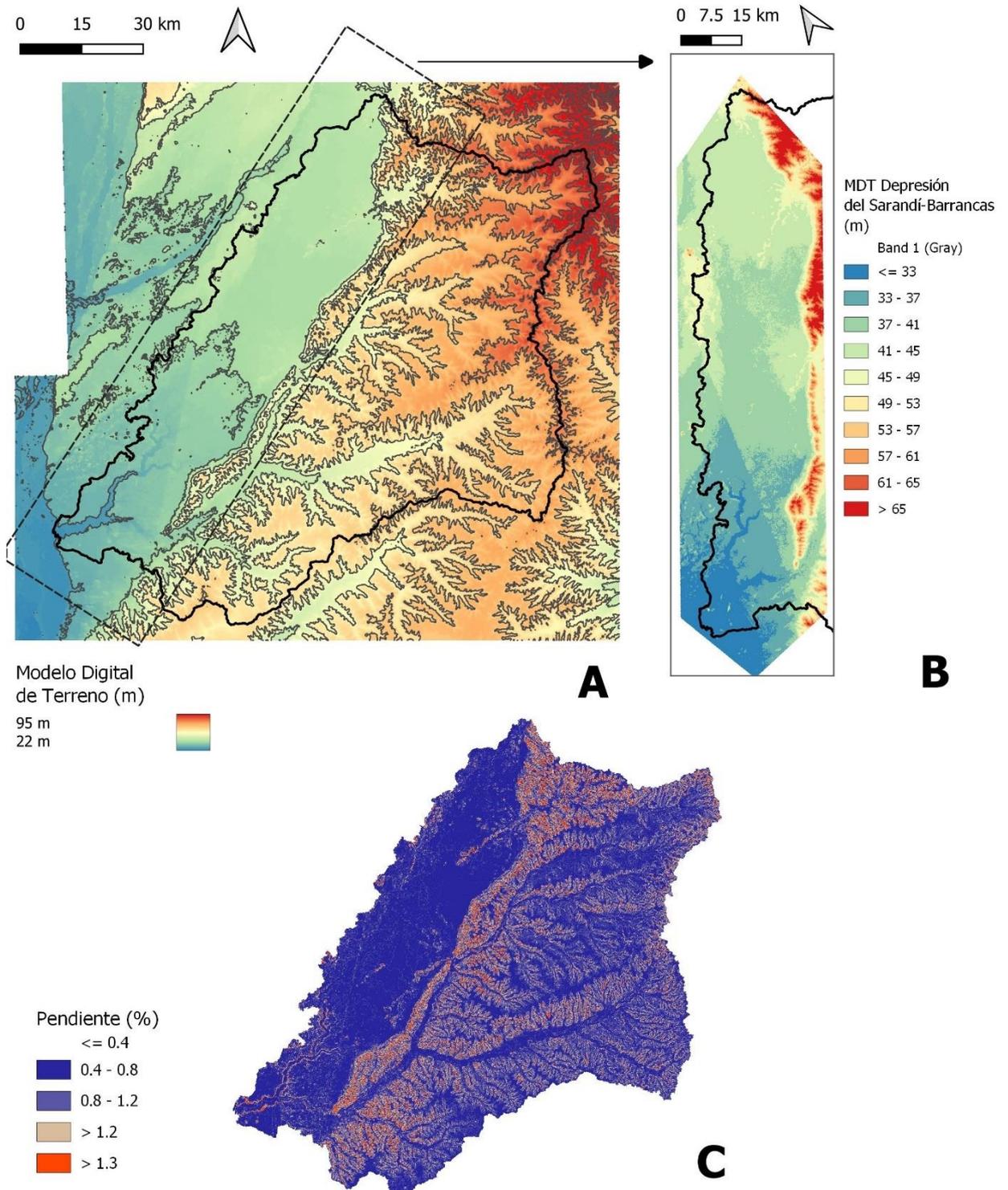


Figura 10. Topografía de la cuenca del río Guayquiraró. A) Modelo Digital de Terreno (MDT) adaptado del MDE-Ar v2.0 del IGN para la cuenca del río Guayquiraró. B) MDT específico a la DSB. C) Pendientes en la cuenca calculadas a partir del MDT divididas en 4 categorías discretas.

La Figura 11 muestra la ubicación de los 7 perfiles topográficos (Figuras 12 y 13) de la cuenca.

El perfil A muestra que la zona al sur del río Guayquiraró es menos elevada que la zona norte. Los perfiles B y C muestran la asimetría marcada en la cuenca, provocada por el contraste entre el MAAP y el RVCE. Los ríos transitan fondos de valles amplios y llanos y los interfluvios son crestas estrechas o planicies. En el MAAP se pueden distinguir elementos geomórficos como la planicie fluvial del arroyo Sarandí en el perfil C y la planicie multilagunar y el abanico aluvial del Barrancas en el perfil B (ver sección “Unidades geomorfológicas” en 3.3.2).

El perfil D muestra el perfil longitudinal del río Guayquiraró, escalonado en su parte alta y después relativamente constante hasta su desembocadura en el MAAP, donde la pendiente se atenúa gradualmente. El perfil E del Barrancas es recto y gradualmente atenuado en el MAAP. El perfil F del Ávalos es levemente escalonado y claramente convexo. Finalmente, el perfil G del Sarandí es convexo y presenta un desnivel mucho menor a aquél de los otros tres ríos, y es particularmente llano en sus 70 primeros kilómetros.

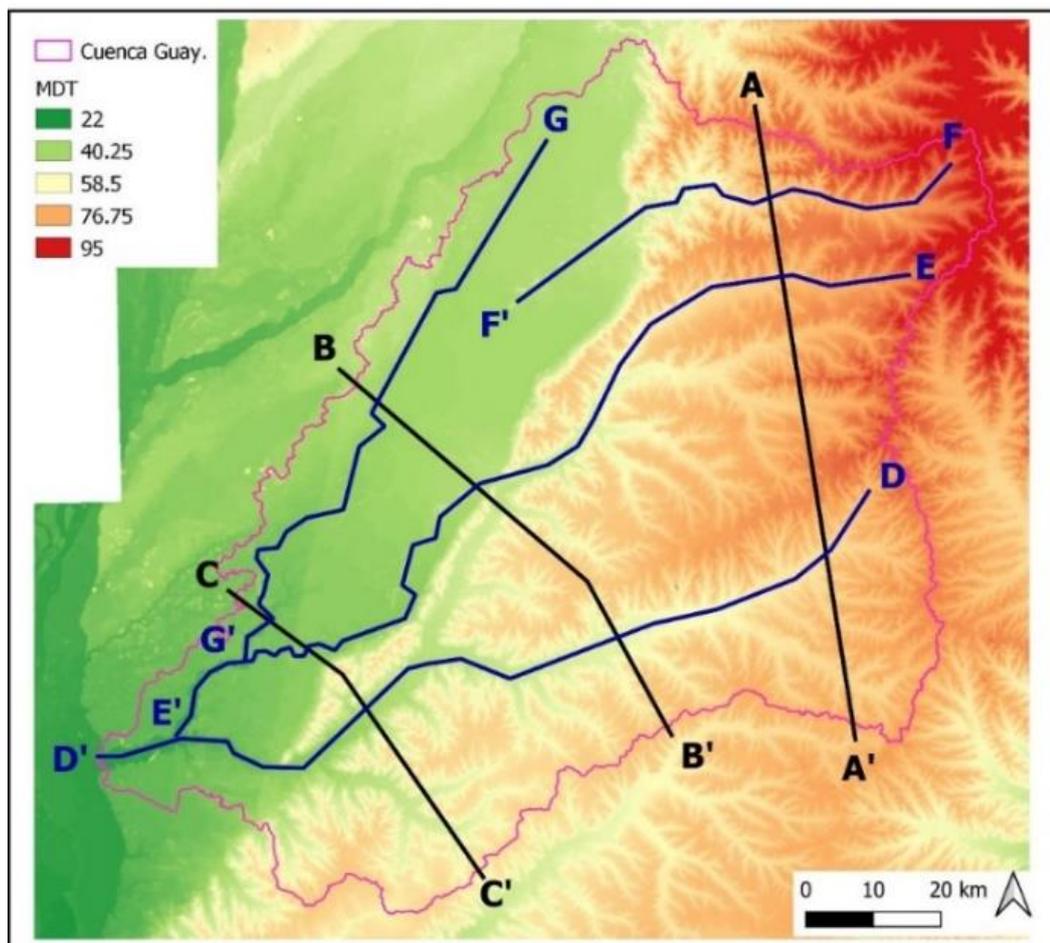


Figura 11. Ubicación en planta de los perfiles topográficos de las Figuras 12 y 13.

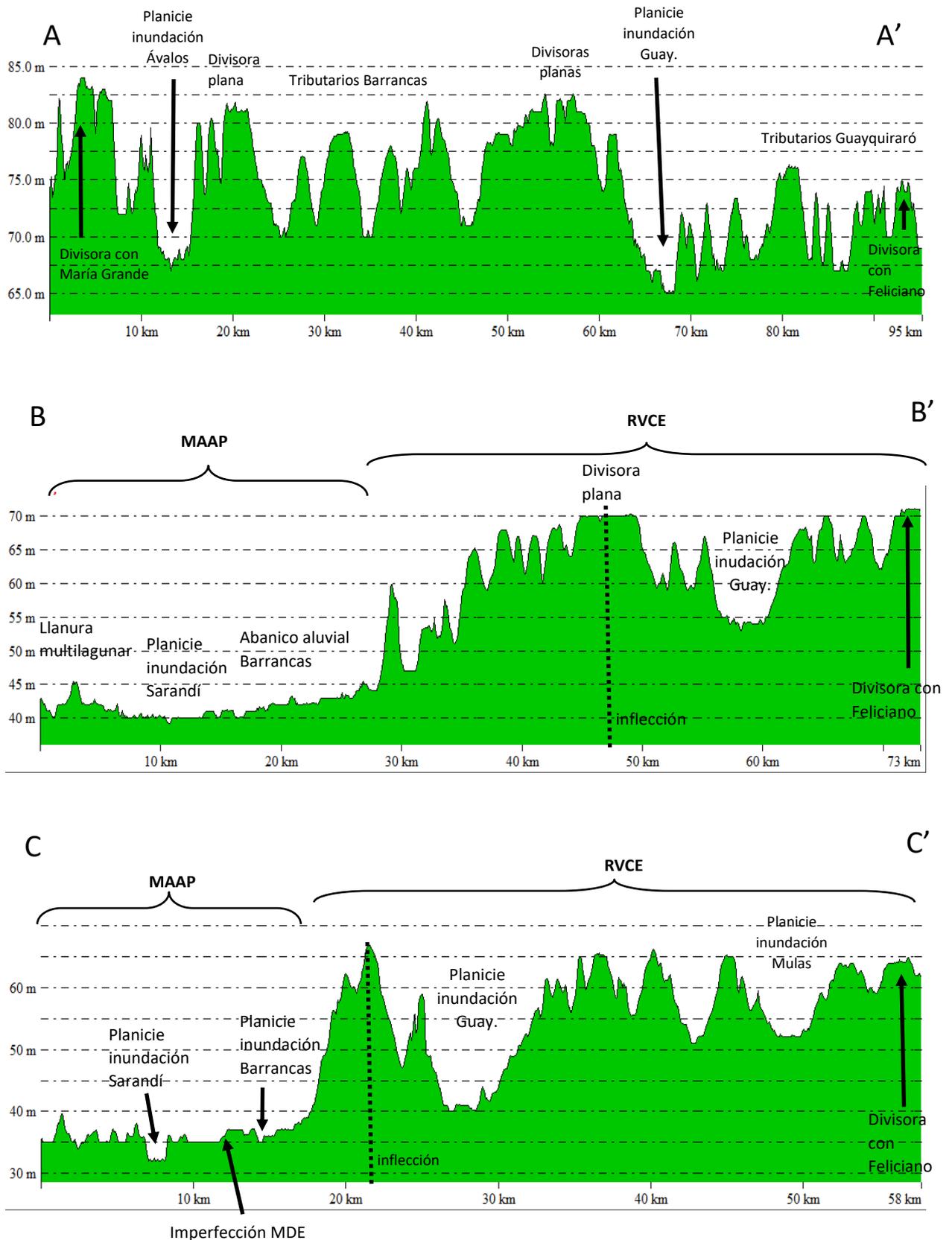


Figura 12. Perfiles topográficos transversales sobre el Modelo Digital de Terreno (MDT). Los perfiles están exagerados verticalmente. Se consigna en ellos información geomorfológica propia de la sección 3.2.

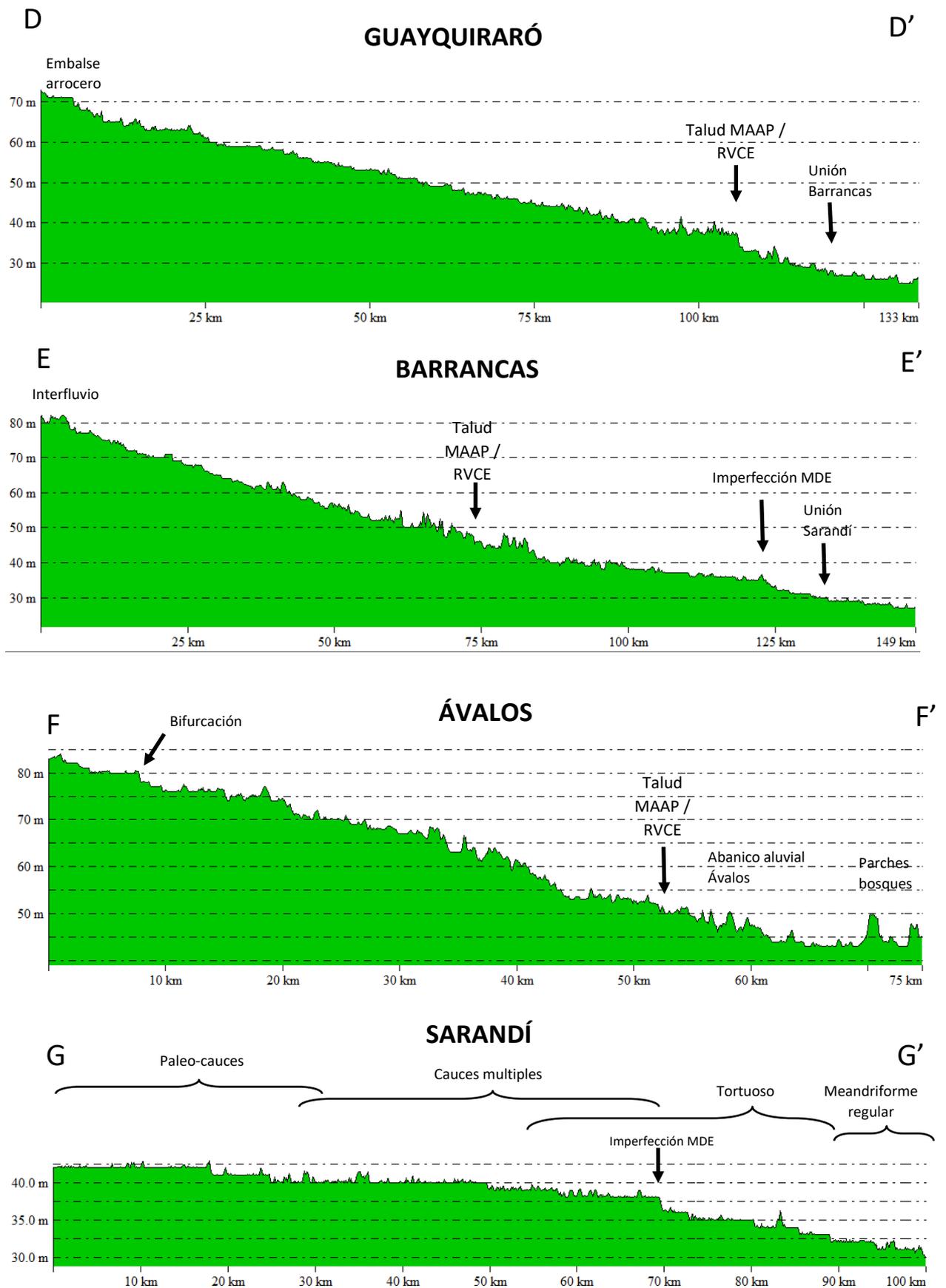


Figura 13. Perfiles topográficos longitudinales sobre el Modelo Digital de Terreno (MDT). Los perfiles están exagerados verticalmente. Se consigna en ellos información geomorfológica propia de la sección 3.2.

3.1.3. Sistemas hidrográficos (SH)

Los ríos y arroyos Guayquiraró alto, Barrancas alto y Ávalos nacen en el RVCE a partir de varios valles tributarios (Figura 14). Los tributarios más importantes del Barrancas alto y del Guayquiraró alto se encuentran en su orilla izquierda, mostrando una asimetría marcada en la red hídrica.

El SH del Sarandí-Barrancas se desarrolla exclusivamente en el MAAP, si no se consideraran los pequeños valles sobre la transición topográfica entre las dos regiones fisiográficas mayores de la cuenca. El arroyo Sarandí tiene muy pocos tributarios, siendo el principal el arroyo Salinas.

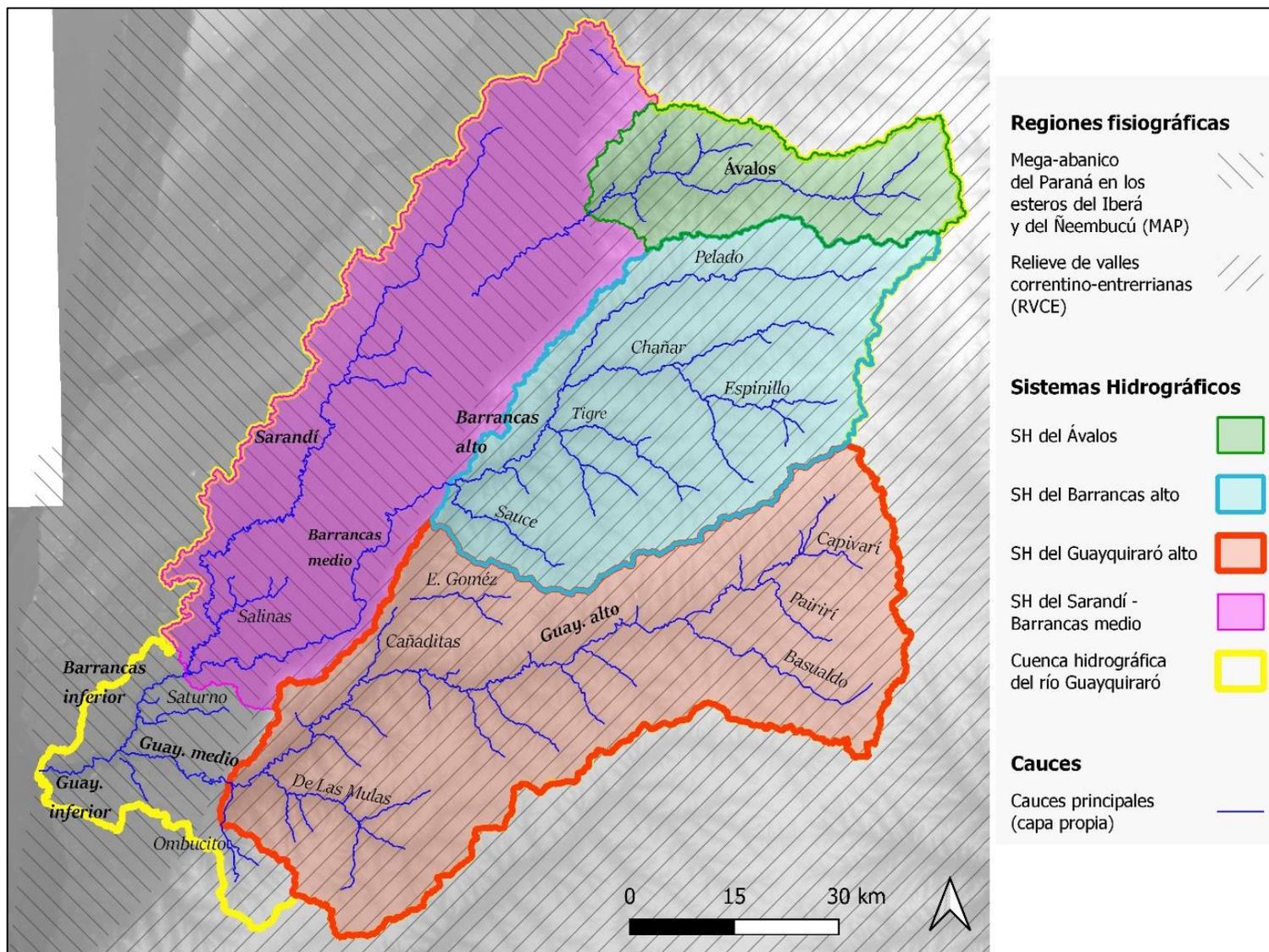


Figura 14. Mapa hidrográfico de la cuenca del río Guayquiraró

3.1.4. Morfometría y jerarquía

La Figura 15 y la Tabla 1 presentan la jerarquía entre los cauces de la cuenca según el sistema de Strahler, así como las características morfométricas de la cuenca y de los SH.

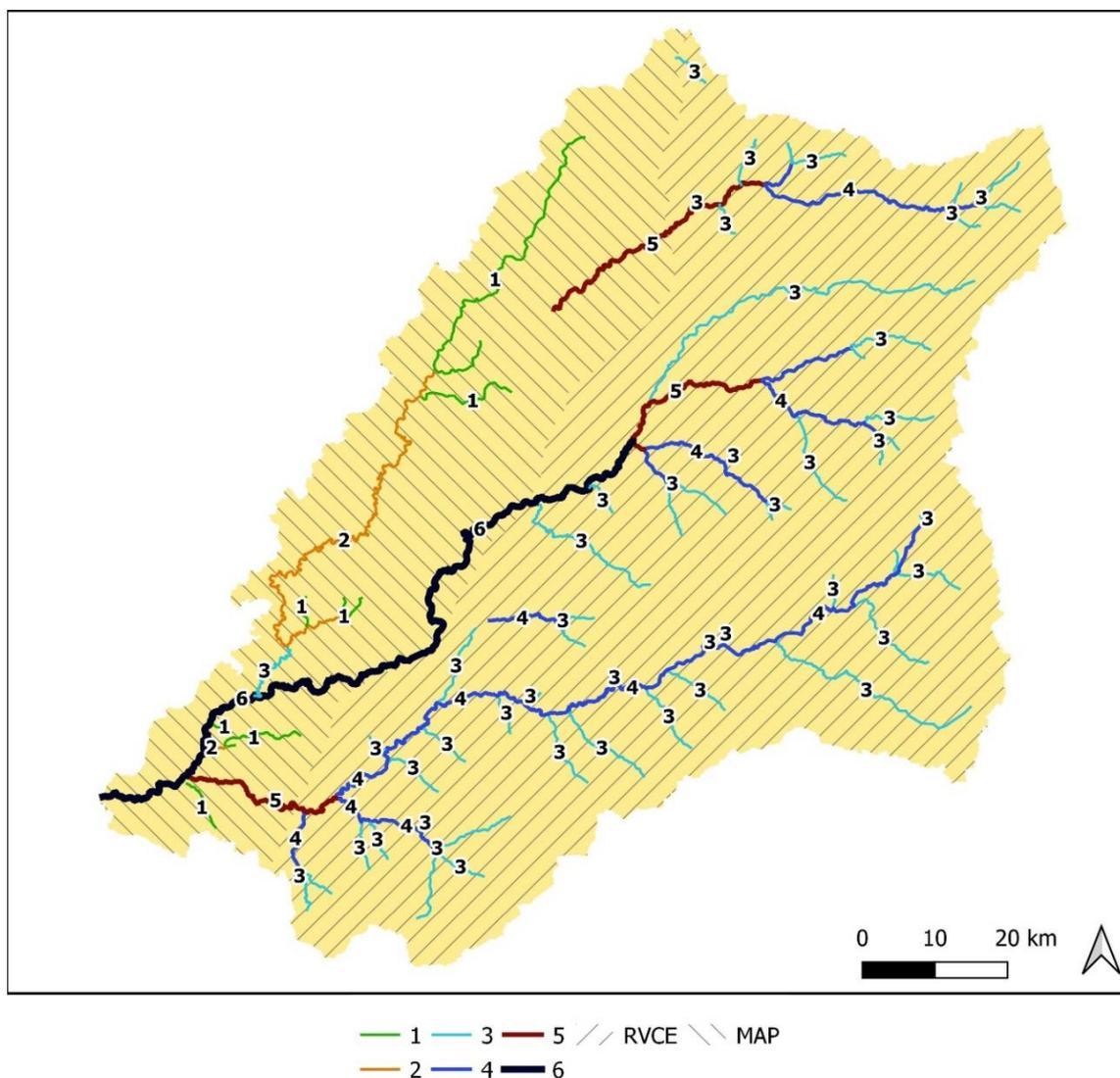


Figura 15. Jerarquía de la red hidrográfica según el sistema de Strahler (a partir de cauces de orden 3 en el RVCE y de orden 1 en el MAAP).

El SH del río Guayquiraró superior es el más grande y el más ancho. Los parámetros de forma muestran que el SH del Barrancas superior, con su forma oval redonda, es propenso a tener un tiempo de concentración menor. La cuenca entera tiene también una forma bastante regular que favorece la concentración del agua, mientras que la forma del SH del Sarandí-Barrancas desfavorece la concentración.

En términos de relieve, el Ávalos es el único SH que supera el 1 % de pendiente media; el Guayquiraró y el Barrancas son muy similares, mientras que el SH del Sarandí-Barrancas es notablemente más llano. La cuenca entera tiene un relieve plano.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Guayquiraró y sus sistemas hidrográficos.

			Cuenca entera (Guayquiraró)	SH Guayquiraró superior	SH Barrancas superior	SH Avalos	SH Sarandí-Barrancas medio
Parámetros de forma	Superficie	km ²	9399	3153	2114	763	2716
	Perímetro*	Km	510	304	210	140	300
	Longitud axial	Km	159	103	78	54	110
	Ancho promedio	Km	59	31	27	14	25
	Factor de forma (IF)	-	0.37	0.30	0.35	0.26	0.22
	Índice de compacidad de Gravelius	-	1.48	1.53	1.29	1.43	1.62
	Forma de la cuenca	-	oval redonda	oblonga	oval redonda	oval redonda	oblonga
Parámetros de relieve	Elevación máxima	m.s.n.m.	107	89	105	107	81
	Elevación mínima	m.s.n.m.	25	37	46	49	30
	Desnivel	m	82	52	59	58	51
	Pendiente media	%	0.67	0.81	0.78	1.15	0.34
	Relieve**	-	plano	plano	plano	suave	muy plano
	Coefficiente de rugosidad	-	0.62	0.40	0.43	0.40	0.44
Parámetros de drenaje	Longitud (cauce principal)	Km	205	141	94	62	153
	Orden	-	6	5	6	5	6
	Pendiente media del cauce principal	%	0.26	0.25	0.39	0.53	0.0065
	Densidad de drenaje	km/km ²	> 0.131	> 0.130	> 0.139	> 0.144	0.116

* Medido a escala 1 :500.000

**Según la clasificación de Lopéz de Llano, 1998 (en Gaspari et al., 2013)

La cuenca entera y el SH del Guayquiraró superior tienen cauces principales con una pendiente media casi igual (0,26 % y 0,25 %); el Ávalos es dos veces más inclinado (0,53 %); el Barrancas alto se ubica entre los dos (0,39 %) mientras que el Sarandí se destaca completamente, pues es aproximadamente 50 veces más llano que los otros cauces (0,0065 %).

3.1.5. Historial de las precipitaciones y de los caudales líquidos

En la cuenca entera, las precipitaciones anuales varían desde 750 mm en 1995 hasta ca. 2000 mm en 1987 y en 1998; la subcuenca de Paso la Llana, el noroeste de la cuenca, recibe a largo plazo más precipitaciones que la subcuenca de Paso Juncue, el sureste de la cuenca, pero cuenta también con una mayor variabilidad (Figura 17). En 1998 las precipitaciones alcanzaron el máximo de 2265 mm en la subcuenca de Paso la Llana, mientras que en la subcuenca de Paso Juncue el máximo fue de 1934 mm en 1986.

A grandes rasgos, se identifican periodos húmedos (1990-1994, 2000-2003, 2014-2019) y periodos secos (1980-1989, 1995-1999, 2004-2013), aunque varios años específicos no coinciden con estos ciclos (1986, 1998 y, en menor medida, 2009, 2017 y 2018).

No se observa una tendencia global al alza o la baja en las precipitaciones entre 1980 y 2019.

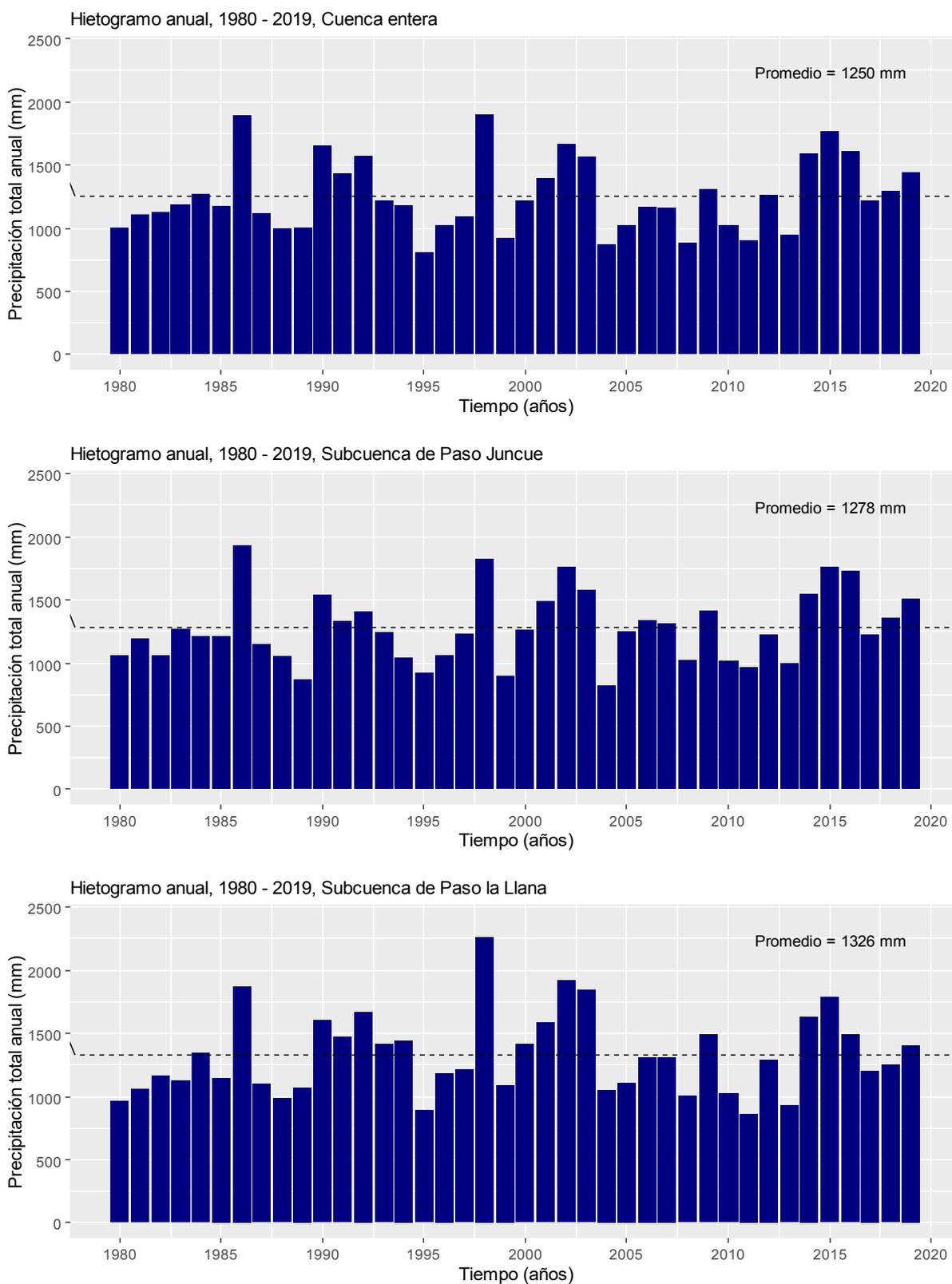


Figura 16. Hietogramas a escala anual (1980-2019); cuenca entera del río Guayquiraró (arriba), subcuenca de Paso Juncue (Guayquiraró superior) (centro), subcuenca de Paso la Llana (Barrancas-Sarandí-Ávalos) (abajo). Las líneas punteadas son los promedios de precipitaciones anuales. Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.)

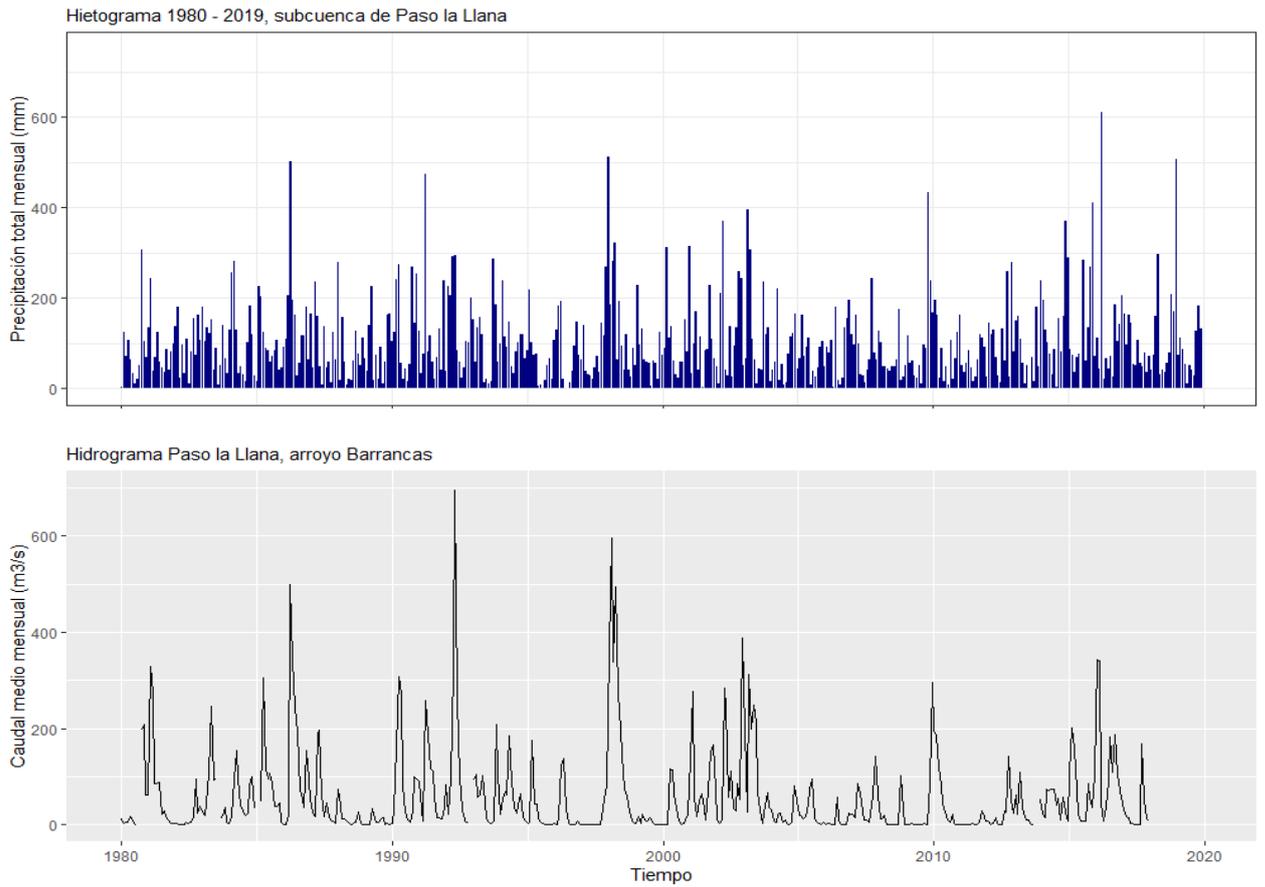


Figura 17. Hietograma mensual de la subcuenca Paso la Llana (arriba) e hidrograma mensual promedio en Paso la Llana (abajo). Faltan registros de los meses de septiembre 1980, agosto 1983, enero y febrero 1985, diciembre 1992 y de octubre y noviembre de 2013. Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.)

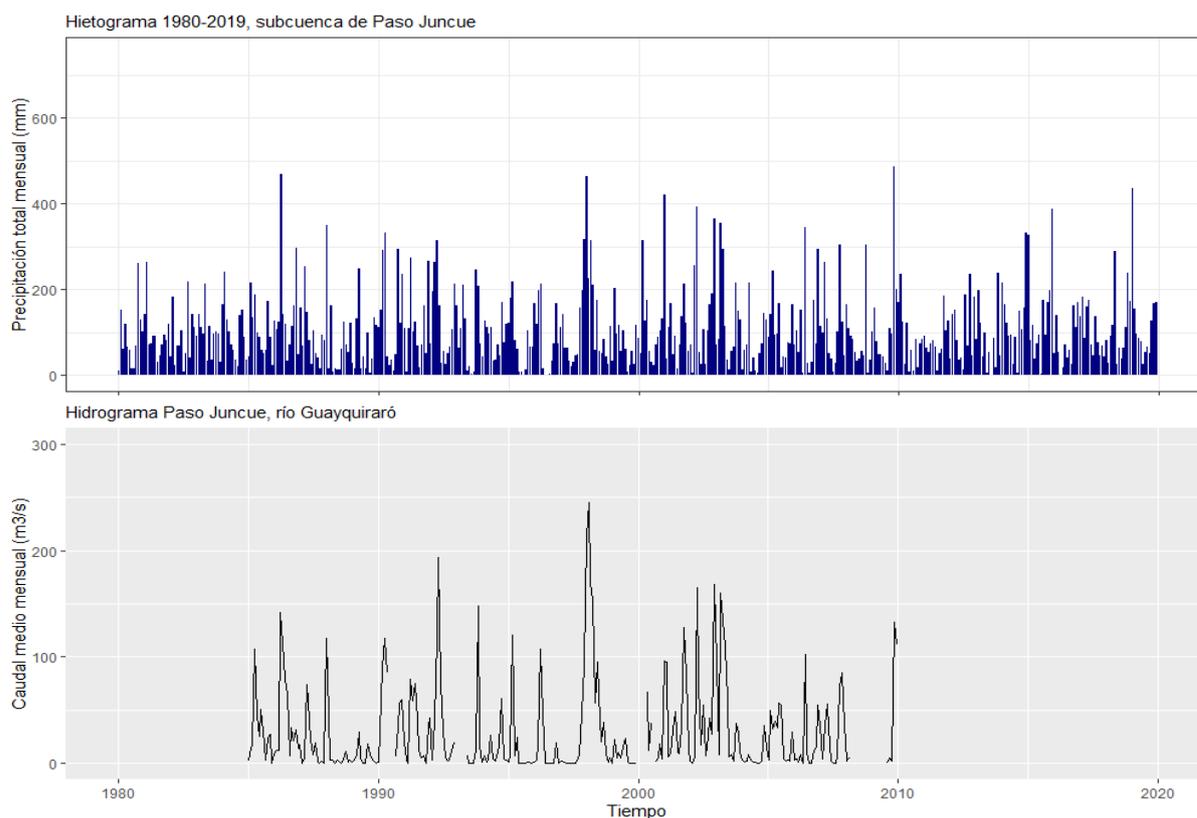


Figura 18. Hietograma mensual del SH del Guayquiraró superior (arriba) e hidrograma mensual promedio en Paso Juncue (abajo). Faltan registros de los meses de junio, julio y agosto 1990, desde enero hasta mayo 1993, enero hasta abril 2000, agosto 2000, y abril 2008 hasta julio 2009. Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.)

Los contrastes en la lluvia entre los meses son importantes; varios meses han tenido lluvias casi nulas o nulas, otros por su parte sobrepasaron los 300 mm acumulados.

Se observan también contrastes en los hidrogramas que alternan meses con caudales muy bajos con meses con caudales importantes. En ambos ríos, los meses de caudal alto ocurren después de múltiples meses de lluvias significativas. Asimismo, un solo mes lluvioso no garantiza un pico importante en el caudal. Por ejemplo, en abril 1986 en Paso Juncue hubo casi 500 mm de lluvia (segundo mes en lluvia), pero los caudales del río Guayquiraró no sobrepasaron los 150 m³/s (séptimo mes en caudal); similarmente, en abril 1991 en Paso la Llana, hubo casi 500 mm de lluvia (quinto mes en lluvia) y el arroyo Barrancas apenas alcanzó los 250 m³/s (decimotercer mes en caudal).

En 2016, durante las precipitaciones extremas de abril (700 mm), el caudal medido es muy bajo (7,8 m³/s), lo cual posiblemente se deba a un problema técnico en la estación hidrométrica.

Los 15 caudales más altos registrados en Paso Juncue y en Paso la Llana ocurrieron entre 1980 y 1998 (tabla 2). En el arroyo Barrancas, la mayoría de ellos ocurrieron en abril o en mayo, mientras que en el río Guayquiraró, muchas de ellas ocurrieron en diciembre y enero además de abril y mayo. Los máximos históricos fueron de 512 m³/s en el río Guayquiraró (21/01/1988) y de 1597 m³/s en el arroyo Barrancas (18/04/1986), el último siendo grosso modo 3 veces más caudaloso que el río Guayquiraró en situación de crecidas.

Tabla 2. Los 15 caudales diarios más altos registrados en el río Guayquiraró y en el arroyo Barrancas

Río Guayquiraró (Paso Juncue)		Arroyo Barrancas (Paso la Llana)	
Serie de datos 1975 – 2009*		Serie de datos 1980-2017*	
Fecha	Caudal medio diario (m ³ /s)	Fecha	Caudal medio diario (m ³ /s)
21/01/1988	512	18/04/1986	1597
05/05/1983	507	26/10/1980	1551
20/01/1988	463	19/04/1986	1492
22/01/1988	459	18/05/1992	1288
23/01/1988	403	17/05/1992	1263
09/02/1998	362	20/04/1986	1239
13/05/1992	361	17/04/1986	1192
08/02/1998	360	19/05/1992	1157
07/02/1998	354	16/05/1992	1060
10/02/1998	346	20/04/1998	1013
06/02/1998	341	20/05/1992	1010
14/05/1992	339	21/04/1986	1000
01/05/1992	334	24/04/1991	1000
05/02/1998	327	21/04/1998	998
12/05/1992	324	24/04/1998	994

*Consultar el ANEXO II para mayor precisión sobre las series de datos

Se observan dos temporadas hidro-climáticas: la seca, desde mayo hasta septiembre, y la húmeda, de octubre hasta abril (Figura 19). En condiciones normales, el arroyo Barrancas es aproximadamente dos veces más caudaloso que el río Guayquiraró.

Normalizados, los datos muestran que el caudal del río Guayquiraró tiene levemente más variabilidad anual que aquél del arroyo Barrancas (Figura 20). En efecto, los picos en la curva del arroyo Barrancas se comportan de forma suavizada, principalmente en los meses de noviembre, diciembre, abril y mayo, mientras que aquellos del río Guayquiraró rebajan directamente después de alcanzar los picos.

En el mismo orden de ideas, se observa, para las dos estaciones, pero en especial en Paso la Llana, que los caudales no siguen en todos los meses el patrón dado por las precipitaciones

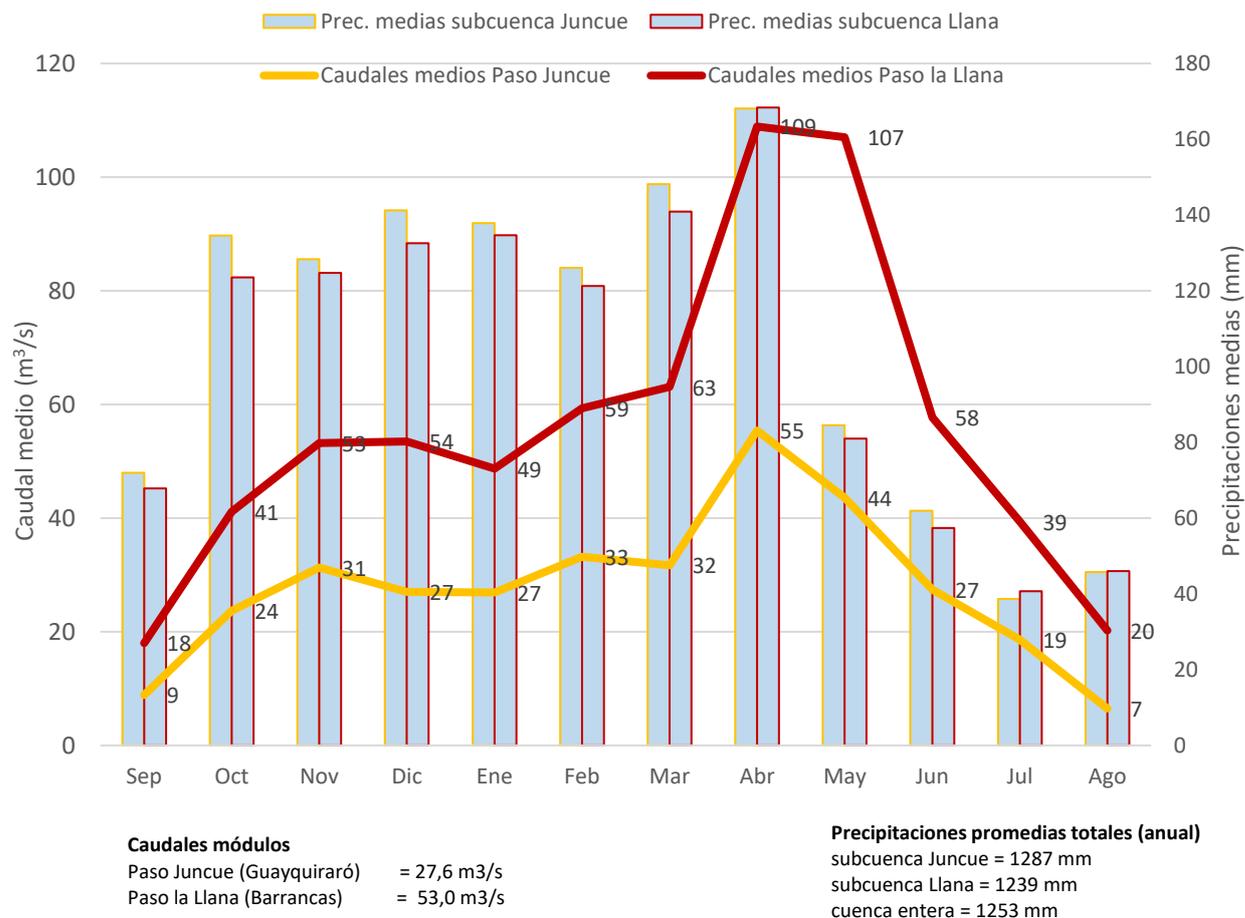


Figura 19. Hidro-hietograma mensual medio en Paso Juncue (Guayquiraró) y Paso la Llana (Barrancas). Datos del 1980-2019 (precipitaciones), 1975-2012 (caudales Juncue) y 1975-2013 (caudales Llana). Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.)

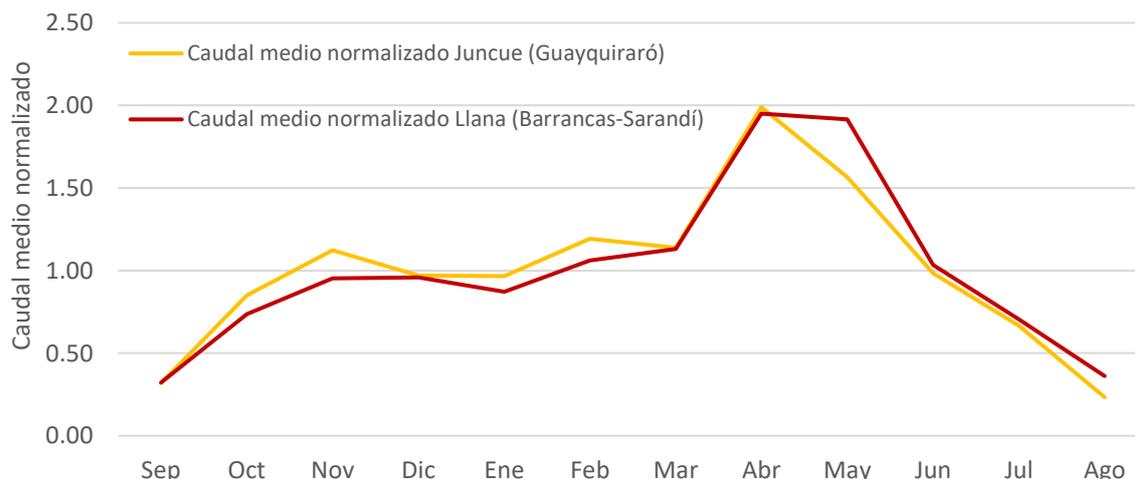


Figura 20. Hidrogramas promedios mensuales normalizados en Paso Juncue (naranja) y Paso La Llana (rojo). Datos de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.)

en su cuenca (Figura 20). En noviembre, las precipitaciones son estables respecto de octubre, sin embargo, los caudales siguen aumentando en ambos cauces. En diciembre, en el río

Guayquiraró, y en enero, en el arroyo Barrancas, los caudales se reducen mientras que las precipitaciones aumentan. En mayo, el caudal del arroyo Barrancas se mantiene a pesar de que las precipitaciones disminuyan drásticamente. En ambos ríos, el caudal medio en junio es similar a los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero; pero, el nivel de precipitaciones se reduce a la mitad.

Cabe destacar que los caudales pueden desviar considerablemente de los medios mensuales; hay eventos extraordinarios que no corresponden con las medias, como crecidas de verano o de invierno, años secos sin máximos y meses enteros por debajo de 1 m³/s.

3.2. Caracterización hidrogeomorfológica

3.3.1. Aspectos metodológicos

a) Unidades geomorfológicas

Se establecieron las unidades geomorfológicas (UG) de la cuenca; estas son entidades espaciales que dividen un espacio según sus rasgos geomorfológicos. En esta región, una UG puede ser considerada también una unidad hidrogeomorfológica ya que el agua es el principal agente geomorfológico modelador del paisaje.

Las delimitaciones de las unidades se hicieron manualmente en el SIG en formato vectorial, a escala 1:150.000 usando como referencias imágenes Landsat de los años 1986 y 1987, en una condición hídrica normal (22 de noviembre de 1987) y en condiciones de mayor cantidad de agua (3 de mayo de 1986, 8 de septiembre de 1986, 11 de noviembre de 1986), además de imágenes de alta resolución. Los criterios para la definición de las UG, además de las geoformas identificables por visualización remota, son los contrastes en la vegetación y la presencia y el comportamiento del agua superficial.

b) Funcionamiento hidrogeomorfológico

Las descripciones se hicieron a partir de trabajos de campo hechos el 19 de agosto de 2021, del 1 al 4 de noviembre de 2021 y del 19 al 21 de agosto de 2022. La cuenca se encontraba con niveles de agua bajos para los días del año 2021, y niveles medio bajos para los días del año 2022.

En gabinete se hicieron observaciones y mediciones someras suplementarias sobre imágenes satelitales de varios tipos.

c) Análisis de la migración lateral

Según la disponibilidad espacial de las fotos aéreas, la estructura hidrográfica de la cuenca y los cambios de sinuosidad, se establecieron 6 tramos para analizar los cauces: 2 tramos del río Guayquiraró, 2 tramos del arroyo Barrancas y 2 tramos del arroyo Sarandí (Figura 21).

Se compararon las morfologías en planta de los cauces en tres años: 1975, 2001 y 2019. En los tres años, se eligieron imágenes de verano con aguas encauzadas y niveles hidrométricos similares.

Para el año 2019 se usó el mosaico de imágenes Sentinel obtenido de GEE, con imágenes tomadas entre el 15 de diciembre 2019 y el 5 de enero 2020. La resolución espacial es de 10 metros por pixel.

Para el año 2001 se usó la banda pancromática (B8) de una imagen Landsat 7 del 12 de enero de 2001 (path/row: 226/81). Tiene una resolución espacial de 15 m por pixel. Se la geo-referenció en un SIG usando como referencia la imagen mosaica Sentinel de 2019, con 32 puntos de referencia en una relación polinomial de orden 3.

Para el año 1975 se obtuvieron 22 fotos aéreas del 8 y 12 de enero. Las fotos fueron proporcionadas para el estudio gracias a la colaboración de la firma ProInsa (Proyectos de Ingeniería S.A., una de las remanentes de la antigua Gerencia del Proyecto Paraná Medio de Agua y Energía Eléctrica S.E) con sede en la ciudad de Santa Fe. Se digitalizaron las fotos con un escáner cuya precisión permitió obtener una resolución espacial de aproximadamente 3 m por pixel. Se geo-referenció una primera foto usando de referencia el mosaico de imágenes Sentinel. Las siguientes fotos fueron georreferenciadas a partir del mosaico de imágenes Sentinel y las fotos áreas posicionadas previamente. Se usaron entre 10 y 20 puntos de referencia para cada foto empleando una transformación de tipo polinomial de orden 2 o de orden 3, según fuera necesario.

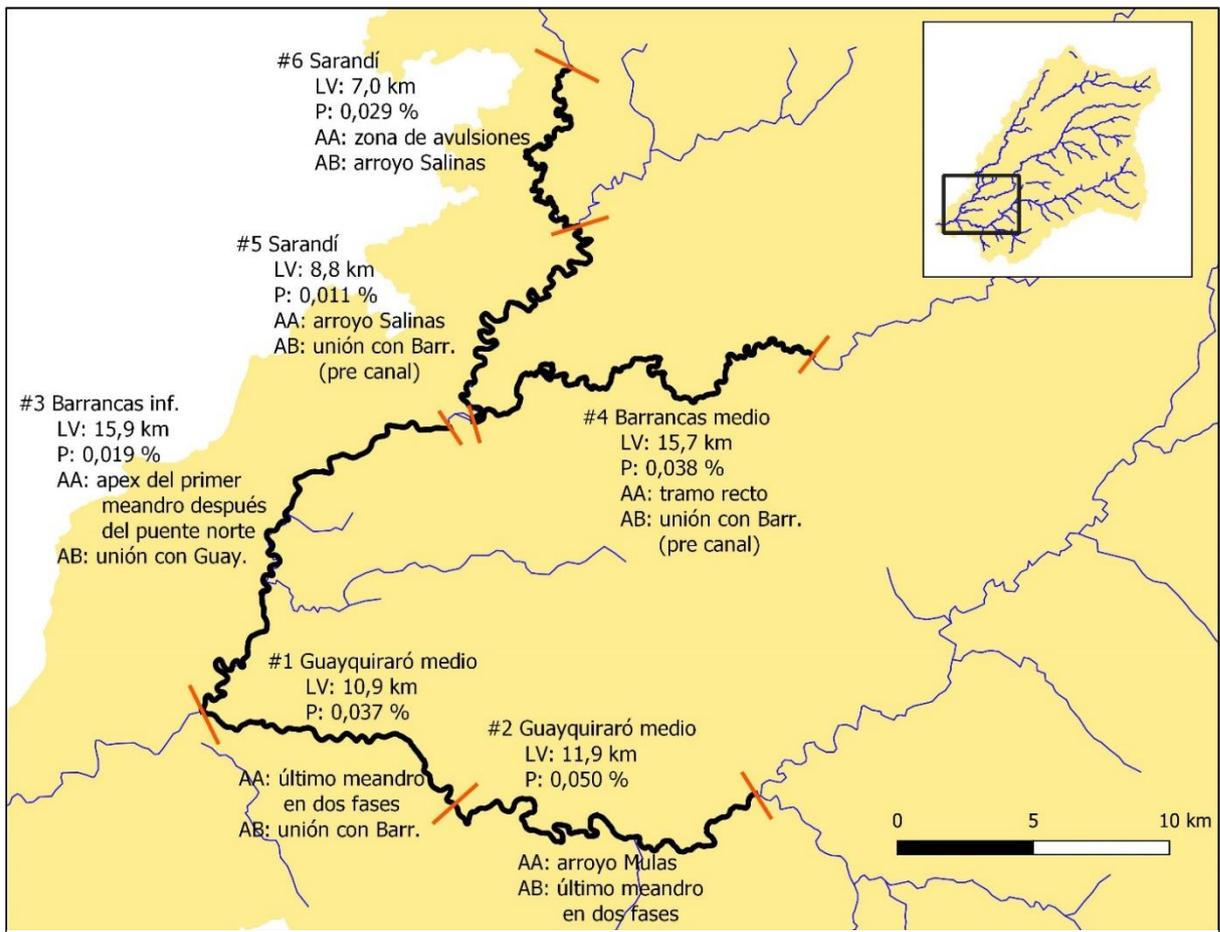


Figura 21. Ubicación y descripciones de los tramos analizados. LV= longitud del valle, P= pendiente del valle, AA= límite aguas arriba, AB= límite aguas abajo.

Posteriormente se reprodujeron a mano en el SIG los 6 tramos a escala 1:4.000, considerando el centro de los cauces. A partir de los márgenes de error inducidos por el proceso de georreferenciación y por la digitalización de los tramos de cauces, se estima en 25 m el error potencial total máximo.

Se evaluaron los cambios morfológicos en planta y su evolución temporal, visualmente y a partir de tres métricas: la sinuosidad, el corrimiento máximo y el corrimiento promedio. Las tasas se obtuvieron a partir de la división de las métricas por la cantidad de años en el periodo.

Se calculó la sinuosidad al dividir la longitud de cauce de cada tramo por la longitud del eje central de la faja fluvial del tramo.

El corrimiento máximo es el desplazamiento o apartamiento máximo entre las dos líneas centrales de cauce en el tramo para dos periodos. Los valores máximos se redondearon a diez metros y las tasas máximas con 1 decimal.

Para calcular el corrimiento medio de los cauces por erosión de márgenes en cada meandro, se crearon polígonos a partir de las áreas comprendidas entre las líneas centrales de canal para los años 1975 y 2020, 1975 y 2001, y 2001 y 2020. El corrimiento medio entre las dos líneas centrales de canal es igual a la superficie del polígono dividido por la longitud media de esta porción de cauce, la misma establecida como la mitad del perímetro del polígono (Micheli et al., 2004). En el SIG, se computó el promedio de corrimiento para el tramo, ponderando con el porcentaje de longitud media total que cada polígono representa. Los promedios ponderados se redondearon sin decimal y las tasas con 1 decimal.

Los polígonos resultantes de rectificaciones de meandro (Figura 49) fueron previamente identificados y excluidos del cálculo de los promedios y máximos de corrimiento, ya que corresponden a un proceso geomorfológico diferente del de la migración lateral continua.

3.3.2. Unidades geomorfológicas

La cartografía de las unidades geomorfológicas como sus características principales se presentan en la Figura 22 y la Tabla 3.

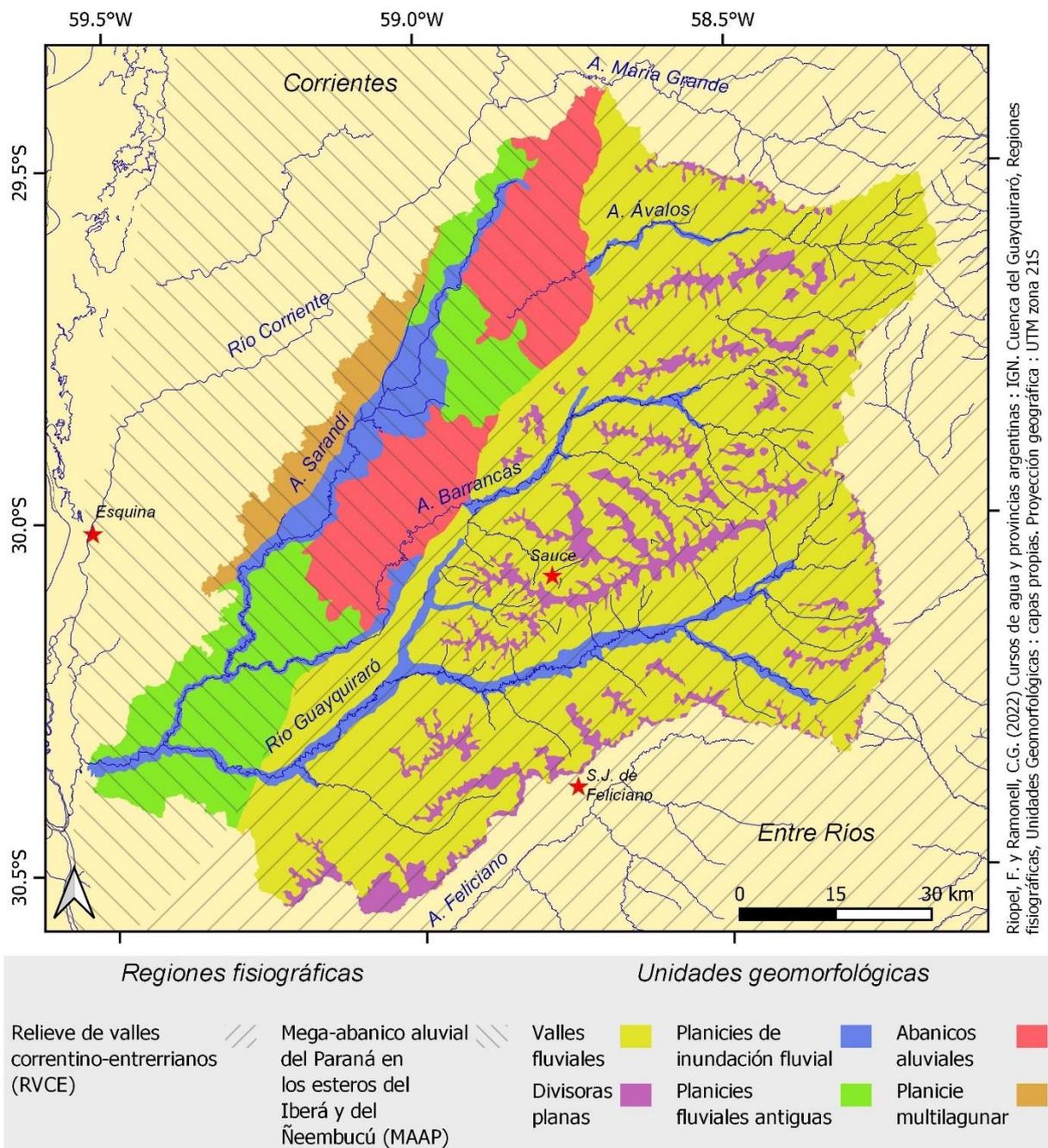


Figura 22. Unidades geomorfológicas y regiones fisiográficas en la cuenca del río Guayquiraró (hidrografía de base: IGN).

Tabla 3. Características principales de las unidades geomorfológicas

Región fisiográfica	UG	Descripción	Superficie (km ²)	Tipo/ Característica de drenaje	Dinámicas hidrológicas dominantes
Relieve de valles correntino-enterrrianos	Valles fluviales	Cuencas de aporte constituidas por laderas suaves y transitadas por cauces de orden bajo e intermedio.	5390	-Mantiforme o encauzado de bajo orden. -Convergente -Energía baja a alta	-Esguerrimiento por flujos laminares (cañadas). -Esguerrimiento encauzado en cauces de bajo orden.
	Divisoras planas	Planicies de bajo gradiente constituyendo las divisoras de agua de los valles fluviales.	820	-Divergente o estacionario. -Energía baja	-Acumulación del agua en superficie: en el suelo o en "ojos de agua" (Ligier et al., 2001). -En condiciones húmedas, saturación y esguerrimiento en su periferia hacia los valles fluviales.
Relieve de valles correntino-enterrrianos / Mega abanico aluvial del Paraná	Planicies de inundación fluvial	Depresiones longitudinales donde transitan los cursos de agua de orden superior periódicamente inundadas por desbordes de estos y donde se reconocen geofomas típicas de ambiente fluvial.	850	-Encauzado y mantiforme en condición de inundación. -Convergente -Energía baja a alta	-Colección del agua de cursos fluviales de bajo orden y de laderas. -Esguerrimiento por flujo fluvial ; en condición de inundación, esguerrimiento por flujo laminar. -En condición de inundación y post-inundación, retención temporaria del agua en el suelo y en la vegetación.
Mega abanico aluvial del Paraná	Abanicos aluviales	Cuerpos sedimentarios asociados a la entrada de cursos de agua en el MAAP desde el RVCE.	1020	-Encauzado y mantiforme. -Divergente -Energía baja a media.	-Esguerrimiento por flujo fluvial. -Disipación de la energía. -Flujos laminares.
	Planicies fluviales antiguas	Planicies muy tendidas con geofomas de origen aluvial con características de paleo-planicies fluviales.	1050	-Mantiforme y encauzado de bajo orden. -Convergente o estacionario. -Energía muy baja a media	-Acumulación del agua en superficie: extensos esteros y otros humedales. -Esguerrimiento por flujos laminares y encauzados.
	Planicie multilagunar	Planicie con presencia característica de lagunas redondas en planta.	280	-Convergente -Energía baja	Acumulación del agua en superficie: lagunas

a) Valles fluviales

La unidad de valles fluviales conforma un típico paisaje de valles fluviales de bajo relieve, compuesto por laderas suaves y depresiones recorridas o no por cauces de ordenes bajos e intermedios (Figura 23). El proceso erosivo fluvial histórico ha modelado el relieve en esta UG, subdividiendo la llanura en cuencas de aporte fluvial. Es la matriz del paisaje del RVCE y a la vez, la UG con mayor superficie en la cuenca del río Guayquiraró.

Las formaciones que encontramos en superficie (Fm Hernandarias en Entre Ríos y el sur de Corrientes, y la Fm Toropí-Yupoí hacia el norte) tienen una elevada proporción de arcilla montmorillonítica, lo que otorga cohesión a los suelos y permite la aparición de grietas de desecación en periodos secos. En el extremo noreste de la cuenca, parte del SH del arroyo Ávalos, la Fm Serra Geral constituye la base geológica de los valles fluviales.

Los valles fluviales tienen anchos fondos planos rellenos con material sedimentario. Varios de ellos carecen de cauce: a pesar de ello, son recolectores del escurrimiento superficial y se anegan o inundan después de las precipitaciones. En otros casos sí se destaca la presencia de un cauce, pero con muy poca definición o con discontinuidad longitudinal, haciendo de estos valles geoformas a medio camino entre cañadas y planicies fluviales propiamente dichas.

Ligier et al. (2001, p.46) mencionaban para este paisaje los "*microrelieves frecuentes de gilgai lineales, en las medias lomas, típicos de los vertisoles*".

a) Divisoras planas

Las divisoras planas son planicies dispuestas topográficamente por encima de los valles fluviales y que definen las divisiones entre los diferentes SH y sus subcuencas hidrográficas. Genéticamente constituyen un relieve residual de una planicie mayor cuya remodelación por procesos erosivos fluviales resultó en las UG de valles fluviales, de planicies de inundación y la presente. Las divisoras planas son un rasgo fisiográfico característico de la región y han sido remarcados y nombrados por contener humedales comúnmente llamados bañados de altura (Van der Sluijs, 1971; Iriondo, 1980; Plan Mapa de Suelos – Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos, 1986; Ligier et al., 2001; Minotti, 2017).

Esta UG, a pesar de encontrarse en un nivel alto de la cuenca, es regularmente anegada en época húmeda, lo que se debe a la ausencia de pendiente y la elevada presencia de arcilla tanto en el suelo como en el subsuelo. Estas dos condiciones provocan el fenómeno de napa colgada (Ligier et al., 2001), es decir, la acumulación de agua de lluvia en superficie y en el subsuelo somero, sin que esté necesariamente conectada con un acuífero.



Figura 23. Paisaje típico de los valles fluviales en el este de la cuenca del Guayquiraró, aproximadamente 15 km al sur de Cazadores Correntinos (arriba). Pequeña cañada a 1 km al este de la localidad de San Víctor (abajo).

Las divisoras planas tienen una estacionalidad importante, anegándose después de precipitaciones fuertes y secándose en época seca. Sin embargo, parecen conservar siempre algo de agua en cubetas levemente hundidas (Figura 24).



Figura 24. Divisora plana, 13 km sobre la ruta 77 al norte del paraje La Paloma, departamento Curuzú Cuatiá, Corrientes.

En otras divisoras planas se han observado grandes grupos de hormigueros formando morfologías en planta lineales o circulares. El leve hundimiento del terreno alrededor de los hormigueros permite la acumulación de agua superficial entre estos, formando humedales (Figura 25). Esta microtopografía podría corresponder a un estado anterior a las cubetas observadas en otras divisoras planas (Figura 24). Si tal es el caso, este proceso zoogeomorfológico sería clave en la génesis de los bañados de altura.



Figura 25. Humedal resultante del accionar de hormigas en una divisora plana, cerca de la ruta 25, departamento Curuzú Cuatiá, Corrientes.

Las divisoras planas tienen una vegetación de pastizal o de monte arbustivo bajo, este último principalmente en Entre Ríos y en las cercanías de la localidad de Sauce en Corrientes.

Esta UG está presente en todo el RVCE en la cuenca del Guayquiraró, salvo en el noreste de ella, en la Meseta de Mercedes. Allí, la cercanía a la superficie de la Fm Serra Geral, formada por basaltos y areniscas, parece propiciar otro paisaje.

b) Planicies de inundación

Las planicies de inundación son planicies de origen fluvial donde corren los cursos de agua más importantes de la cuenca (Guayquiraró, Barrancas, Ávalos, Sarandí y algunos tributarios; Figura 26).

Las planicies de inundación reciben agua desde los valles fluviales a través de cauces y cañadas de orden menor e intermedio. Son frecuentemente inundadas durante periodos prolongados, ya sea por inundaciones fluviales o por acumulación de agua de lluvia (Plan Mapa de suelos- Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos, 1986). En estas ocasiones, pasan de tener un flujo concentrado en el cauce a tener un flujo laminar.

Tienen suelos particularmente arcillosos, con proporciones que pueden superar el 50 % de arcilla en el horizonte superior según el Plan Mapa de suelos- Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos (1986). Estrátigraficamente, y al menos en la planicie de inundación del río Guayquiraró, esos depósitos parecen corresponder con la formación holocena La Picada (Iriondo, 1980).

Son ambientes generalmente homogéneos a escala de paisaje, pero variados a la escala de cuenca, donde se observan diferentes geoformas características: albardones con bosques ribereños, meandros abandonados formando pequeñas lagunas, pantanos tras-albardón y cárcavas de erosión retrocedente desde las márgenes de los cauces.

Además, se encuentran blanquizales, ecosistemas dispuestos a modo de manchas donde la vegetación crece en general escasamente y donde el suelo se caracteriza por tener un horizonte superficial muy eluviado y sódico (Figura 27; Plan Mapa de suelos- Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos, 1986; Ligier et al., 2001). Los blanquizales parecen estar asociados en varios casos con la presencia en superficie de la Fm Arroyo Feliciano (Iriondo et al., 1985), que pudimos reconocer como nivel de terraza fluvial ocasionalmente inundable en el río Guayquiraró. Se encuentran también en los abanicos aluviales y en las planicies fluviales antiguas.



Figura 26. Planicie de inundación del río Guayquiraró superior, visto desde el puente entre San José de Feliciano y Sauce. Se aprecia al fondo un pantano tras-albardón constituido por un pajonal muy homogéneo y adelante, bosques ribereños sobre el albardón actual del cauce y un surco de erosión retrocedente.

En el RVCE, las planicies son particularmente anchas: miden frecuentemente más de 100 veces el ancho del canal. Los meandros abandonados son pocos, lo cual contribuye a la homogeneidad y planitud del paisaje. Aguas abajo, en el dominio del MAAP, las planicies de inundación son menos anchas y las formas meándricas, ya sean actuales o abandonadas, son más numerosas, indicando que la migración lateral es un proceso importante en la formación de estas planicies.

En la cuenca alta del arroyo Sarandí, la planicie de inundación es particularmente ancha y el arroyo transita por múltiples canales, una condición permitida al este por la falta de relieve del abanico aluvial del arroyo Barrancas, con el cual el límite es difuso. Del lado oeste, limita nítidamente con el talud erosivo de ca. 5 metros desarrollado en la planicie multilagunar. Este desnivel provoca que el arroyo Sarandí sea recto en gran parte de su recorrido.

En la planicie de inundación del río Guayquiraró inferior, la más baja de la cuenca, la cercanía del río Paraná provoca periódicamente fenómenos de remanso. Este fenómeno se caracteriza por la subida del nivel hidrométrico en el último que provoca un estancamiento de aguas del Guayquiraró en su segmento final.



Figura 27. Blanquizal cercano a la unión de los arroyos Capivarí y Guayquiraró. En la foto se observa un huevo de ñandú en centro inferior y atrás, un gran hormiguero.

c) *Planicies fluviales antiguas*

Las planicies fluviales antiguas forman un plano compuesto de baja pendiente caracterizada por innumerables paleo-fajas fluviales intercaladas con paleo-planicies de agradación aluvial. Mientras las primeras son muy propensas a anegarse o inundarse, las últimas permanecen relativamente secas en épocas normales. Se encuentran además en esta UG lagunas poco profundas e irregulares y esteros de gran tamaño y muy homogéneos en su superficie y vegetación. Genéticamente, esta UG podría relacionarse con cursos de agua del macro-sistema Paraná que transitaban por la depresión iberana durante el Pleistoceno, o con sistemas fluviales avulsivos posteriores, por ejemplo el río Corriente.

El agua que llega a ese sistema desde el RVCE a partir de los abanicos aluviales se estanca o drena muy lentamente. En algunos sectores actúan sistemas contemporáneos de drenaje superficial, funcionando a partir de paleo-cauces y cauces, mientras que, en otros sectores, no se aprecia un sistema de drenaje superficial de tipo fluvial.

La vegetación es hidrófita-herbácea en las planicies topográficamente más bajas y arbustiva en las más altas, formando bosques densos o blanquizales. Es probable que la salinidad de los suelos, sumada a la frecuencia de las inundaciones y anegamientos, sea un condicionante importante para la vegetación. Las lagunas están normalmente y densamente cubiertas por vegetación acuática.

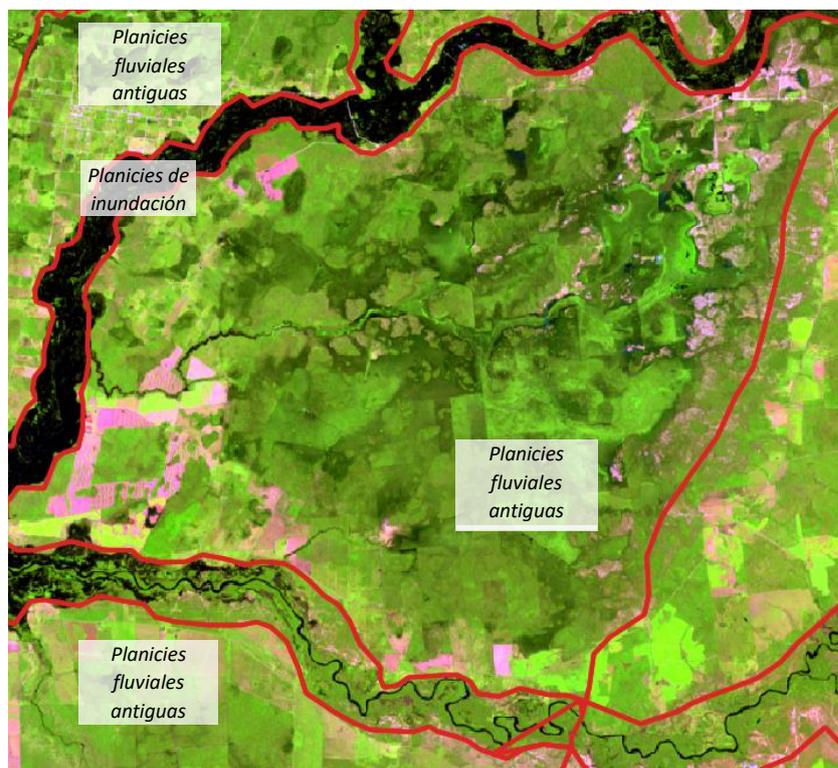


Figura 28. La subcuenca del arroyo Saturno, entre el RVCE al este, el Guayquiraró medio al sur y el Barrancas al norte y al oeste, es parte de la unidad de las planicies fluviales antiguas. Allí, no hay aporte desde los abanicos aluviales, sino que el agua llega solamente a partir de las precipitaciones y algunas laderas cortas del talud que vincula el RVCE y el MAAP. Imagen Landsat 8TM del 27/01/2015.

d) *Abanicos aluviales*

Los abanicos aluviales son cuerpos de depósitos aluviales que se extienden radialmente a partir del punto de salida de un río de un área montañosa o topográficamente más alta (Gutiérrez, 2012). Existen tres abanicos aluviales en la cuenca del río Guayquiraró, cuyos cursos de agua asociados son, de sur a norte: el Barrancas superior, el Ávalos y el María Grande; los dos últimos son coalescentes (Figura 29). Forman amplias planicies con pendientes suaves de varios kilómetros, cuyos ápices se encuentran en el límite entre el RVCE y el MAAP. Los abanicos aluviales son apreciables en vista de planta gracias al patrón distributivo de las planicies de agradación fluvial que toman desde los ápices orientaciones divergentes, formadas por avulsiones del pasado. Del mismo modo que en las planicies fluviales antiguas, las diferencias de cota entre las paleo-planicies de agradación fluvial y la planicie general provocan un contraste entre bosques y vegetación hidrófita herbácea.

Los desniveles de los abanicos son mínimos, aproximadamente de 8 m para el del río Barrancas superior y de 6 m para los otros dos. Estas geoformas funcionan según una dinámica inversa a la cuenca hidrográfica: el agua diverge en vez de converger hacia un mismo desagüe.

El arroyo Sarandí, que recorre la DSB en casi todo su límite occidental, y los arroyos Barrancas, Salinas y Salinitas, al sur de ella, operan como colectores marginales de los escurrimientos superficiales de los abanicos aluviales.

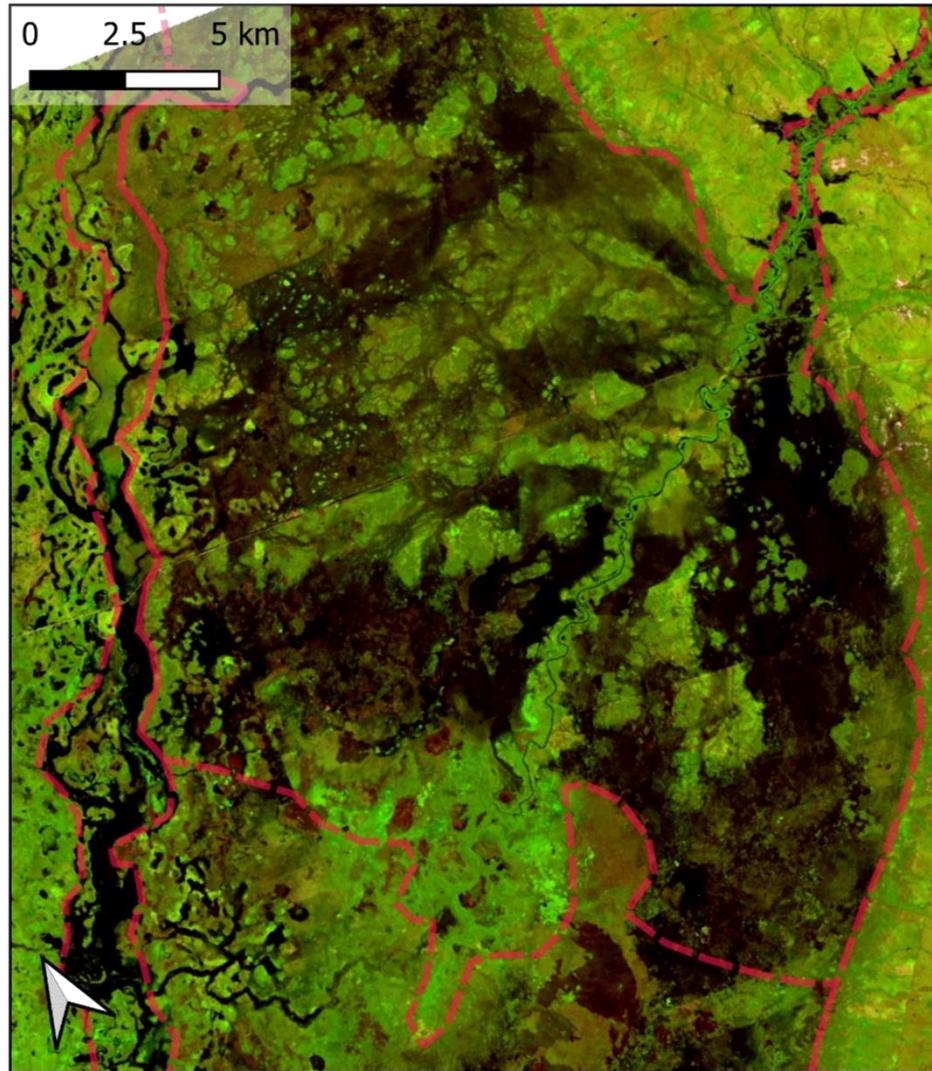


Figura 29. Abanico aluvial del arroyo Ávalos, en una crecida importante. Imagen Landsat 5TM del 02/02/1988.

e) Planicie multilagunar

La planicie multilagunar es un espacio llano caracterizado por la presencia de cientos de lagunas redondas de superficie variable. Esta UG, de escasa superficie en la cuenca del río Guayquiraró, toma mayor relevancia superficial fuera de ella, formando parte de lo que frecuentemente se denominan las lomas arenosas del noroeste de Corrientes (Herbst y Santa Cruz, 1985). Es tangente a la planicie de inundación del río Corriente, al noroeste, (fuera de los límites del mapeo) y del río Sarandí, al sureste.

3.3.3. Funcionamiento hidrogeomorfológico

a) Dominio del RVCE

En el RVCE, los cauces de primer orden forman bajos topográficos apenas insinuados (Figura 30). Reciben aportes de agua por flujos laminares o a través de pequeños surcos. Los canales tienen menos de 10 m de ancho y profundidades menores a 1 m, según se observa en la imagen referida. Después de unos días sin lluvia, se encuentran secos o con agua estancada discontinua. Son cauces irregulares cuyas márgenes muestran regularmente señas de erosión y cuyo lecho se encuentra pisoteado por los animales y está colonizado por herbáceas en las secciones secas y plantas acuáticas en las secciones con agua.



Figura 30. Un cauce de orden 1 parte de la subcuenca del arroyo Capivarí, aproximadamente 15 km al sur de Cazadores Correntinos. La presencia de árboles es característica de los cauces en la cuenca alta, pero no sistemática.

Los cauces de orden 2 son similares a los cauces de orden 1, pero con dimensiones mayores (Figura 31). Son generalmente cauces únicos rectos, pero pueden ser múltiples y hasta formar meandros muy irregulares. Evolucionan en fondos de valles de ancho variable, pero que frecuentemente superan los 100 metros.

A partir del tercer orden los cauces tienen canales únicos bien definidos que fluyen generalmente rectos, ocasionalmente en meandros muy irregulares. También es irregular la dimensión del canal, principalmente porque fenómenos de remoción en masa provocan derrumbes en sus márgenes y así, variaciones horizontales y verticales. Observamos anchos entre 2 y 5 m en el arroyo San Víctor (Figura 32, Entre Ríos), y hasta 15 m en el arroyo Sauce (Departamento Sauce, Corrientes). Son cauces particularmente profundos para sus anchos.



Figura 31. Arroyo Fortuna: cauce de orden 2 en la subcuena del arroyo Chañar, Departamento Feliciano, Entre Ríos. Se evidencia la discontinuidad del canal por unos metros y, en primer plano, montículos de suelo en el canal resultados de procesos erosivos.

En condiciones hídricas bajas, el agua en el canal está estancada y su presencia puede ser continua o discontinua.

Las márgenes muestran evidencias de erosión significativa (taludes desnudos e inestables, raíces expuestas, etc.). Aunque la erosión suele ser más importante en la margen cóncava de los meandros, es notable en ambos márgenes a la vez.

Tanto los cauces de orden 2 como de orden 3 son considerablemente obstruidos por las caídas de sus márgenes, árboles y ramas, lo cual evidencia su carácter torrencial. La formación y posterior ruptura de embalses de raigones y ramas tiene el potencial de producir ondas hídricas importantes. Son arroyos propensos a salir de su canal e inundar su planicie, lo cual se evidencia en el campo por los restos de hojarasca colgados en ramas y/o depósitos sedimentarios recientes, avalado con consultas a lugareños.



Figura 32. Arroyo San Victor: cauce de orden 3, aproximadamente 5 km al oeste de la localidad de San Victor. Tanto el lecho del arroyo como su valle están constituidos por limos y concreciones calcáreas que se transportan como gravas una vez erosionadas de las formaciones geológicas que las contienen.



Figura 33. El río Guayquiraró en su nacimiento (cauce de orden 3), departamento Curuzú Cuatiá, Corrientes. Se evidencian las márgenes severamente erosionadas y, en segundo plano, la obstrucción del canal por ramas.

Muchos de los valles de orden 2 o 3 en el RVCE tienen fondos llanos colmatados por sedimentos, con anchos de algunos cientos de metros, alcanzando incluso los 1200 m en el SH del arroyo Barrancas alto. Varios de estos fondos de valles, como está explicado en la sección anterior, carecen de cauce fluvial. En este sentido, el drenaje en el RVCE no se hace solamente por cauces, sino que se hace también por flujos laminares en los fondos de valles.

Los cauces de orden 4 varían considerablemente; evolucionan en fondos de valle amplios, desde los 500 m de ancho hasta más de 3000 m en el caso del río Guayquiraró superior (Figura 34). Siguen patrones meandriforme irregulares, algunos de baja sinuosidad (arroyo de la Mulas, Barrancas alto) y otros hasta tortuosos (Guayquiraró superior). Los cauces varían sustancialmente en profundidad y en ancho, aunque en todos los casos, son cauces encajonados o incisos en sus planicies de fondo de valle.

Los cauces en el RVCE evolucionan sobre un material fino, tanto en su planicie de inundación como en su lecho, hasta aproximadamente los 59°W de longitud, donde el lecho pasa a ser arenoso y aparecen bancos de arena medios o laterales en el río Guayquiraró superior y en el arroyo de las Mulas (Figuras 34 y 35). Parece encontrarse arena aún más al este en el arroyo Barrancas, pero no se aprecian en el arroyo Ávalos.



Figura 34. El río Guayquiraró superior (cauce de orden 4), a la altura del puente entre San José de Feliciano, Entre Ríos, y Sauce, Corrientes. Se destacan las márgenes desnudas, la presencia de un bosque denso sobre el albardón del río y una cárcava de erosión retrocedente. La planicie y las márgenes son constituidas de limo arcilloso (esquina inferior derecha).

El arroyo Ávalos se forma a partir del alto de Mercedes, donde la Fm Serra Geral está cercana o en superficie. Resulta un cauce no aluvial con control por fracturas y de lecho arcillo-limoso.

En el RVCE, el carácter encajonado de los cauces así como las evidencias de erosión sobre ellos indican que la tendencia a la incisión (erosión sostenida del lecho) es un proceso predominante en toda la red fluvial.



Figura 35. El río Guayquiraró superior en estiaje (cauce de orden 4). En las cercanías del paraje Las Mulas, Departamento Feliciano, Entre Ríos. Cortesía de Luis Prevedel, ANP Don Sebastián.

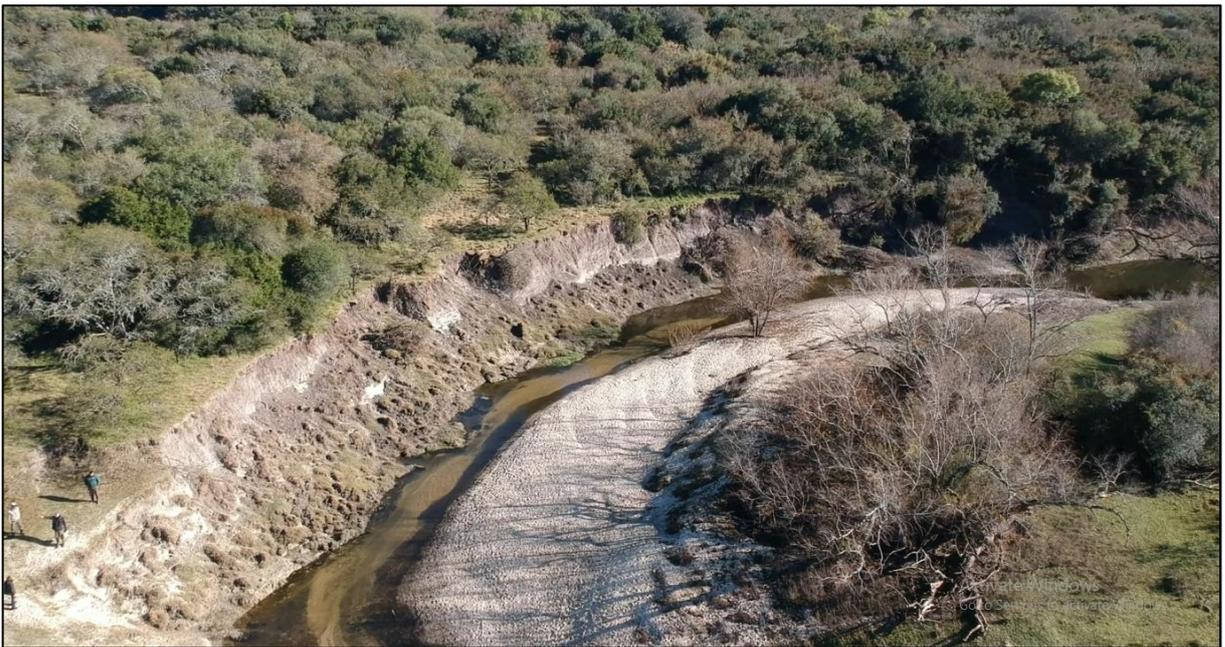


Figura 36. El arroyo de las Mulas en estiaje (cauce de orden 4). 5 km de valle antes de su desembocadura en el río Guayquiraró superior. Foto cortesía de Luis Prevedel, ANP Don Sebastián.

b) Dominio del MAAP

En el MAAP, la falta de relieve provoca la acumulación de agua sobre grandes superficies, formando esteros, bañados y lagunas. Ante entradas importantes de agua al sistema, se

forman extensos flujos mantiformes que drenan hacia los cursos de agua, un fenómeno fácilmente observable a partir de imágenes satelitales.

Los pocos flujos encauzados que nacen en el MAAP tienen una morfología muy distinta a aquellos que nacen en el RVCE. Se forman a partir de paleo-cauces, depresiones de amplias dimensiones normalmente anegadas o inundadas, donde suelen aparecer cursos de agua contemporáneos imbricados en ellos (Figura 37). La mayoría de ellos aparecen en las UG de planicies fluviales antiguas o de la planicie de inundación del arroyo Sarandí.



Figura 37. Ejemplo de la formación de un cauce en el MAAP (centro de la imagen), a partir de un paleo-cauce. Fuente: Google Earth.

El propio arroyo Sarandí nace desde un paleo-cauce (Figura 38). Allí, el Sarandí se constituye de aguas quietas, sin taludes para definir los límites de su cauce y sin mostrar ninguna señal de erosión o de sedimentación. En este sentido, aunque lleve el nombre de arroyo, corresponde más a la definición de una laguna que la de un curso de agua.



Figura 38. El arroyo Sarandí en su nacimiento, directamente al norte del puente sobre la ruta 30, departamento de Esquina, Corrientes.

Dirigiéndose hacia aguas abajo, los cursos de agua del MAAP, tanto los tributarios como los más importantes, se vuelven claramente encauzados y muestran señas de erosión y deposición (Figura 39 ; Figura 40;

Figura 41).

Desde sus nacientes hasta su unión con el arroyo Barrancas, el arroyo Sarandí evoluciona según 4 tipos de morfologías fluviales: un cauce poco sinuoso en los primeros 30 km, un río de múltiples cauces en los siguientes 40 km, un cauce único tortuoso por 12 km y finalmente, un cauce meandriforme regular en los últimos 8 km (Figura 13).

A partir de consultas con ribereños del paraje Rincón del Sarandí, comprobamos que, durante crecidas importantes, el arroyo Sarandí no solamente llena su canal e inunda su planicie, pero además inunda por fuera de su planicie de inundación fluvial cada 3 a 5 años aproximadamente.



Figura 39. *Cauce sin nombre (de orden 1): al norte de su paso bajo la ruta 126 a aproximadamente 15 km al este de Pueblo Libertador.*



Figura 40. *El arroyo Salinas (cauce de orden 2): aproximadamente 2,5 km de valle aguas arriba de su desembocadura en el arroyo Sarandí. Este arroyo drena una importante zona de esteros del MAAP, y como su nombre lo indica, tiene una salinidad marcada.*



Figura 41. El arroyo Sarandí (cauce de orden 3) 3 km antes de la unión con el arroyo Barrancas, departamento Esquina, Corrientes. Se destaca que, a pesar de ser un cauce de orden 3, tiene dimensiones comparables con los cauces de orden 5 del RVCE (Barrancas, Guayquiraró y Ávalos.).

El río Guayquiraró y los arroyo Ávalos y Barrancas nacen en el RVCE y transitan hacia el MAAP, donde conservan, por lo menos localmente, un carácter encajonado.

En las márgenes convexas del río Guayquiraró se encuentran bancos de arena media y gruesa, mientras que las márgenes cóncavas son compuestas por un material limoso y arenoso de la Fm Ituzaingó. El thalweg tiene una profundidad del orden de los 7 m desde el nivel de la planicie de inundación. En condición de estiaje, el agua corre con velocidad baja y tiene poco sedimento en suspensión.

De manera semejante a lo que ocurre con el arroyo Sarandí, la planicie de inundación del río Guayquiraró en el MAAP desborda frecuentemente, provocando la inundación del camino rural paralelo a la planicie.



Figura 42. El río Guayquiraró medio (cauce de orden 5): 5 km de valle aguas debajo de Paso Juncue, Departamento Esquina, Corrientes. En ese punto de observación, la margen cóncava se encuentra en el límite del valle fluvial, por lo que se aprecia a la Fm. Itzaingó en la foto superior. La margen muestra evidencias de erosión, tanto por los taludes desnudos como por los derrumbes. Se destacan además las amplias barras de cauce, las dunas, los albardones y el denso bosque ribereño en la planicie de inundación. El río se encuentra en estiaje; la profundidad de agua es menor a 1 m.

Al entrar en el MAAP, los arroyos Ávalos y Barrancas corren en planicies estrechas pobladas por un bosque ribereño denso (Figura 43), a través de los abanicos aluviales que han construido y fueron descritos en la sección anterior. Hacia la parte distal muestran un patrón distributivo por derrames, típico de los abanicos aluviales. Mientras el arroyo Ávalos desaparece en un gran estero, el arroyo Barrancas se reacomoda al final de su abanico, donde corre hasta unirse con el arroyo Sarandí, en Paso la Llana. Conservando el nombre de Barrancas (inferior), el arroyo corre unos 15 km, bordeando la localidad de Pueblo Libertador, hasta desembocar en el río Guayquiraró (Figura 44).



Figura 43. El arroyo Ávalos (cauce de orden 5): a la altura de la ruta 25, límite entre los departamentos de Esquina y Sauce, Corrientes.



Figura 44. El río Barrancas inferior (cauce de orden 6): 8 km de valle antes de la unión con el río Guayquiraró. La margen está pisoteada por animales y su vegetación es escasa.

Después de la confluencia con el Barrancas inferior, el río Guayquiraró entra en su último tramo, donde pasa a ser un río de cauces múltiples y su planicie de inundación varía entre 1500 y 2500 m de ancho. Dividido en tres brazos (Curupí, Carumbe y Guayquiraró), entra en la llanura aluvial del río Paraná a través de un mosaico de islas, cursos de agua y lagunas.



Figura 45. Brazo principal del río Guayquiraró inferior, cauce de orden 6, a la altura del puente de la ruta 12, límite entre Corrientes y Entre Ríos.

3.3.4. Migración lateral de los grandes cauces

Los resultados del análisis de la migración lateral en los grandes cauces de la cuenca se presentan a continuación (Figura 46 ; Figura 47 ; Tabla 4).

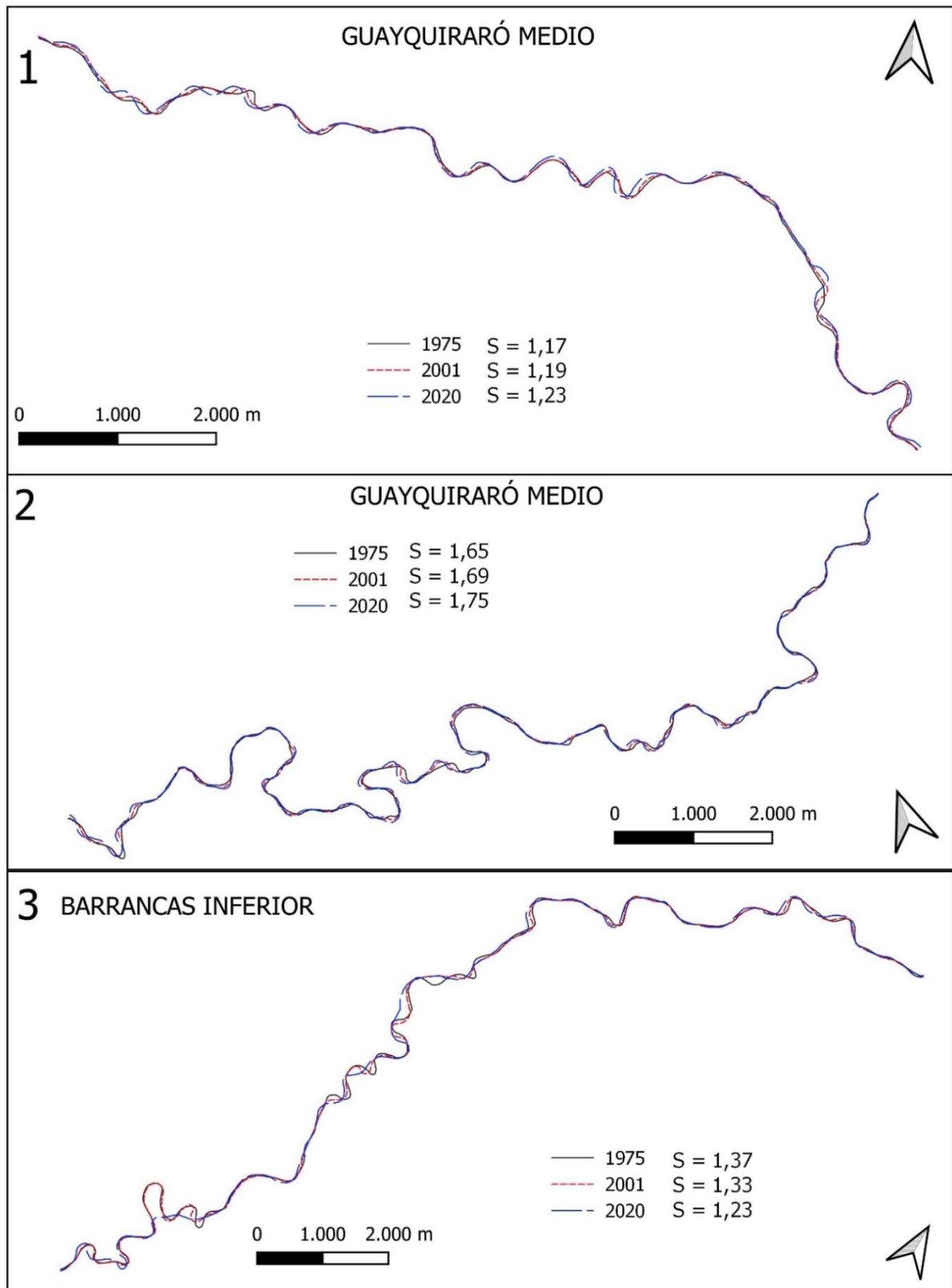


Figura 46. Variaciones recientes en la morfología fluvial en planta, tramos 1, 2 y 3 (ver ubicación de los tramos en Figura 21).

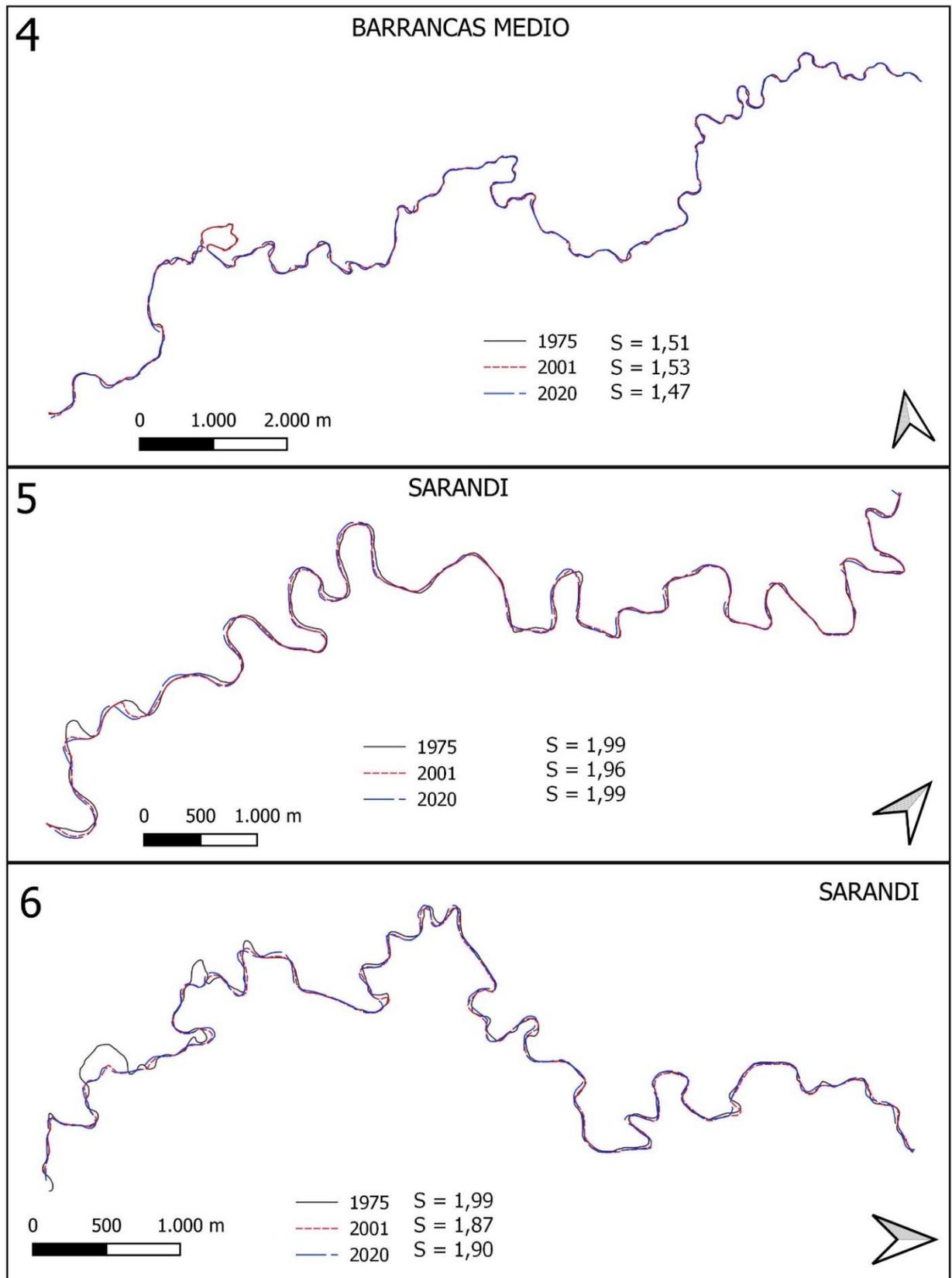


Figura 47. Variaciones recientes en la morfología fluvial en planta, tramos 4,5 y 6 (ver ubicación de los tramos en Figura 21).

Tabla 4. Cambios en la sinuosidad de los tramos analizados.

Tramo	Longitud valle (m)	Año	Longitud cauce (m)	Sinuosidad	Cambio* (%)
1 Guayquiraró	10900	1975	12769	1.17	
		2001	12924	1.19	1.2
		2020	13419	1.23	3.8
2 Guayquiraró	11900	1975	19693	1.65	
		2001	20112	1.69	2.1
		2020	20845	1.75	3.6
3 Barrancas	15900	1975	21721	1.37	
		2001	21149	1.33	-2.6
		2020	19569	1.23	-7.5
4 Barrancas	15700	1975	23760	1.51	
		2001	23965	1.53	0.9
		2020	23099	1.47	-3.6
5 Sarandí	8800	1975	17539	1.99	
		2001	17215	1.96	-1.8
		2020	17520	1.99	1.8
6 Sarandí	7000	1975	13918	1.99	
		2001	13068	1.87	-6.1
		2020	13281	1.90	1.6

*En verde, los aumentos en sinuosidad y en rojo, los descensos en sinuosidad.

Los tramos analizados cuentan con una variabilidad importante en su sinuosidad (en 2020, entre 1,23 y 1,99). Visualmente, los tramos son de tipos compuestos; el tramo 1 es recto con meandros incluidos, el tramo 2 es meandriforme de baja sinuosidad y posteriormente de alta sinuosidad, el tramo 3 y el tramo 4 son meandriformes con segmentos rectos incluidos, el tramo 5 es meandriforme regular de alta sinuosidad y el tramo 6 es meandriforme irregular de alta sinuosidad. Los dos tramos con sinuosidad más baja, el 1 y el 3, son los dos tramos ubicados más abajo en la cuenca

Las tendencias en el tiempo son distintas según cada río estudiado. El Guayquiraró, tanto en el tramo 1 como en el tramo 2, ha ido aumentando considerablemente su sinuosidad entre 1975 y 2001 y entre 2001 y 2020. El Barrancas de manera general disminuyó en sinuosidad, salvo entre 1975 y 2001 en el tramo 4. Finalmente, el tramo 5 del Sarandí es el río que muestra mayor constancia en su sinuosidad, mientras que el tramo 6 disminuyó notablemente en sinuosidad entre 1975 y 2000 y volvió a aumentar levemente entre 2001 y 2020.

Los ríos aluviales cambian de sinuosidad por ciertos procesos. Los meandros se desarrollan a través de la deriva continua por erosión de sus márgenes, produciendo en la morfología en planta una amplificación, un traslado o una rotación, lo que aumenta su longitud en el sector

y, por lo tanto, la sinuosidad. Como proceso antagónico, los ríos reducen la longitud de sus cursos por rectificación, ya sea por tangencia (neck cutoff) o por desborde (chute cutoff) (Figura 48). Las avulsiones son también procesos fluviales comunes; sin embargo, no se aprecia ninguna avulsión relativamente reciente en los tramos estudiados.

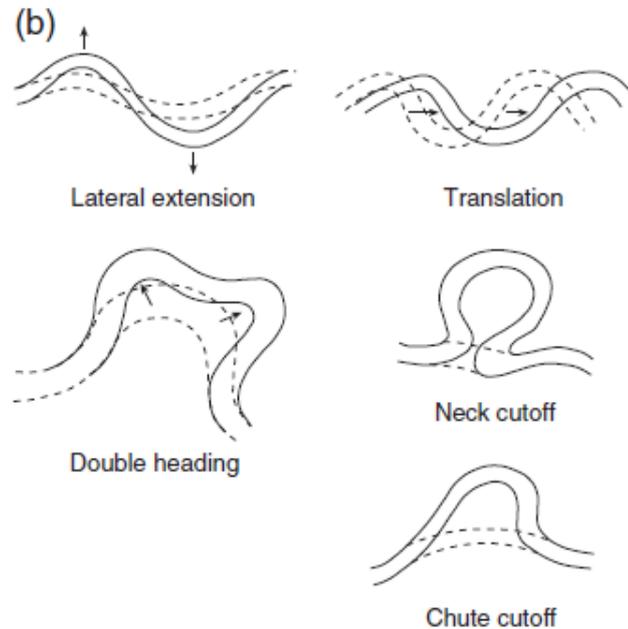


Figura 48. Procesos de cambio morfológico en los ríos aluviales. La amplificación (lateral extension), el traslado (translation), la rectificación por tangencia (neck cutoff) y la rectificación por desborde (chute cutoff) son fenómenos observables en la cuenca del Guayquiraró. La rotación, no representada en esta Figura, es un traslado con eje curvado. Fuente: Charlton (2007).

Visualmente, se observan cambios morfológicos en todos los tramos. Los cambios se concentran en segmentos específicos, generalmente en grupos de dos o tres meandros consecutivos. Otros segmentos no han tenido cambios, o si tuvieron fueron muy leves, particularmente en los segmentos rectos o de muy baja sinuosidad, pero también en algunos tramos meandriformes.

Los fenómenos que dominan son los traslados de meandros aguas abajo (particularmente entre 1975 y 2000 en el tramo 3 cerca de Pueblo Libertador y en algunos meandros abajo del tramo 1). Las rotaciones son generalizadas a todos los tramos, frecuentemente son procesos a medio camino con las translaciones. Las amplificaciones de meandros son también comunes, pero menos desarrolladas y se aprecian en el Guayquiraró y en el Sarandí (tramo 6). Se observó un solo evento de rectificación por tangencia, en el Barrancas (tramo 4, entre 2001 y 2020). Los cambios en el Sarandí, tramo 5, son sutiles, pero son constantes a lo largo de los meandros.

Son comunes las rectificaciones por desborde en el tramo 6 (Sarandí) y en el tramo 3 (Barrancas), mientras que se encuentran pocas en los otros tramos. En el tramo 3 (Barrancas), entre 1975 y 2019, hubo procesos de rectificación en un número significativo de meandros, es decir en 7 de los 27 meandros. Esta tendencia se refleja en la sinuosidad del tramo que pasó primero de 1,37 a 1,35 en el primer periodo, y después de 1,35 a 1,23 en el segundo (tabla 5).

Tabla 5. Parámetros morfológicos por tramo y periodo de tiempo

		Migración lateral máxima	Promedio de migración lateral	Tasa media de migración lateral	Tasa máxima de migración lateral	Cantidad de rectificaciones de meandro*
		m	m	m / año	m / año	-
1 Guayquiraró	1975-2020	220	27	0.6	4.9	0
	1975-2001	140	13	0.5	5.4	0
	2001-2020	150	19	1.0	7.9	0
	Cambio (%)	-	-	100	46	-
2 Guayquiraró	1975-2020	120	22	0.5	2.7	1
	1975-2001	130	14	0.5	5.0	1
	2001-2020	120	12	0.7	6.3	0
	Cambio (%)	-	-	40	26	-
3 Barrancas	1975-2020	140	30	0.7	3.1	7
	1975-2001	120	16	0.6	4.6	2
	2001-2020	120	20	1.1	6.3	5
	Cambio (%)	-	-	83	37	-
4 Barrancas	1975-2020	150	12	0.3	3.3	2
	1975-2001	50	6	0.3	1.9	0
	2001-2020	70	12	0.6	3.7	2
	Cambio (%)	-	-	100	95	-
5 Sarandí	1975-2020	210	20	0.4	4.7	0
	1975-2001	190	13	0.5	7.3	0
	2001-2020	90	11	0.6	4.7	0
	Cambio (%)	-	-	20	-36	-
6 Sarandí	1975-2020	90	12	0.3	2.0	5
	1975-2001	70	10	0.4	2.7	3
	2001-2020	80	8	0.4	4.2	2
	Cambio (%)	-	-	0	56	-

* Las rectificaciones, ya sean por tangencia o por desborde, no están contempladas en los cálculos de promedios, máximas y tasas.

Las tasas medias de migración lateral de cauces varían entre 0,3 m/año y 1,1 m/año. Los dos tramos que alcanzan valores del metro por año son el Barrancas (tramo 3) entre 2001 y 2020 y el Guayquiraró (tramo 1) entre 2001 y 2020.

Todos los tramos analizados aumentaron o mantuvieron estables sus tasas de migración lateral en el segundo periodo. Particularmente, los tramos 1 del Guayquiraró y 4 del Barrancas duplicaron sus tasas de migración lateral. El río Sarandí, a diferencia de los ríos Guayquiraró y Barrancas, mantuvo estable su tasa de migración lateral en uno de sus tramos mientras que tuvo un aumento leve en el otro.

Las tasas de migración lateral máximas varían entre 1,9 m/año y 7,9 m/año. La mayoría son traslados de meandros muy poco sinuosos, como en los tramos 1 y 2 (Guayquiraró) y tramo 6 (Sarandí). La mayoría de las tasas máximas de migración lateral aumentaron en el segundo periodo.

El tramo 6 del río Sarandí y el tramo 3 del Barrancas son los tramos con mayor cantidad de rectificaciones de meandro. Todas las rectificaciones de meandro identificadas fueron por desborde, a la excepción de una rectificación por tangencia en el tramo 4 del Barrancas, entre 2001 y 2020.

3.3. *Discusiones*

3.3.1. *Contexto fisiográfico y estructura hidrográfica*

La cuenca hidrográfica del río Guayquiraró, debido a su evolución geológica, se encuentra atravesada por dos regiones fisiográficas muy contrastantes: la RVCE y el MAAP (Figura 3). Ambos son ambientes de llanura; no obstante, son indiscutibles las diferencias que existen entre las dos fisiografías. Esta dupla en contextos complejiza considerablemente el análisis de la cuenca como una unidad singular, ya que las geoformas y los procesos hidrogeomorfológicos son distintos según la región fisiográfica donde ocurren. Especialmente, la escasez extrema del relieve en el ámbito del MAAP otorga varias peculiaridades en la hidrografía de esta región.

Entre ellas, la planitud extrema del MAAP impide la presencia de una red hídrica desarrollada. Como consecuencia de esto, la red hídrica es escasa; la superficie que drena cada cauce es grande. Por lo tanto, la significación de la jerarquía de los cauces (Figura 15) es totalmente distinta entre las dos regiones fisiográficas: los cauces que nacen en el MAAP tienen, comparando a orden igual, caudales y dimensiones muy mayores a aquellos que nacen en el RVCE.

Otra particularidad que se debe a la escasez extrema de relieve en el MAAP es la vinculación entre el arroyo Ávalos y lo demás de la red hídrica. A pesar de no estar conectados fluvialmente (Figura 14), se ha cartografiado en varios documentos la conexión del arroyo Ávalos con el arroyo Sarandí, ya sea como un cauce intermitente o como permanente (Martínez, 2010; SSRH – INA, 2001; Ejército Argentino - Instituto Geográfico Militar, 1944). En efecto, el arroyo Ávalos termina su curso en la DSB, desapareciendo en la planicie a la manera de un río endorreico. Sus aguas se acumulan en superficie, aguas abajo del abanico aluvial, formando un gran estero cercano a las nacientes del arroyo Sarandí. Aunque lo más probable es que este estero esté lentamente drenado por el arroyo Sarandí, llevando sus aguas hacia

el arroyo Barrancas y últimamente, al río Guayquiraró, nunca ha sido comprobado y tampoco se conoce la magnitud de esta contribución.

Otro asunto son los trasvases de agua que podrían ocurrir entre la cuenca del río Corriente y la cuenca del río Guayquiraró, en el noroeste de ella (Figura 49). Según el ICAA (2016), ocurren también trasvases de cuenca desde el abanico aluvial del arroyo María Grande, en el extremo norte de la cuenca.

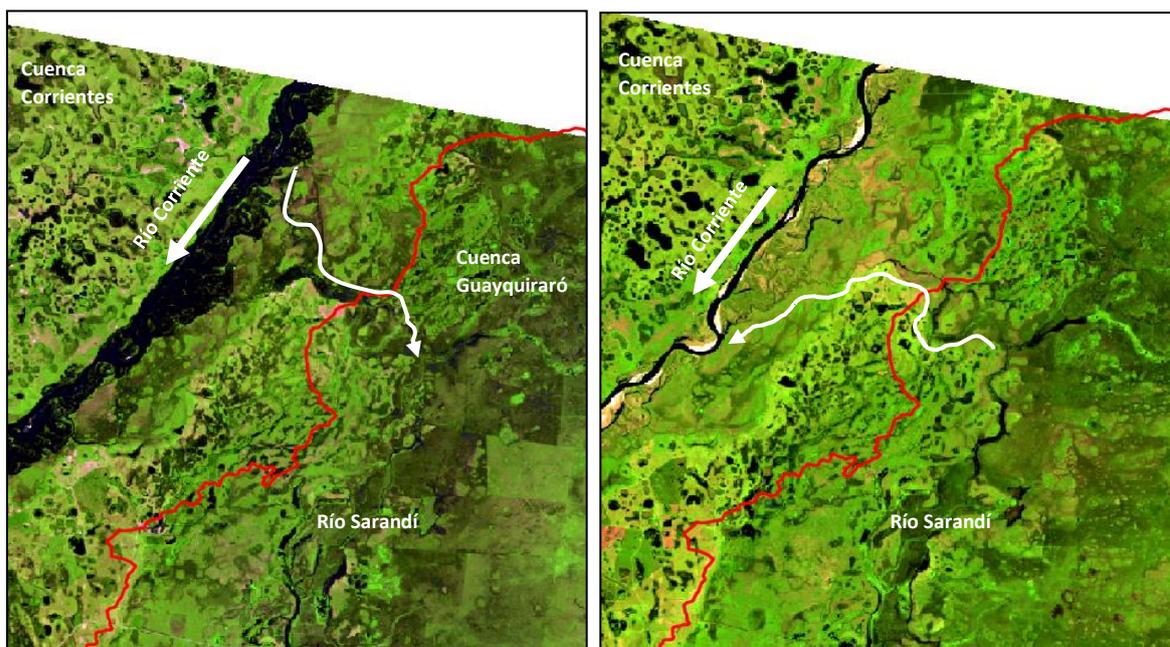


Figura 49. Posible zona de trasvase de cuenca en el noroeste de la cuenca, en las cercanías del paraje Malvinas. Las aguas podrían vertirse desde la cuenca del río Corriente hacia la cuenca del río Guayquiraró (izquierda, 27 de enero 2015) o desde la cuenca del río Guayquiraró hacia la cuenca del río Corriente (derecha, 5 de diciembre de 2018) según los niveles hidrométricos en cada cuenca. Imágenes Landsat 8 (path/row: 226/81)

Estos fenómenos cuestionan el concepto mismo de la cuenca hidrográfica, cuyas fronteras se definen con criterios topográficos y cuya salida es única. Este concepto heredado de la visión europea se aplica correctamente en ámbitos montañosos, pero debería ser utilizado con precaución en cuencas de llanura como las que se encuentran en el MAAP.

Además, el contraste fisiográfico entre el RVCE y el MAAP hace que la subdivisión clásica entre cuenca alta, cuenca media y cuenca baja sea de difícil aplicación, ya que la cuenca no corresponde con la secuencia típica de montaña-piedemonte-llanura *sensu stricto*.

Finalmente, la influencia de la geología en las redes de drenaje es otro elemento importante de diferencia entre las dos regiones fisiográficas, las cuales son dendrítico-rectangular en la RVCE y paralela-rectangular en el MAAP (Figura 14). Los ángulos rectos en las redes de drenaje de los arroyos Ávalos, Guayquiraró y Barrancas deben ser influencias de estructuras

geológicas locales propios de las formaciones geológicas subyacentes, ya sea de la Fm Serra Geral o incluso otras más antiguas. Las mismas se hacen notar particularmente en las subcuencas de los arroyos Ávalos y Pelado, donde la Fm Serra Geral está muy cercana a la superficie.

3.3.2. Dinámica hidrológica

La variabilidad temporal, tanto en las precipitaciones como en los caudales, es muy notable. En efecto, desde 1980 las precipitaciones mensuales han variado entre 0 y 700 mm y los caudales han sido tanto nulos como de varios cientos de metros cúbicos.

Sin embargo, no se aprecia una tendencia global ni al aumento ni al descenso en las precipitaciones entre 1980 y 2019. Coincide con Scarpati et al. (2016) que no encontraron cambios significativos en las precipitaciones de la provincia de Corrientes desde los años 1970.

A escala diaria, se observa para el arroyo Barrancas una respuesta que tarda entre 4 y 8 días después de un evento de lluvia importante para alcanzar el caudal máximo. Para el río Guayquiraró, la respuesta es bastante rápida: entre 2 y 4 días para alcanzar el pico de avenida.

El río Guayquiraró, entonces, no se comporta como un típico río de llanura. De manera aún más marcada, los cursos de orden medio en el RVCE, tributarios del río Guayquiraró y de los arroyos Barrancas y Ávalos, tienen un régimen torrencial. Lo mismo, además de haber sido remarcado por los lugareños, se deduce a partir de las geoformas que resultan de procesos erosivos severos (isletas de suelo, taludes verticales) y de los procesos aparentes de deposición-erosión (bancos de arena con taludes erosivos).

Este régimen hidrológico encontraría explicación en las largas laderas de pendiente significativa conformando las cuencas de aporte, en la textura de granulometría fina de los suelos que favorece el escurrimiento superficial, en el carácter encajonado de los cauces y en las pequeñas presas formadas por árboles muertos, las cuales pueden provocar ondas hídricas marcadas cuando se rompen. Además, la condición hídrica de los cursos de agua de la cuenca baja, como el río Guayquiraró y el río Paraná, influencia la respuesta de sus afluentes: cuando estos ríos se encuentran en estiaje, la pendiente del agua está incrementada y resulta con una mayor energía de flujo; lo contrario se produce cuando su nivel hidrométrico es alto.

Los cambios en coberturas de suelo, fundamentalmente el desmonte, podrían ser también parte de la explicación sobre la torrencialidad en el sur de la cuenca (este aspecto está desarrollado en el Capítulo 6).

Después del pico de la crecida, tanto el río Guayquiraró como el arroyo Barrancas tardan típicamente 2 o 3 semanas para retomar su caudal base. Esta larga curva de descenso se debe explicar por la superficie importante de humedales en la cuenca; las divisoras planas, las amplias planicies de inundación, las cañadas, los esteros de las planicies fluviales antiguas, etc. Estos sistemas hidrogeomorfológicos tienen la capacidad de absorber y retener agua, suministrándola posteriormente sobre un tiempo mayor. Esta tendencia se nota particularmente en el arroyo Barrancas, donde la baja densidad de drenaje, la forma alargada de su cuenca, las pendientes extremadamente bajas y las grandes superficies de humedales son encausadas. A escala mensual, el río Guayquiraró y el arroyo Barrancas no responden solamente a las tendencias pluviales, lo cual muestra también la importancia de la retención de agua en los humedales, además de la evolución de la evapotranspiración a lo largo de las temporadas del año.

Debido a sus posiciones, se puede aproximar el caudal total a la salida de la cuenca del río Guayquiraró sumando los caudales de las estaciones hidrométricas de Paso de Llana y de Paso Juncue (Figura 50)³.

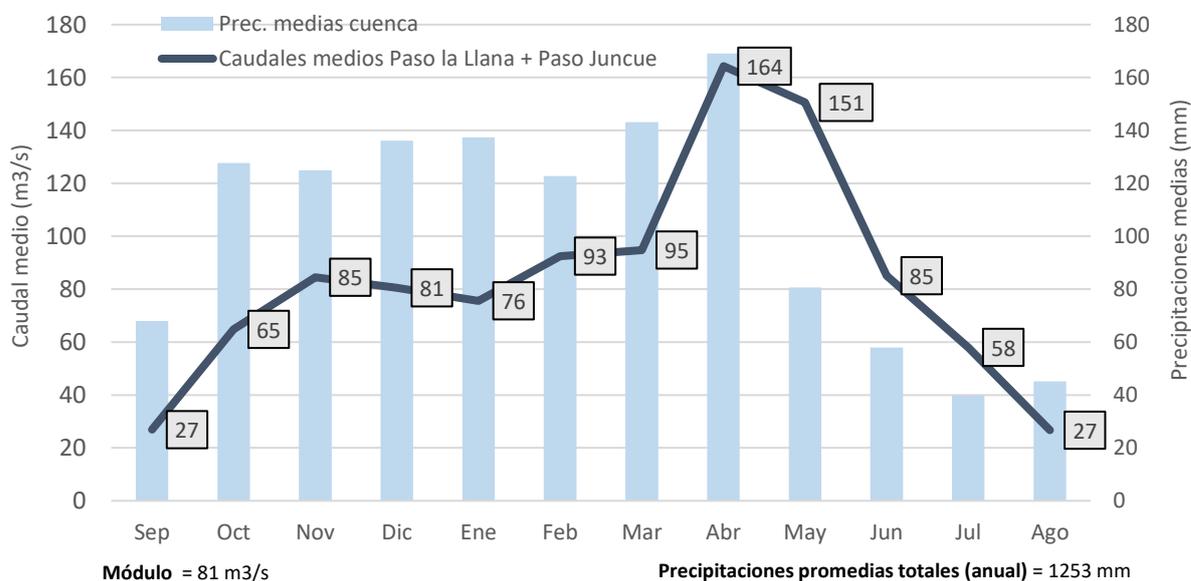


Figura 50. Hieto-hidrograma medio mensual aproximativo de la cuenca del Guayquiraró (suma de los caudales en las estaciones Paso Juncue y Paso la Llana).

³ La inconstancia de los datos en Paso la Llana y Paso Juncue hace que sea correcta la suma de los datos promedios, pero no la suma de las series de tiempo. También cabe precisar que no se toma en cuenta la última parte de la cuenca baja y que, por lo tanto, los caudales podrían ser levemente mayores.

Finalmente, se remarca la escasez tanto espacial como temporal de los datos hidrológicos. Los arroyos Ávalos y Sarandí no cuentan con estación hidrométrica ni datos de aforo disponibles públicamente. Por lo tanto, no se pudo hacer análisis sobre éstos.

3.3.3. Tendencias en la hidrogeomorfología

a) Incisión de la red hídrica

En el RVCE, se observó una tendencia hacia la incisión de la red hídrica (profundización del cauce). Este proceso se ha constatado en varias otras partes de la región, por ejemplo, en la cuenca del arroyo Feliciano (Ramonell y Alberdi, 2015).

El proceso de incisión, muchas veces asociado a arroyos rectificadas artificialmente, aquí afecta a cursos de agua sinuosos. Se identificaron procesos jóvenes de incisión, que se limitaban a la profundización del canal, y otros en etapas más avanzadas, que implicaban el ensanchamiento del curso (Figura 51, Simon y Hupp, 1986).



Figura 51. *Erosión que involucra el ensanchamiento de un cauce de orden 2. Departamento La Paz, Entre Ríos.*

b) Incoherencia entre los límites de las planicies fluviales y los límites de las zonas inundables

En el MAAP, las inundaciones de origen fluvial se caracterizan no solamente por inundar las planicies fluviales, pero además por sobrepasar sus límites topográficos e inundar partes de interfluvios, con una recurrencia significativa de 3 a 5 años. Este fenómeno ha sido identificado en el río Guayquiraró, aguas abajo de Paso Juncue, y en el arroyo Sarandí en el paraje Rincón

del Sarandí, pero podría ocurrir en otros cauces de la cuenca. Como es ampliamente referido en la literatura geomorfológica, lo ordinario o esperable es que los límites geomorfológicos de la planicie de inundación correspondan con los límites hidrológicos de las inundaciones, algo que no ocurre en este ambiente particular.

c) Aceleración en el desplazamiento del río Guayquiraró y del arroyo Barrancas

La migración lateral de los cauces de la cuenca baja es baja, ya que las tasas de desplazamiento promedian entre 0,3 m/año y 1,1 m/año, cifras del mismo orden de magnitud a las obtenidas por Ramonell y Alberdi (2015) para el vecino arroyo Feliciano.

Dicho esto, el hecho de que las tasas medias de migración lateral en los ríos Guayquiraró y Barrancas hayan aumentado entre los dos periodos estudiados (1975 – 2001, 2001 – 2020), y que 3 de los 4 tramos hayan tenido aumentos sustanciales (100 %, 83 % y 100 % en los tramos 1, 3 y 4 respectivamente) sugiere una tendencia a incrementarse en estos ríos. Ya que la tendencia se observa en varios cauces, la causa de este cambio parece ser regional, originada en las cuencas hidrográficas del arroyo Barrancas y del río Guayquiraró al menos.

En la escala temporal del análisis (44 años), la influencia de fenómenos tectónicos se descarta.

La diferencia en precipitaciones entre los dos periodos evaluados podría explicar en parte la aceleración en los cambios morfológicos. En términos sumatorios, los periodos 1980-2000 y 2001-2019 han sido cercanos a lo esperable según el promedio anual de 1250 mm⁴. Sin embargo, han sido más frecuentes los años superiores al promedio de lluvia en el segundo periodo. Considerando que los años 1975, 1977 y 1978 superaron el promedio anual de 1250 mm (se deduce a partir de evaluar los datos en las estaciones Curuzú Cuatiá, Esperanza y Malvinas Sur), entre 1975 y 2000, 9 años (36 % de los años) han superado el promedio, mientras que entre 2001 y 2019, 10 años (56 %) lo han traspasado.

Sin embargo, no se puede avanzar con certeza que la causa del aumento en migración lateral son estas variaciones en las precipitaciones, con datos a fin de cuentas limitados. Además, cabe considerar que los dos años con más precipitaciones, 1986 y 1998, ocurrieron en el primer periodo (Figura 16).

Las influencias posibles de las PAR sobre estas tendencias geomorfológicas son discutidas en el Capítulo 6.

⁴ Según éste, las precipitaciones deberían sumar 26 250 mm y 23 750 mm respectivamente, y fueron de 25 893 y 24 090 mm, es decir, diferencias de menos de 1,5 %.

Capítulo 4. Las prácticas agropecuarias en el territorio de la cuenca

4.1. Evolución histórica y situación actual

4.1.1. Prácticas agropecuarias antiguas y tradicionales

Las tierras entre el Paraná medio y el Uruguay medio fueron ocupadas por una sucesión de pueblos desde 10 000 a.A.P. (Miceli, 2015). La región era habitada por los guaraníes cuando llegaron los primeros europeos en el siglo XVI. Este pueblo practicaba agricultura de subsistencia, donde se cultivaban tierras durante 15 años hasta que perdiera su fertilidad, para después desplazarse a nuevos espacios de cultivos. Quemaban el monte de sabana y empezaban de nuevo a cultivar maíz, mandioca, zapallos y legumbres (Sarreal, 2013; Fábrega, 1991).

Las primeras siembras por los españoles en Corrientes se llevaron a cabo a finales del siglo XVI, con cultivos de maíz, mandioca y trigo europeo, pero los suelos correntinos, poco adaptados a la agricultura, no permitieron el desarrollo de esta actividad (Calvi, 2009). Sin embargo, los pastizales y las sabanas del interior de la provincia otorgaban condiciones adecuadas para la ganadería. La producción de carne vacuna tomó rápidamente un papel central en la economía y en la colonización del territorio correntino (Dell'Orto, 1995; Carrazonni, s.f.).

Al sur del río Guayquiraró, los suelos de sedimentos finos bajo bosque nativo tampoco convenían para la producción agrícola. Por lo tanto, como en el territorio correntino, la ganadería se impuso a lo largo de la época colonial como la actividad económica principal en el territorio que hoy conocemos como Entre Ríos. La expansión de dicha actividad causó deforestación y el desequilibrio en las cadenas tróficas por la imposición del ganado en el ecosistema natural (Fábrega, 1991; Matteucci et al., 2013; Rubio, Lavado y Pereyra 2019), aunque, según Wilson et al. (2008), una buena parte de la ganadería se llevó a cabo sin provocar deforestación masiva, por ejemplo, en el norte de Entre Ríos.

Hacia mitad del siglo XIX, todo el territorio de la actual provincia de Corrientes estaba ocupado. La estabilidad en la recién nacida República Argentina permitió a la ganadería seguir su desarrollo (Dell'Orto, 1995). El tajamar, un pequeño embalse de agua para el consumo del ganado, ya era utilizado en 1844 en Entre Ríos, ya que en este año el General Urquiza ordenó construirlos en esta región para contrarrestar la sequía (Bosch, 1954). Hoy en día, su uso es generalizado en el RVCE (Figura 49).



Figura 52. Tajamar en la cuenca alta del Guayquiraró, Curuzú Cuatiá.

A partir del siglo XX, hay voluntad política para diversificar la economía en el interior de Corrientes. Se desarrollan cultivos de tabaco, algodón, yerba, cítricos y arroz, redistribuyendo la población hacia los dos grandes ríos, el Paraná y el Uruguay. El arroz llega a la región en los años '30. La producción arrocera se hace inicialmente con escaso desarrollo tecnológico y concentrado en las riberas del Paraná y otros cauces importantes donde se abastecen de agua. Se cultivaban con bajos rendimientos en lotes de pequeñas superficies (Domínguez et al., 2010). La superficie sembrada con arroz aumentó paulatinamente hasta que el Noreste argentino se vuelve la principal región productora del país en los años '70 (Domínguez et al., 2010).

En la cuenca del río Guayquiraró, el cultivo del algodón y la ganadería ovina han sido actividades agropecuarias dominantes, particularmente en las cercanías de Sauce y de Pueblo Libertador. La ganadería ovina sigue siendo una actividad importante en muchas zonas de la cuenca, mientras que el cultivo de algodón desapareció casi por completo (Figura 50).

A pesar de los esfuerzos, la economía correntina no logró diversificarse al mismo ritmo que el crecimiento de su población rural, lo cual repercutió en un lento éxodo hacia las grandes ciudades a partir de los años '50 (Dell'Orto, 1995). Como ha sido comunicado por habitantes locales durante las salidas de campo, el descenso en las necesidades en mano de obra (provocado por los cambios tecnológicos y la caída del valor del algodón) provocó el abandono de tierras productivas y así, contribuyeron al éxodo en la región.

La llegada del INTA permitió el desarrollo tecnológico de la ganadería en Corrientes a partir de los años '60, aumentando los stocks de ganado y el rendimiento de la actividad (Domínguez et al., 2010). Será necesario esperar hasta los años '90 para ver importantes inversiones que impliquen cambios significativos para el interior de las provincias (Dell'Orto, 1995).



Figura 53. Ganadería ovina en las cercanías de Sauce, Corrientes.

4.1.2. Cambios recientes en las prácticas agropecuarias y transformaciones territoriales

En los años '90, la creación del MERCOSUR y la ubicación estratégica con Brasil y Uruguay provocaron el comienzo de una nueva etapa del cultivo del arroz en Corrientes y Entre Ríos. La producción cambia hacia variedades de grano largo fino y con los nuevos aportes tecnológicos se alcanzan rendimientos mucho mayores (ca. 8000 kg/ha) (Domínguez et al., 2010).

El relieve y la estructura hidrográfica del RVCE permitieron la producción de arroz usando represas para el riego, una tecnología ya implementada en Uruguay y en Brasil (Domínguez et al., 2010). El modelo de producción con represa se expande rápidamente. Este modo de producción mejora la calidad del agua obtenida, ya que no es salada, y baja el costo en combustibles comparado con la fuente de agua subterránea (Duarte y Diaz, 2007). Esto también permite una producción más rentable y reduce los riesgos asociados a las sequías (Domínguez et al., 2010).

El cambio de fuente de agua permitió la expansión de la producción arrocería desde el Paraná y el Uruguay hacia los interiores provinciales, tanto en Corrientes como en Entre Ríos. Mientras los suelos arcillosos con drenaje lento son poco adaptados para la producción de soja, maíz y otros cultivos de granos, esta característica se vuelve una ventaja en el cultivo de arroz, ya que favorece la inundación del campo y reduce las pérdidas de agua por

infiltración (Solier et al., 2007; Carñel et al., 2014). De manera general, el sur de Corrientes y el norte de Entre Ríos presentan condiciones climáticas, hidrográficas, topográficas y edáficas óptimas para la producción de este cereal (Irigoyen, 2007), permitiendo rendimientos altos (hasta 10.000 kg/ha en el establecimiento visitado en Curuzú Cuatiá).

Son las grandes empresas ganaderas e inversores externos al sector los que participan en la transición hacia este tipo de producción, debido al costo de inversión que esto implica. Así, en muchos casos, los pequeños y medianos productores han sido perdedores en estas transformaciones (Pagliettini et al., 2005; Iglesia et al., 2007; Báez et al., 2015).

Además del arroz, los cultivos de maíz, trigo, lino y particularmente de soja se expandieron en la región, especialmente en el norte de Entre Ríos y, de forma mucho más moderada, en el sur de Corrientes (Domínguez et al., 2010). Esas transformaciones hacen parte de una tendencia a gran escala en la Argentina desde los años 1990, en la cual la agricultura expande sus límites fuera de la Pampa húmeda, particularmente en el Noroeste y el Noreste, a través del cultivo de la soja. El avance de la soja provocó y provoca una deforestación fuerte en varias provincias de la Argentina, incluidas Corrientes y Entre Ríos (Muñoz et al., 2005).

La agricultura de secano se desarrolló en los valles fluviales del RVCE, uno de los pocos ambientes en la cuenca del Guayquiraró con buen drenaje. Por su parte, el arroz se implantó tanto en los valles fluviales como en las divisoras planas del RVCE, además de las zonas del MAAP donde ya se cultivaba antes de los años 1990.

Desde los años 80, la carga de animales por superficie aumentó paulatinamente, encontrándose actualmente cerca de 1 equivalente vaca/ha en la zona de Sauce. Se observó además en esta zona un cambio desde la ganadería ovina hacia la ganadería bovina (comunicaciones personales con Rafael Sebastián Moreno, AER INTA Sauce, noviembre de 2021).

4.1.3. Actividad agropecuaria actual

Datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP, 2019a y 2019b) y del INTA (Abelleyra et al., 2020) fueron compilados y comparados a escala departamental y para varios años entre 2008 y 2021. Las tablas completas se pueden consultar en el ANEXO III.

La ganadería sigue siendo la actividad productiva más importante en la región centro-sur de Corrientes. Domina la cría mixta ovina y bovina de forma extensiva en pastizales (Figura 50). Dicho esto, los datos de existencia de bovinos y ovinos del MAGyP (2019a y 2019b) muestran una leve reducción en los stocks bovinos desde 2008 para todos los departamentos. Los

stocks ovinos aumentaron considerablemente en Esquina y La Paz y levemente en Feliciano, mientras que se redujeron considerablemente en Curuzú Cuatiá y en Sauce.

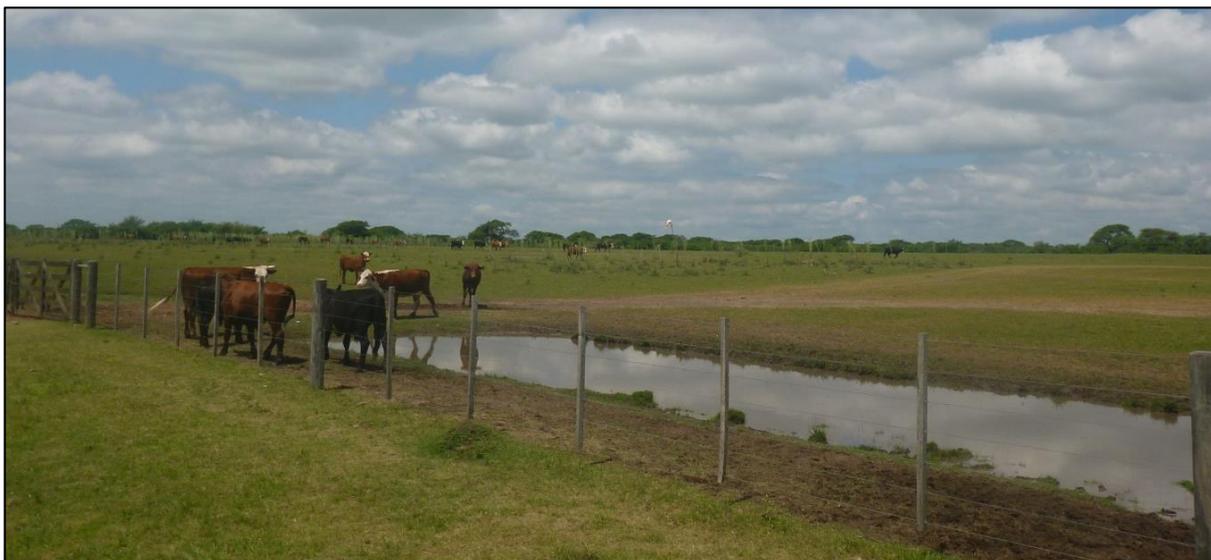


Figura 54. Establecimiento ganadero en la ruta 126 entre Sauce y Pueblo Libertador, Esquina.

El mapa nacional de cultivos (MNC) del INTA de 2019-2020 (Abelleyra et al., 2020) fue recortado usando el polígono de la cuenca para establecer en la Tabla 6 las siguientes superficies dedicadas a la agricultura en la cuenca del Guayquiraró, en 2019-2020.

Tabla 6. Superficies dedicadas a diferentes cultivos en la cuenca del Guayquiraró en invierno 2019 y verano 2020, a partir de Abelleyra et al. (2020)

	Superficie de cultivo sembrado (hectáreas)				
Invierno 2019	Cereales de invierno		Barbecho (sin cultivo)		Total
	12 004		37 184		49 188
Verano 2020	Soja	Arroz	Maíz	Barbecho	Total
	29 521	10 865	7700	1187	49 273

El MNC identifica en la cuenca del Guayquiraró cultivos de soja, maíz y arroz para el verano 2020. En invierno, la mayoría de las tierras cultivadas se encontraban o en barbecho o se cultivaban cereales de invierno, es decir, trigo, avena, cebada y otros.

A raíz de los datos del MAGyP, se observa que la variación total en superficie sembrada es positiva en todos los cultivos en los departamentos de Entre Ríos, particularmente para la soja, el trigo y el maíz. En los departamentos de Corrientes, la variación total de superficie sembrada de soja, trigo y maíz es generalmente negativa, a la excepción de un aumento

marcado en el trigo para Sauce. El arroz es el único cultivo en tener una variación positiva en todos los departamentos. Su aumento es leve en Entre Ríos y fuerte en Corrientes.

La tabla 7 presenta la evolución de dichos cultivos tomados en conjunto. Muestra un aumento fuerte en los departamentos entrerrianos y una condición de estabilidad en los departamentos correntinos.

Coincide con lo que remarcan Currie y Montoya (2019), es decir que el cultivo de arroz en la provincia de Corrientes es constante con 100 000 ha de superficie sembrada desde 2000.

Tabla 7. Superficie sembrada con los cultivos principales (arroz, soja total, maíz total y trigo total) en departamentos de la cuenca del Guayquiraró en los últimos años⁵.

Campaña agrícola	La Paz	Feliciano	Curuzú Cuatiá	Sauce
2008-2009	75 767	19 487	22 550	6841
2019-2020	194 000	29 500	22 235	6580
Variación total	+156 %	+51 %	-1 %	-4 %
fuentes	BCER	BCER	MAGyP	MAGyP

A partir de las consultas hechas con productores de la zona, se comprobó que la mayoría de los cultivos se hacen con siembra directa y que existen dos patrones dominantes de cultura agrícola: una campaña de verano (soja, maíz, lino, girasol, sorgo, etc.) seguida de una campaña de invierno (trigo, avena, raigrás, etc.), o una campaña de verano doble (de primera y de segunda) con un cultivo de soja o de maíz. En ambos casos, se siembran todos los años.

4.1.4. Modelo de producción arrocería

A diferencia de otros cereales y oleaginosas, el cultivo de arroz necesita un insumo en agua importante para su producción. La técnica de riego que se utiliza para este cultivo es la inundación del campo, ya que la planta de arroz tiene la propiedad inherente de sobrevivir tanto en un suelo inundado como en suelo no inundado. Asegura la disponibilidad constante de agua para la planta y desfavorece el crecimiento de malezas (Fontán, 2012). Esta técnica de riego es generalizada a todos los cultivos arroceros de la Argentina.

En la región, se siembra el arroz entre septiembre y noviembre y se cosecha hacia febrero y marzo (Carñel et al., 2014; Herber, Kruger y Fontana, 2017). Se inundan los campos de arroz con una lámina de agua, 15 días después de la emergencia de los brotes y hasta 15 días

⁵ Esquina está excluido por falta de datos recientes

después de la floración, es decir, por 90 días en su ciclo de crecimiento (Herber, Kruger y Fontana 2017; Kraemer et al., s.f.). Según la información colectada en nuestra visita a una estancia arrocera, la lámina de agua, anteriormente de entre 5 y 10 cm, se redujo a aproximadamente 3 cm en los últimos años, con el fin de reducir el consumo de agua.

Es de común práctica en la región la rotación del cultivo del arroz con ganadería con pastura implantada o con ganadería en pastura natural, lo cual conlleva a un buen descanso del suelo, retribución de carbono y control adecuado de malezas. Se realizan también rotaciones con cultivos de secano como soja, maíz, trigo o raygrass, según patrones de 2 años de arroz y 4 años de otro cultivo (comunicaciones personales con Rafael Sebastián Moreno, AER INTA Sauce, noviembre de 2021).

Sin embargo, se implementa cada vez más el cultivo de arroz en siembra directa sin rotación (Fontán, 2012). Este modo de producción ha sido facilitado por la llegada de paquetes tecnológicos de variedades de arroz implicando importantes insumos agroquímicos (Fontán, 2012). Pese a las altas necesidades fitosanitarias, esta intensificación lleva otras ventajas ambientales y económicas, tales como reducir la erosión y la compactación relacionadas con el pisoteo del ganado, reducir la superficie de tierra utilizada, reducir las canalizaciones, el consumo de combustibles fósiles, los mantenimientos y varios tipos de labores (Fontán, 2012).

El embalse con represa es la fuente de agua de riego para el arroz de mayor importancia en Corrientes (Bogado, s.f) y en el norte de Entre Ríos (Marano y Filippi, 2015), superando las fuentes de napas freáticas o cursos de agua.

Las represas se ubican en las cabeceras de las cuencas, sobre cauces de orden 2 o 3. Se construyen en zonas con mayor relieve posible, para evitar inundar una gran parte de la chacra (Fontán, 2014) o en zonas bajas húmedas que no son cultivables (Iturburu, 2007). La presa se construye con un dique de material de suelo disponible en el lugar, cuyo contenido en arcilla da la impermeabilidad necesaria para la acumulación del agua (Fontán, 2012). El reservorio, o lago producido por la acumulación del agua atrás de la presa tiene una profundidad media entre 1,5 m y 2,1 m y una superficie de unos cientos de hectáreas (Irigoyen, 2007).

Cuando el reservorio alcanza su capacidad máxima de agua, los excedentes hídricos salen por dos vertederos ubicados a ambos lados de la represa. Esos vertederos están diseñados para soportar hasta eventos de lluvia con tiempo de recurrencia de 100 años en condiciones hídricas extremas (Fontán, 2012), o hasta 500 años en otros casos (Irigoyen, 2007). Según la información colectada en nuestra visita a una estancia arrocera, la ocurrencia de los

desbordes por los vertederos es muy variable según las características propias a cada represa; puede ser desde una recurrencia anual hasta de una vez por década.



Figura 55. Terraplén de una presa arrocera en las cercanías de Cazadores Correntinos, Curuzú Cuatiá, Corrientes. A la izquierda se observa el lago, en el centro la represa vegetada y a la derecha el fondo natural del valle fluvial.

Los embalses pueden contener volúmenes de agua desde los 4.000.000 m³ hasta los 14.000.000 m³ por ejemplo en el norte de Entre Ríos, según indica Iturburu (2007). Para obtener una aproximación rápida del volumen de agua potencial retenido por una represa, se multiplica la superficie del lago por el 40 % de la profundidad máxima del mismo (Fontán, 2012).



Figura 56. Embalse arrocero en las cercanías de Cazadores Correntinos, Curuzú Cuatiá, Corrientes. En el mismo, algunos árboles muertos han quedado inundados, vestigios de la vegetación previa a la construcción de la presa.

La cuenca de aporte al reservorio varía en superficie según la amplitud del proyecto, pero la proporción de superficies entre el lago y su cuenca de aporte se ubica generalmente entre 20 % y 30 % (Eclesia et al., 2007). En muchos casos, se construyen canalizaciones laterales al reservorio, llamados canales robadores, que sobrepasan la línea divisora de agua de la cuenca de aporte y captan agua de otras cuencas, a veces gracias al uso de bombas de gran caudal (Irtuburu, 2007).

Según el estudio de Brumatti et al. (2007), 64 % de las entradas de agua a los embalses son del escurrimiento superficial, mientras que 36 % son de los aportes de la lluvia directa sobre el reservorio. De las pérdidas de agua del reservorio, 75 % las hacen los aprovechamientos para el riego, 9 % la infiltración y 16 % la evaporación. Este estudio se basó sobre datos empíricos de campo y sobre modelación, a la escala temporal de un año. En el año del estudio de la referencia no ocurrió ninguna pérdida por los vertederos laterales del embalse (Brumatti et al. 2007).

En todo su ciclo, el arroz consume aproximadamente entre 10.000 y 15.000 m³/ha o desde 0,9 a 2,5 litro / segundo / hectárea (Currie y Ruberto, 2003; INTA y ACPA, 2008; Carfiel et al., 2014) incluyendo las pérdidas por infiltración y evaporación, la transpiración de la planta de arroz, la saturación del suelo y la lámina de agua constante.

El riego en arrocera implica una precisa nivelación del terreno y una red jerarquizada de canalizaciones, llevando el agua desde el reservorio hasta el punto más alto del campo, para finalmente repartirlo en todos los lotes cultivados.

Según las observaciones hechas en nuestra visita a una estancia arrocera de Curuzú Cuatiá, el agua de las represas es clara; eventuales rellenos por sedimentación en ellos no pudieron ser evaluados. Cabe destacar la diversidad de fauna que frecuenta tanto el lago como los campos arroceros: yacarés, nutrias, ñandúes, carpinchos, etc., constituyéndose en ellos verdaderos humedales artificiales.



Figura 57. Campo de arroz inundado en las cercanías de Cazadores Correntinos, Curuzú Cuatiá, Corrientes.

4.2. Coberturas terrestres, infraestructuras agropecuarias y manejos ingenieriles fluviales

4.2.1. Aspectos metodológicos

a) Análisis de cambios en las coberturas terrestres

El objetivo del análisis de cambio en las coberturas terrestres fue el de mapear el avance de la agricultura entre la década de los años 1980 y la década de los años 2010. Este periodo de tiempo es adecuado porque abarca el antes y el después de las importantes transformaciones territoriales de la región que han ocurrido en los años 1990 y 2000. El análisis de coberturas se hizo mediante clasificaciones de imágenes, un proceso que permite modelizar la cobertura del suelo a partir de imágenes satelitales (Chuvienco, 1991). Esto permitió cuantificar el avance de la superficie agrícola y relacionarlo con los cambios en las prácticas agropecuarias territoriales. Además, los datos de cobertura de tierra se implementaron en el modelo hidrológico presentado en el capítulo 5.

Aunque se suelen usar de manera indistinta, los conceptos de cobertura terrestre y de uso del suelo son distintos. En efecto, el uso del suelo se refiere al aprovechamiento antrópico que tiene lugar en la superficie terrestre, mientras que la cobertura terrestre se refiere a la entidad material que cubre la superficie, incluyendo los elementos biofísicos y antrópicos.

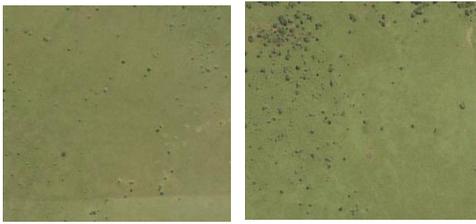
El sondeo de las coberturas terrestres se llevó a cabo usando imágenes de las misiones Landsat. Se eligió este satélite de acuerdo con sus parámetros técnicos, considerando que integra imágenes satelitales con 30 m de resolución espacial en sus bandas multiespectrales desde el año 1984. Tiene entonces datos con un nivel adecuado de precisión espacial y los años necesarios para un estudio regional multitemporal. Se optó por procesar estas imágenes con clasificaciones no supervisadas de algoritmo K means.

A partir de los objetivos del análisis, de observaciones en imágenes satelitales, de los antecedentes en la región (Ligier et al., 2001; Navarro de Rau, 2012; Minotti, 2017) y de consultas con expertos (comunicación personal con Patricia Kandus, marzo de 2021), se establecieron 8 clases de cobertura (Tabla 8).

Tabla 8. Clases de coberturas terrestres presentes en la cuenca del río Guayquiraró.

Abreviatura	Clase conceptual	Definición	Fotografías e imágenes de alta resolución (aprox. 1:5.000)
VH	VEGETACIÓN HIDROFITA	Suelo con hidromorfismo dominado por vegetación hidrófita según la definición de Neiff, Casco y Arias (2004), ya sea herbácea o arbustiva-árborea. Tiene una cobertura por árboles entre 0 % y 60 %.	 <p data-bbox="746 981 1401 1010">Planicie fluvial del río Barrancas, Pueblo Libertador, Esquina.</p>  

<p>BC</p>	<p>BOSQUE CERRADO</p>	<p>Suelo dominado por vegetación arbustiva-arbórea. Aproximadamente entre el 60 % y 100 % del área está cubierta por árboles.</p>	 <p>Bosque cerrado al margen de la ruta 126 entre Sauce y Pueblo Libertador, Esquina.</p> 
<p>SS</p>	<p>SABANA SECA</p>	<p>Suelo sin hidromorfismo, dominado por vegetación arbustiva-arbórea y herbácea. Aproximadamente de 10 % hasta 60 % de la superficie se encuentra cubierta por árboles</p>	 <p>Sabana seca en un campo de cultivo abandonado, cercanías del Paso Juncue, Esquina.</p> 

<p>PS</p>	<p>PASTIZAL SECO</p>	<p>Área dominada por vegetación herbácea, sin hidromorfismo en el suelo. Aproximadamente de 0 % hasta 10 % del área está cubierta por árboles.</p>	 <p>Pradera ganadera, aproximadamente 15 km al sur de Cazadores Correntinos, Curuzú Cuatiá.</p> 
<p>VE</p>	<p>VEGETACIÓN ESCASA</p>	<p>Área caracterizada por la escasez de vegetación. Aproximadamente entre 0 % y 50% del área está cubierta por vegetación.</p>	  <p>Blanquízal en la ruta 126 entre Pueblo Libertador y Sauce, Esquina.</p>
<p>AS</p>	<p>AGUA SUPERFICIAL</p>	<p>Cuerpo de agua en superficie natural o antrópica.</p>	 <p>Represa arrocera en las cercanías de Cazadores Correntinos, Curuzú Cuatiá.</p> 

Lo	LOCALIDAD	Superficie construida, de baja a media densidad, donde vive la población.	 <p>Plaza central, Sauce, Corrientes. Fuente: Google Earth</p> 
Ar	ARROCERA	Monocultivo de arroz.	 <p>Campo de arroz inundado. Curuzú Cuatiá, Corrientes.</p> 
OCyB	OTROS CULTIVOS Y BARBECHO	Tierras agrícolas (otras presentan cultivos arroceros), principalmente monocultivos de soja, maíz y cereales de invierno. Se incluyen aquí las tierras sin cultivo (barbecho).	 <p>Campo sin cultivo (barbecho), cercanías de San Victor, Feliciano.</p>  

Para evaluar la fiabilidad del mapeo de 2019, se procedió a un muestreo de validación para la formación de una matriz de error (Chuvieco, 1991). La exactitud general de la imagen de cobertura es de 79 %, la exactitud ponderada de 78 % (el porcentaje de muestreo corroborado ponderado por el porcentaje de superficie de cada clase), el Índice Kappa de 76 %, y a partir del método de Chuvieco (1991), se afirma con un 95 % de certeza que la exactitud general de la clasificación se encuentra entre 77 % y 81 %. Dichos valores son suficientes para la estimación de las coberturas en el marco de este trabajo, sobre todo tomando en cuenta que las clases de mayor interés (AS, Ar y OCyB) tienen niveles de exactitud altos, entre el 80 % y 97 %. También se comparó visualmente los mapas de coberturas con aquellos de Navarro de Rau (2012), validando una repartición similar de las coberturas terrestres.

El mapeo de 1987 no pudo ser validado ya que no se contó con otra fuente de imágenes de alta precisión para verificar las coberturas. Dicho esto, se considera que la validez es similar a la del mapeo del año 2019, ya que ambos han sido realizados según la misma metodología.

Se llevó a cabo también un sondeo de infraestructuras agropecuarias, en el cual se estimaron superficies y volúmenes de agua retenidos en los embalses (arroceros y ganaderos) y se mapearon las canalizaciones en la cuenca.

Los detalles metodológicos del análisis de cambios en coberturas terrestres y del sondeo de infraestructuras agropecuarias se pueden consultar en el ANEXO IV.

4.2.2. Límites metodológicos

a) Clasificación de las coberturas terrestres

Existe una incertidumbre sobre la clasificación de las coberturas, particularmente entre VH, SS y PS, ya que estos ecosistemas se diferencian sobre un continuum de condiciones. Además, en el caso de la VH estas condiciones son muy sensibles a los cambios meteorológicos. Por ejemplo, los cambios en la distribución espacial de la VH en las divisoras planas se deben probablemente al estado de humedad en los suelos captado por las dos imágenes satelitales.

Sin embargo, la metodología incluyó una atención especial a las clases OCyB y Ar, por lo cual se puede tener un nivel de confianza alto en los resultados relativos a estas clases.

b) Sondeo de infraestructura agropecuaria

Como los establecimientos arroceros no suelen tener datos de batimetría de sus embalses o son de muy difícil acceso para el público, se estimaron los volúmenes usando herramientas de teledetección y la ecuación simplificada de Irigoyen (2007). La estimación de los volúmenes de agua de los embalses arroceros pudo ser verificada para tres de ellos cuyos datos de volumen fueron otorgados por el establecimiento arrocero. En dos casos, los volúmenes estimados fueron considerados cercanos a los valores reales (represa 4; volumen real máximo de 5 680 000 m³, estimado en gabinete de 4 608 000 m³, represa 7; volumen real máximo de 5 083 000 m³, estimado en gabinete de 4 992 000 m³). En el tercer caso (represa 11; volumen real máximo de 9 080 000 m³, estimado en gabinete de 5 952 000 m³), la diferencia entre el volumen estimado y el volumen real es probablemente debida a la vegetación acuática en la superficie del lago que impide la buena medición de la misma. Asimismo, se destaca que las superficies y los volúmenes de agua retenidos en las represas arroceras son probablemente subestimados por la misma razón.

Respecto al relevamiento de las canalizaciones, muchas de ellas son estrechas, colonizadas por vegetación acuática o paralelas a caminos y rutas, lo que las hace difícil de identificar incluso con imágenes de alta resolución. Por lo tanto, es probable que las canalizaciones identificadas en la Figura 65 estén subestimadas.

4.2.3. Cambios en las coberturas terrestres

La

Figura 58 y la Figura 59 muestran los mapeos de coberturas terrestres para los años 1987 y 2019 respectivamente.

A partir del mapa de coberturas terrestres del año 1987, se observa un patrón espacial regional en la vegetación del RVCE en la cual la SS es la cobertura dominante en el sur de la cuenca, principalmente en Entre Ríos, mientras hacia el norte, es decir, entrando en el interior de la provincia de Corrientes, el PS se vuelve dominante. Subordinados por estas dos coberturas están los sectores de VH asociados a las divisoras planas y a las planicies de inundación. En general, se encuentra poca superficie de BC⁶. Este acompaña en sus riberas a los cursos Ávalos, Barrancas, Guayquiraró, Sarandí y otros tributarios importantes.

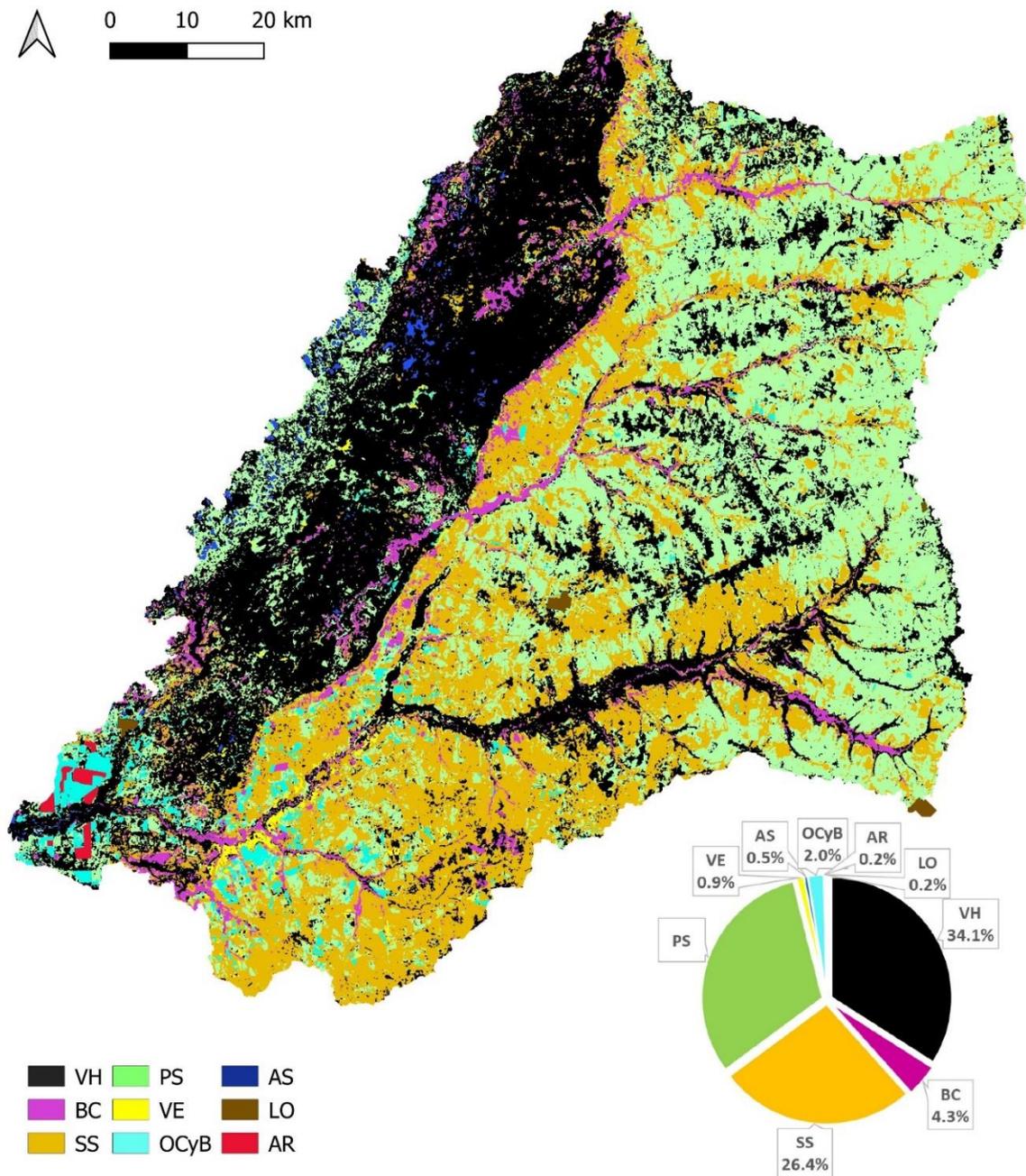
⁶ La superficie de BC en la planicie del arroyo Basualdo en el sureste de la cuenca corresponde en su mayoría con VH que no ha podido ser clasificada correctamente por su valor de reflectancia muy alta. Esta superficie errada representa ca. 12 km²

En el MAAP, la VH actúa a modo de matriz entre los otros tipos de cobertura, los cuales aparecen en zonas específicas. El BC y la SS se organizan en parches, en paleo-albardones de las antiguas planicies fluviales y de los abanicos aluviales. Los límites entre BC y SS no son marcados, sino que existe un continuo entre ambas coberturas.

En 1987, las tierras agrícolas eran escasas (215 km²) y concentradas en el sur y suroeste de la cuenca. Los pocos cultivos arroceros (22 km²) se encontraban en la parte más baja de la cuenca, en ambas orillas del Guayquiraró inferior.

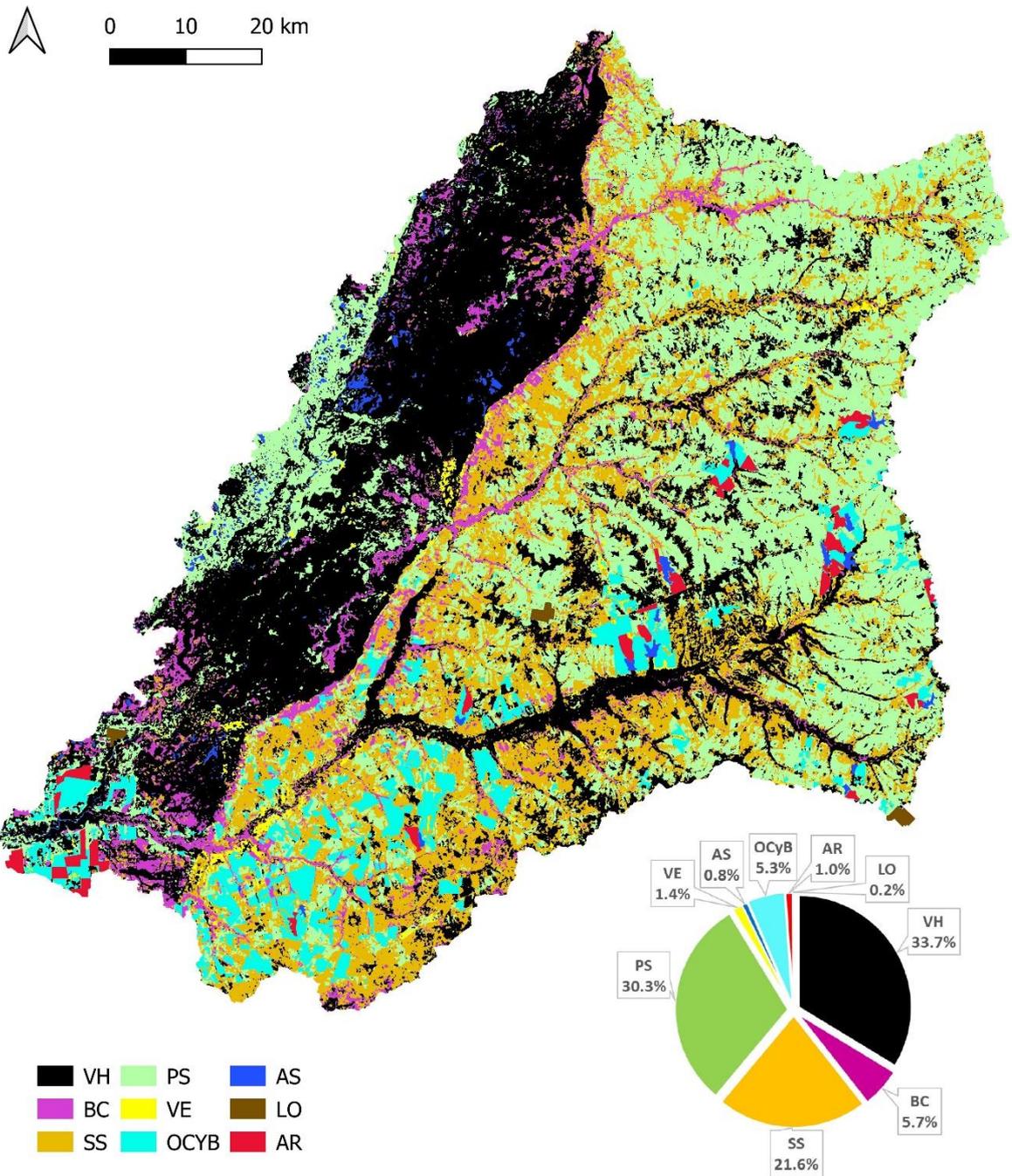
Los cambios más importantes entre 1987 y 2019 afectaron a la SS, los OCyB y las Ar. La agricultura se expandió significativamente en el sur de la cuenca, especialmente en el SH del Guayquiraró alto. Efectivamente, la cobertura OCyB se duplicó, pasando del 2,0 % de la superficie de la cuenca al 5,2 %.

El cultivo del arroz apareció en nuevos espacios puntuales, principalmente en el centro este y en el sur, en subcuencas tributarias del Guayquiraró superior o del Barrancas superior. El mismo pasó de 22 km² a 91 km², alcanzando el valor de 1 % de la superficie de la cuenca. Ello representa un incremento de 400 %, comparable al descrito por Domínguez et al. (2010) que encontraron un aumento de la superficie sembrada con arroz de 336 % en el departamento de Mercedes. Dicho esto, el AR y los OCyB siguen representando una proporción baja de la superficie de la cuenca.



Cobertura	Superficie (km ²)	Cobertura	Superficie (km ²)
Vegetación hidrófita (VH)	3208	Agua superficial (AS)	47
Bosque cerrado (BC)	408	Localidad (LO)	15
Sabana seca (SS)	2485	Arroceras (AR)	22
Pastizal seco (PS)	2946	Otros cultivos y barbecho (OCyB)	193
Vegetación escasa (VE)	88		

Figura 58. Coberturas terrestres en la cuenca del Guayquiraró en 1987 (Resolución espacial 30 m).



Cobertura	Superficie (km ²)	Cobertura	Superficie (km ²)
Vegetación hidrófita (VH)	3177	Agua superficial (AS)	78
Bosque cerrado (BC)	537	Localidad (LO)	15
Sabana seca (SS)	2032	Arroceras (AR)	91
Pastizal seco (PS)	2851	Otros cultivos y barbecho (OCyB)	500
Vegetación escasa (VE)	131		

Figura 59. Coberturas terrestres en la cuenca del Guayquiraró en 2019 (Resolución espacial 30 m).

La Figura 60 evidencia el balance para cada cobertura terrestre en cuanto a superficie entre 1987 y 2019.

La SS es por lejos la cobertura que más perdió superficie (453 km²) pasando de 26,4 % a 21,6 % de cobertura en la cuenca. El PS perdió cinco veces menos superficie que la SS.

Las arroceras están casi siempre acompañadas de una represa arrocera, lo cual explica en parte el aumento de 31 km² de AS. Los OCyB ganaron 308 km² en superficie y las AR, 68 km².

La superficie de BC aumentó de 129 km².

Pese a que el aumento de VE es importante, no es posible concluir al respecto ya que la validación de esta cobertura en el mapa de coberturas terrestres de 2019 ha dado valores bajos (49 %).

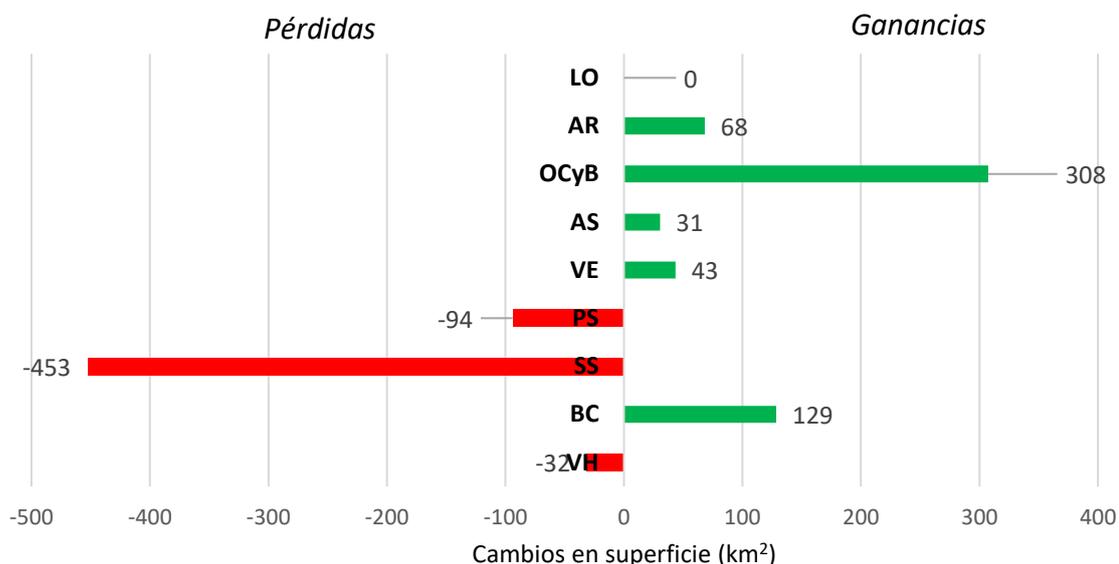


Figura 60. Cambios en superficie de cobertura entre 1987 y 2019.

Los dos siguientes mapas muestran donde aparecieron (Figura 61) y desaparecieron (Figura 62) tierras agrícolas.

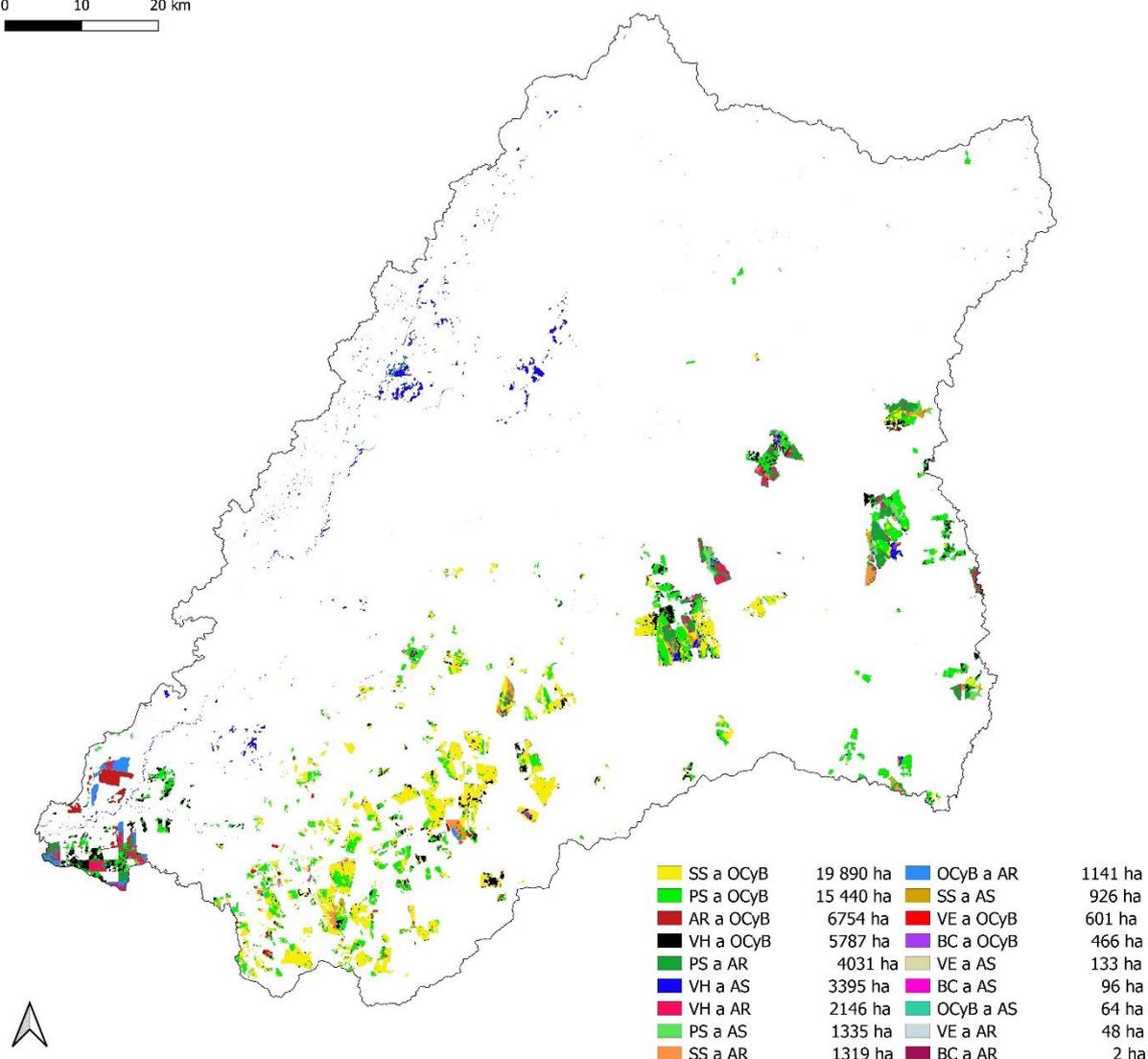
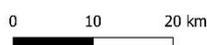


Figura 61. Nuevas tierras agrícolas: cambios de coberturas entre 1987 y 2019 hacia Otros Cultivos y Barbecho (OCyB), Arroceras (AR) y Agua Superficial (AS).

La pérdida de la SS y del PS a consecuencia de los OCyB fueron los dos cambios más importantes, ocurriendo principalmente en el sur de la cuenca. También es notable el retroceso de la VH a mano de los OCyB. La transformación de BC hacia OCyB fue poca, alcanzando solamente 466 ha.

Por su parte, ha sido más moderado el cambio hacia AR de PS, de VH y finalmente de SS, sumando un total de 7496 ha.

Considerando los cambios principales mencionados anteriormente, la expansión de tierras dedicadas a la agricultura en la cuenca fue a costo de 49 079 ha de SS, PS, VH y BC.

Cabe mencionar que los cambios entre AR y OCyB se explican por las rotaciones de cultivo que tienen lugar entre arroz y los otros cultivos, además de los periodos en los cuales se dejan los campos de arroz en barbecho.

No se sacan conclusiones al respecto del aumento en AS ya que los cambios en el noroeste de la cuenca están relacionados con inundaciones en el MAAP y no con las represas arroceras.

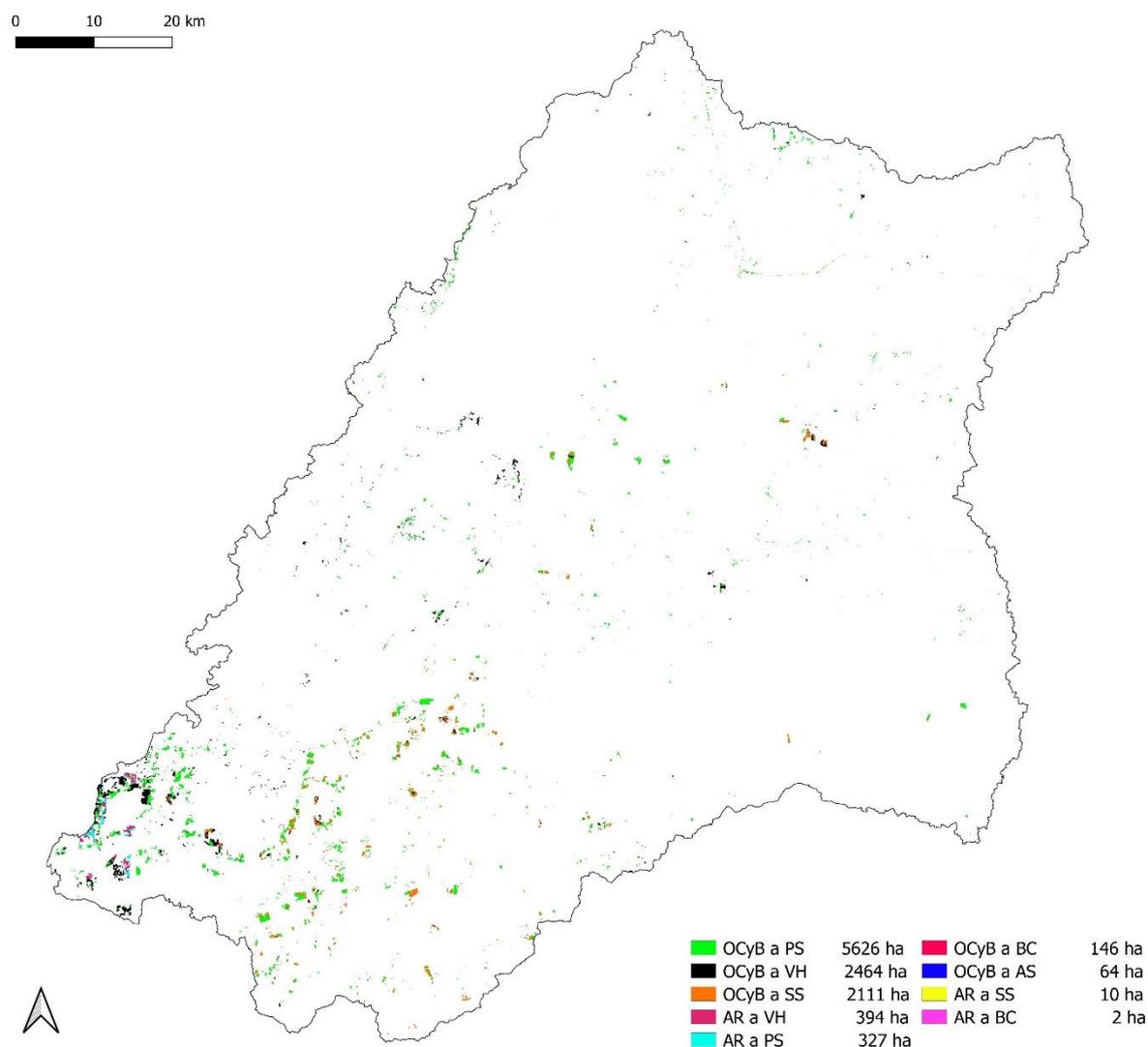


Figura 62. Pérdidas de tierras agrícolas: cambios de coberturas entre 1987 y 2019 desde Otros Cultivos y Barbecho (OCyB) y Arroceras (Ar).

Los cambios mostrados en la Figura 62 pueden ser vinculados a rotaciones entre agricultura y ganadería. Dicho esto, en otros casos, los cambios deben explicarse por pérdidas más a largo plazo de tierras cultivadas a mano de PS o SS.

En esos lugares se observa un retorno del ecosistema semi-natural, por lo general hacia un pastizal o una sabana, hidrofita o seca según el caso. Su aprovechamiento bajo ganadería es variable.

4.2.4. Represas arroceras

La totalidad de las represas arroceras se encuentran en el RVCE; la gran mayoría de ellos en el SH del Guayquiraró, algunos en el SH del Barrancas y uno solo en el SH del Ávalos. Están construidos en cauces de orden 3 o menores (Figura 63).

Las cuatro primeras represas arroceras en la cuenca del río Guayquiraró se construyeron en 1993 (Tabla 9). Entre 1996 y 2000, el incremento fue rápido, con 7 nuevas represas. Después, el incremento fue paulatino hasta los años 2012 y 2013, cuando se construyeron 3 embalses nuevos, incluyendo el más grande de la cuenca con 7,26 millones de m³. El volumen retenido se redujo en 2014 y en 2015, ya que 3 represas dejaron de funcionar en esos años. El total de volumen de agua retenido por represas arroceras hacia el 18 de agosto de 2019 fue de unos 45.5 millones de m³, pero el máximo histórico fue de 57.1 millones de m³ en 2013. La superficie promedio es de 174 ha y el volumen promedio es de 3,267 millones de m³.

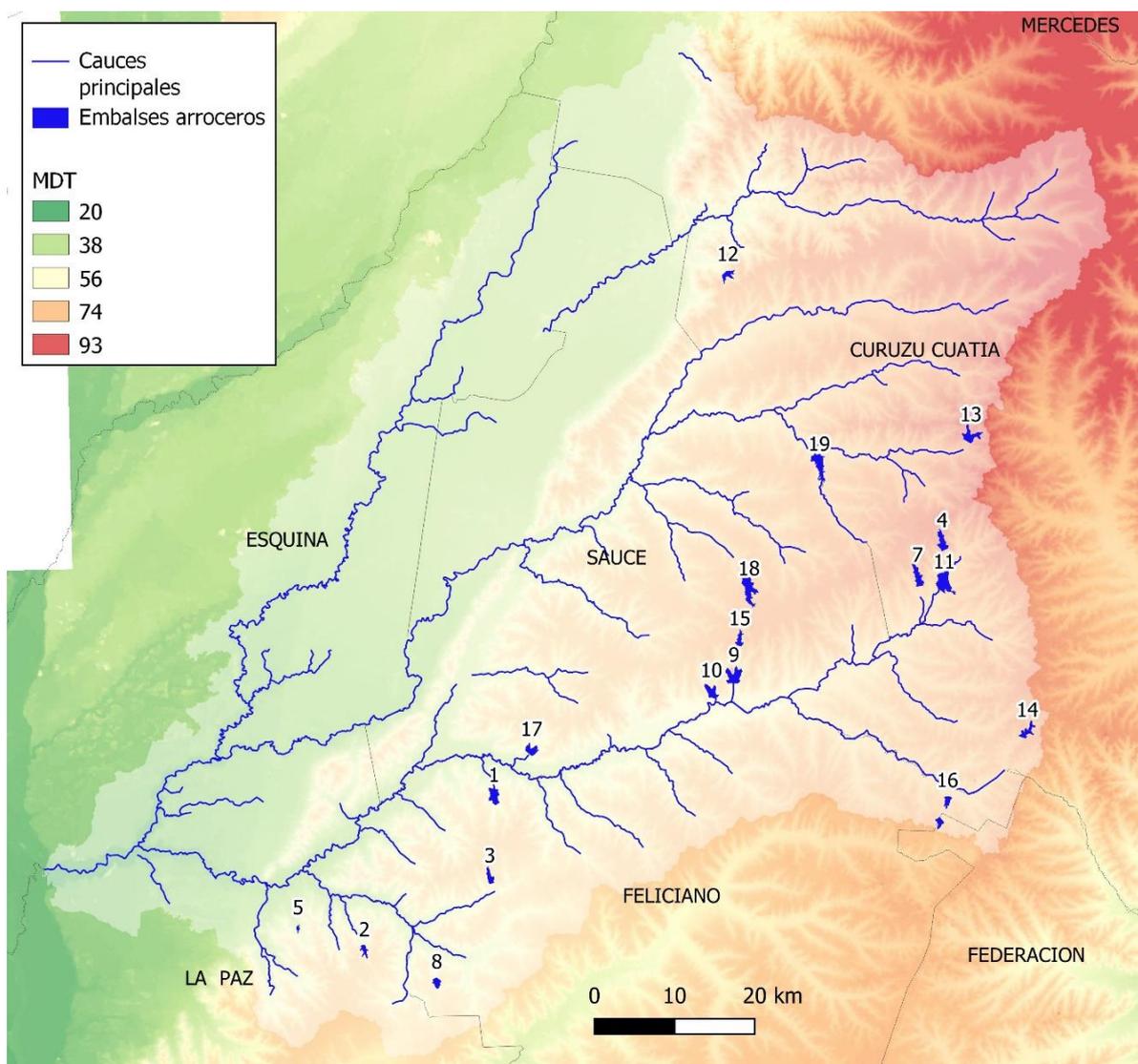


Figura 63. Cartografía de las represas arroceras en la cuenca del río Guayquiraró (activas e inactivas).

Tabla 9. Las represas arroceras en la cuenca del río Guayquiraró.

ID	PROV.	DEPART.	SH	CONST.	DESUSO	SUPERFICIE ESTIMADA (ha)	PROF. MÁX. ESTIMADO (m)	VOLUMEN ESTIMADO (m ³)
1	E.R.	Feliciano	Guay. sup.	1993	2015	198	7	5544000
2	E.R.	La Paz	Guay. sup.	1993	-	84	9	3024000
3	E.R.	Feliciano	Guay. sup.	1993	-	111	5	2220000
4	Corr.	Curuzú C.	Guay. sup.	1993	-	192	6	4608000
5	E.R.	La Paz	Guay. sup.	1994	-	25	2	200000
6	E.R.	Federación	Guay. sup.	1995	-	82	4	1312000
7	Corr.	Curuzú C.	Guay. sup.	1997	-	208	6	4992000
8	E.R.	Feliciano	Guay. sup.	1998	2017	97	4	1552000
9	Corr.	Sauce	Guay. sup.	1998	-	280	4	4480000
10	Corr.	Sauce	Guay. sup.	1999	-	168	5	3360000
11	Corr.	Curuzú C.	Guay. sup.	1999	-	372	4	5952000
12	Corr.	Curuzú C.	Aválos	2000	2014	115	6	2760000
13	Corr.	Curuzú C.	Barr. sup.	2000	-	225	5	4500000
14	Corr.	Curuzú C.	Guay. sup.	2004	-	158	3	1896000
15	Corr.	Sauce	Guay. sup.	2008	-	107	5	2140000
16	E.R.	Feliciano	Guay. sup.	2008	-	90	3	1080000
17	Corr.	Curuzú C.	Guay. sup.	2012	-	141	5	2820000
18	Corr.	Sauce	Barr. sup.	2012	-	363	5	7260000
19	Corr.	Curuzú C.	Barr. sup.	2013	-	297	2	2376000

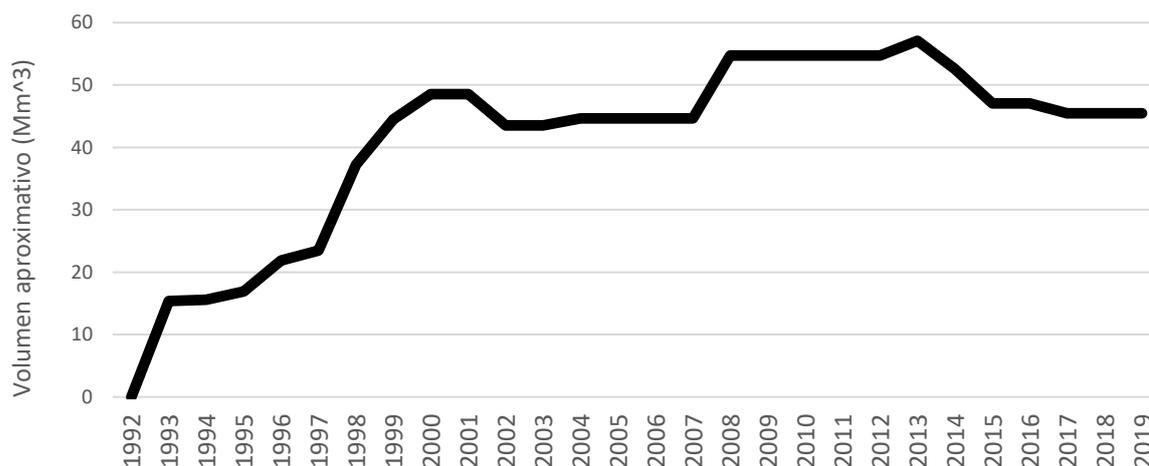


Figura 64. Evolución temporal de los volúmenes retenidos por represas arroceras en la cuenca del Guayquiraró, desde 1992 hasta 2019 (en Millones de m³).

4.2.5. Embalses ganaderos (tajamares)

Entre 1987 y 2019, los datos sobre los tajamares han sido relativamente estables (Tabla 10). Entonces, se considera que el uso de tajamares en la cuenca del río Guayquiraró no ha cambiado de manera significativa en los últimos 30 años.

La superficie de embalses artificiales dedicados a la ganadería en la cuenca representa el 70 % de la superficie ocupada por los embalses arroceros y el 27 % del volumen.

Tabla 10. Comparación de las represas arroceras y los embalses ganaderos (tajamares) en 1987 y 2019.

	Represas arroceras			Embalses ganaderos (tajamares)		
	Cantidad	Superficie total	Volumen total	Cantidad	Superficie total	Volumen total
1987	0	0 ha	0	901	2141 ha	12,846 Mm ³
2019	16	2903 ha	45,492 Mm ³	915	2042 ha	12,252 Mm ³

4.2.6 Canalizaciones y terraplenes

Una canalización es un canal de origen antrópico donde transita el agua para cumplir alguna función específica en el manejo del agua y la producción. Se relevaron tres tipos de canalizaciones con funciones distintas en la cuenca del río Guayquiraró (Tabla 11, Figura 65).

Los terraplenes son diques de tierra que impiden la entrada del agua o directamente desvían flujos de agua con la intención de evitar la inundación de espacios específicos, generalmente, campos de producción agropecuaria, establecimientos humanos y vías de comunicación. Se suelen usar los terraplenes en conjunto con zanjas de drenaje, es decir que paralelamente al terraplén se construye un canal favoreciendo el drenaje hacia otra dirección.

Ya que se construyen los caminos elevados para evitar sus anegamiento e inundación, los caminos actúan de la misma forma que los terraplenes sobre el agua.

Tabla 11. Canalizaciones en la cuenca; tipos, usos y ejemplos

Tipo	Uso	Ejemplo
<p>Zanja de drenaje</p>	<p>Drenar el agua de los suelos estancados en zonas llanas. A veces acompañan los terraplenes o los caminos.</p> <p>Ancho: entre 3 y 10 metros.</p> <p>Longitud: pueden llegar a superar varias decenas de kilómetros.</p>	
<p>Canalización de riego</p>	<p>Llevar el agua desde una fuente de agua y repartirla en los campos de cultivo (generalmente arroz). Se arman en una red jerarquizada.</p> <p>Ancho: entre 1 y 15 metro</p> <p>Longitud: pueden llegar a superar varios kilómetros.</p>	
<p>Canalización de restitución</p>	<p>Evacuar el agua de los embalses o de los campos de cultivo de arroz. No siempre son presentes, ya que en varias ocasiones se aprovecha un cauce natural, particularmente en el caso de las represas. Son diseñados para evacuar los excedentes de agua de la chacra arrocera en menos de 48 horas (Currie y Montoya, 2019).</p> <p>Ancho: hasta 15 metros.</p> <p>Longitud: pueden llegar a superar varios kilómetros.</p>	

Las zanjas de drenaje identificadas se encuentran todas en el MAAP, conectadas con cauces naturales, como los arroyos Sarandí y Ávalos, tributarios de los mismos o paleocauces. Entre el Ávalos y el Sarandí hay una zanja de drenaje de varios kilómetros que vincula ambos cauces, además de varias otras más pequeñas. En el norte de la cuenca, una zanja de varios kilómetros conecta un curso de agua que es parte de la cuenca hidrográfica del río Corriente con el arroyo María Grande.

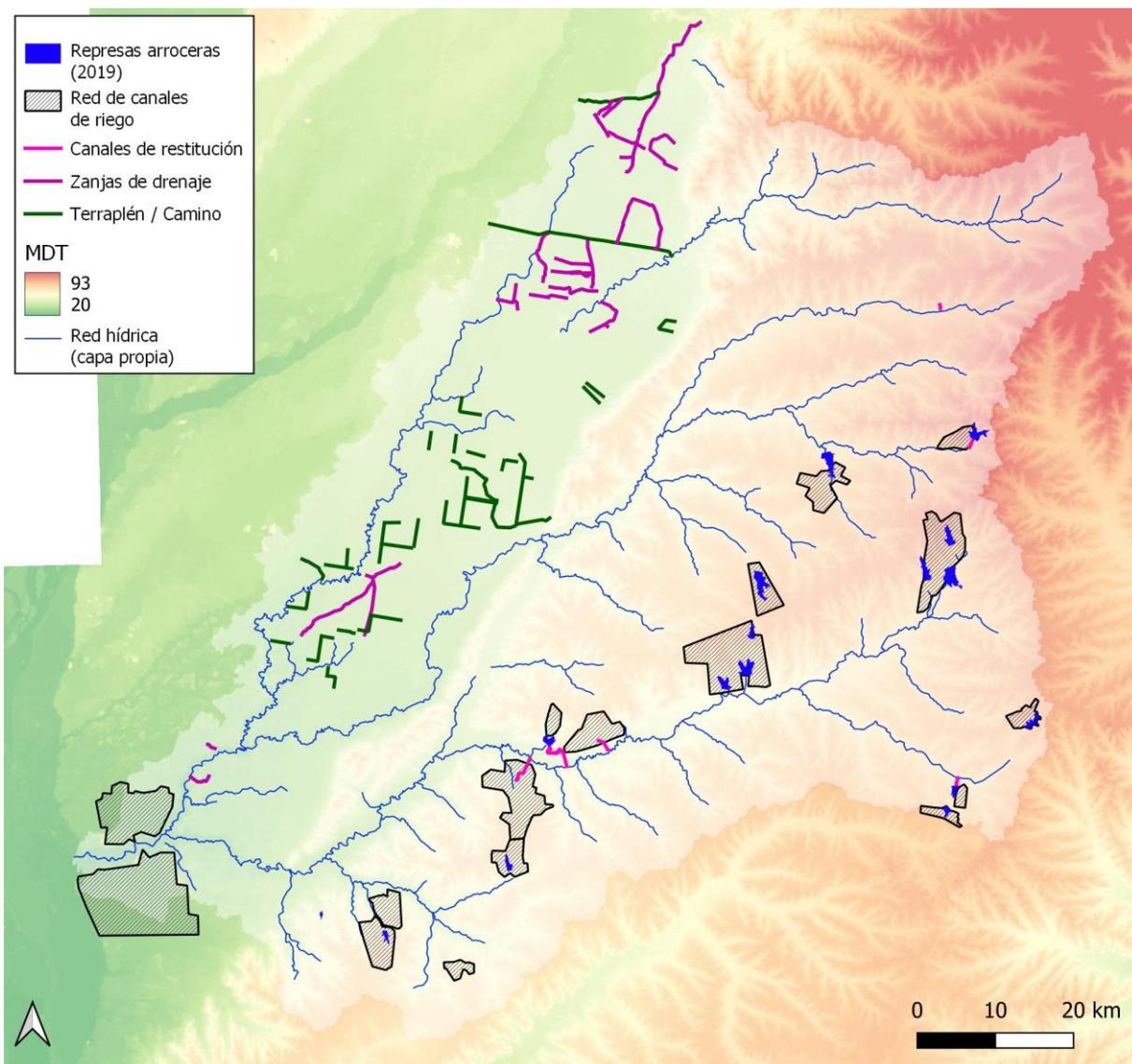


Figura 65. Canalizaciones y terraplenes en la cuenca (relevamiento no exhaustivo).

Tras la observación de la cuenca por imágenes satelitales Landsat en diferentes fechas y épocas⁷, la mayoría de los terraplenes fueron identificados en el MAAP, particularmente en los abanicos aluviales y en sus periferias (Figura 65 y Figura 66). Es notoria la concentración

⁷ Usando imágenes satelitales en días de estado hídrico húmedo un cambio rectilíneo de agua en la superficie indica la posición de un terraplén.

en terraplenes y zanjas de drenaje en los abanicos aluviales. Por la escasez del relieve, la influencia de los terraplenes se hace notar sobre superficies muy grandes, donde desfavorecen la acumulación de agua en superficie en algunas zonas, mientras la favorecen en otras.

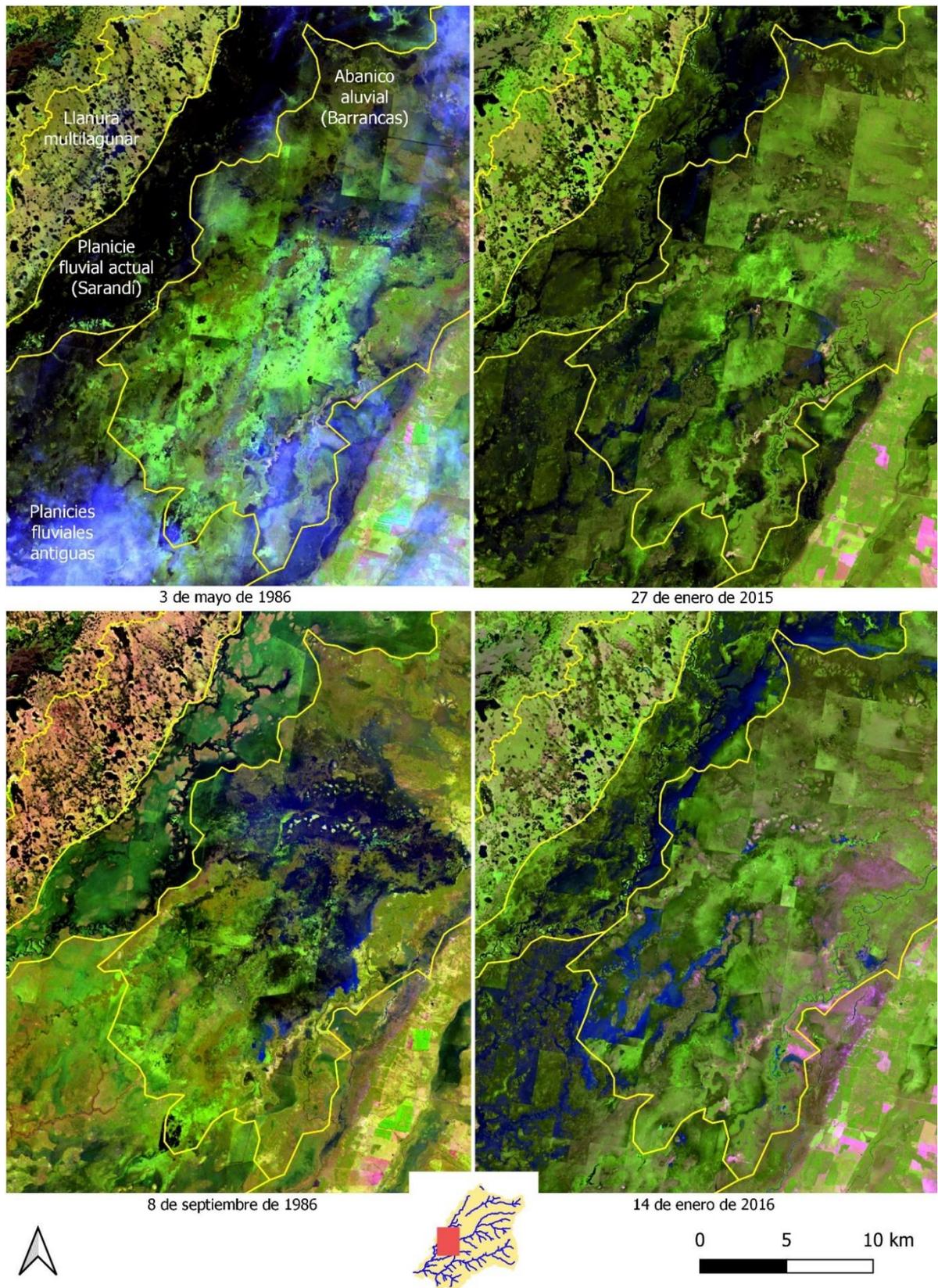


Figura 66. Terrapienes en el abanico aluvial del arroyo Barrancas.

4.2.7 Obras ingenieriles fluviales

Las obras de 2017-2018 sobre el arroyo Barrancas (llamadas obras de limpieza o de acondicionamiento) implicaron el dragado del lecho, el cambio del ancho del cauce⁸, el retiro de toda obstrucción y/o vegetación del canal, el desmonte de las márgenes y riberas a razón de 10 m a partir del agua y la formación de montículos de tierra de máximo 1 m de altura sobre las márgenes (ICAA, 2016; Figura 67).

Este tipo de obra tiene objetivos similares a las zanjas de drenaje, es decir, acelerar el drenaje de tierras anegadas e inundadas. La obra ha tenido lugar en una larga porción del cauce, desde su desembocadura en el río Guayquiraró hasta 58 km aguas arriba (ICAA, 2016).

⁸ A razón de anchos de canal de 12 m, 15 m y 30 m según el tramo y de la perfilación de taludes laterales de relación vertical-horizontal de 1:2.



Figura 67. El aspecto del arroyo Barrancas después de las obras efectuadas en 2017-2018 por la provincia de Corrientes. Fotos obtenidas desde el sitio web del ICAA.

En el pasado, se hicieron otras obras de la misma índole en el río Barrancas, aunque no se pudo encontrar documentación sobre ellas. El mismo tipo de obra se hizo sobre el arroyo Saturno (Figura 68), un tributario del arroyo Barrancas cercano a Pueblo Libertador⁹, y otros tributarios menores.

⁹ <https://www.ellitoral.com.ar/corrientes/2019-10-1-1-37-0-el-icaa-expondra-un-plan-de-obras-alternativas-para-el-arroyo-saturno>



Figura 68. El arroyo Saturno antes de la obra ingenieril (arriba) y después (abajo). El ancho del canal pasó de ser 4 m a ser 15 m.

4.3. *Discusiones*

La expansión del cultivo de arroz en la región no ha sido lineal, lo cual podría ser vinculado con los costos de producción. Sin embargo, el espacio regional que incluye a la cuenca del Guayquiraró todavía tiene importantes posibilidades de desarrollo agropecuario. A pesar de las dificultades, tanto los gobiernos provinciales como el sector privado tienen expectativas altas relativas al futuro del cultivo del arroz. Consecuentemente, es probable la continuación de las transformaciones territoriales.

La pérdida de superficie en maíz, soja y trigo en los departamentos correntinos de Esquina, Curuzú Cuatiá y Sauce pudo ser observada durante las visitas al campo, donde, particularmente en la cuenca baja, varias tierras agrícolas fueron abandonadas en los últimos años. Estos abandonos se deben principalmente a caídas en los precios de los granos y a las dificultades relacionadas con las variabilidades climáticas (comunicación personal, Rafael Sebastián Moreno, AER INTA Sauce, 2 de noviembre de 2021).

En los departamentos de Entre Ríos las tendencias en los últimos años fueron diferentes; los cultivos de soja, maíz y trigo tuvieron aumentos significativos, mientras que el arroz se mantuvo constante. Sin embargo, cabe señalar que la producción de arroz en estos departamentos fue favorecida relativamente debido a otros departamentos de Entre Ríos, en los que se redujo su superficie sustancialmente después de 1998.

El aumento en superficie del BC es llamativo, ya que la tendencia en los otros ecosistemas, tanto en este análisis como en otras regiones, es la contraria. El aumento en BC registrado no se debe a un sesgo meteorológico: el BC tiene una firma espectral poco sensible a los azares climáticos y además se validaron varios sitios identificados como nuevos bosques, con imágenes Landsat, imágenes de alta resolución y fotos aéreas. Estos lugares corresponden con lotes de pequeña superficie al norte del río Guayquiraró superior, en la transición entre el RVCE y el MAAP y cerca del paraje Ombú y de San José del Feliciano en Entre Ríos.

Las conversaciones tenidas con lugareños y expertos locales constituyen un refuerzo a lo anterior, que coinciden en manifestar sobre el abandono de tierras productivas y cultivadas en los últimos años. No obstante, la gran mayoría de las nuevas tierras de BC eran clasificadas como SS o VH en el mapa de 1987 (clases no agrícolas). Lo mismo sugiere que las tierras productivas hoy en día convertidas en BC fueron abandonadas antes de 1987 y que han pasado por una etapa previa de SS o de VH. Esta hipótesis es razonable, todavía más porque se apreció en la salida de campo una sabana que 10 años atrás era tierra agrícola (Figura 69).

Además de los lotes de tierra agrícola abandonados, el BC avanzó en los abanicos aluviales y en las planicies de tributarios. La reducción de la industria del carbón y la tala de árboles en las últimas décadas podrían explicarlo.



Figura 69. *Savana en el MAAP, anteriormente un campo de cultivo. Departamento de Esquina, Corrientes.*

Capítulo 5. Análisis del impacto de las prácticas agropecuarias recientes en las variables hidrológicas y geomorfológicas

5.1. Introducción

El modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en la Universidad de Texas. A pesar de que se haya usado para una multitud de fines, se creó fundamentalmente para el estudio de los impactos a largo plazo de las prácticas urbanas, rurales y agropecuarias sobre el agua, los sedimentos, el transporte de fertilizantes y contaminantes, el crecimiento de la vegetación y de cultivos, etc., en cuencas hidrográficas de gran tamaño (Haas et al., 2022a). Es un modelo multiparamétrico que se basa en relaciones matemáticas físicas conocidas. Funciona a escala de cuenca hidrográfica, la cual se divide en subcuencas y en unidades de respuesta hidrológica (HRU), la unidad espacial más pequeña utilizada que representa una combinación única de las pendientes, de las coberturas de tierra y del suelo.

Los antecedentes de uso del modelo SWAT en Argentina son pocos, sin embargo, han dado buenos resultados (Feler et al., 2014; Havrylenko et al., 2016; Romagnoli et al., 2017; Weber y Baigorri Ocampo, 2019; Guevara-Ochoa, 2019; Guevara-Ochoa, 2020).

La modelación de una cuenca, una vez calibrada adecuadamente, permite el análisis de escenarios donde se cambian parámetros de entrada de interés y se observa el resultado en los valores de salida de interés. En este caso, los parámetros de entrada de interés son relativos a las PAR y los valores de salida de interés son las variables hidrológicas que integran la hidrogeomorfología: en este caso, el caudal líquido.

Ya que el capítulo precedente mostró que las prácticas ganaderas han tenido cambios leves en las últimas décadas, mientras que las prácticas agrícolas han tenido cambios fuertes, la modelación se centró en la evaluación de las influencias de las prácticas agrícolas, especialmente la expansión de la frontera agrícola y la llegada del sistema productivo de arroz con represas.

Se optó por modelar exclusivamente la cuenca del SH del río Guayquiraró superior, por las razones siguientes:

- Los cambios en las prácticas agrícolas han ocurrido en el sur de la cuenca, especialmente en el SH del río Guayquiraró superior.

- Este SH cuenta con una estación hidrométrica con datos de caudales líquidos diarios en su salida que permite calibrar el modelo.
- La dinámica hidrológica superficial del MAAP incluye procesos no típicos en una cuenca hidrográfica (trasvases de cuenca, desconexiones entre cursos de agua, flujos mantiformes, etc.) los cuales SWAT no permite modelar adecuadamente.

5.2. Aspectos metodológicos

5.2.1. Delimitación de la cuenca y de las subcuencas

El modelaje se hizo en la plataforma ArcGIS usando el plugin ArcSWAT, descargado libremente desde la misma página web de SWAT.

El primer paso fue la delimitación de la cuenca de estudio y de sus subcuencas. Se cargó el MDT de la zona y la capa de cauces (Capítulo 3, Figura 14). La capa de cauces sirve para "quemar" el MDT, es decir que se agudiza la profundidad debajo de los cauces de manera exagerada, de manera a forzar el paso del escurrimiento por ellos.

Para la delimitación de los tramos de cauces se utilizó como superficie mínima de subcuenca 600 ha, lo cual resultó en una cantidad muy grande de cauces y de subcuencas. Esto permitió incluir en la delimitación las subcuencas, nodos donde se han construido las represas arroceras de pequeño tamaño. Después se eliminaron manualmente los tramos que no eran ni de la capa de cauces del Capítulo 3, ni asociados a una subcuenca arrocera.

Adoptando la sección de Paso Juncue como la de cierre de la cuenca, se obtuvieron en total 74 subcuencas (Figura 70).

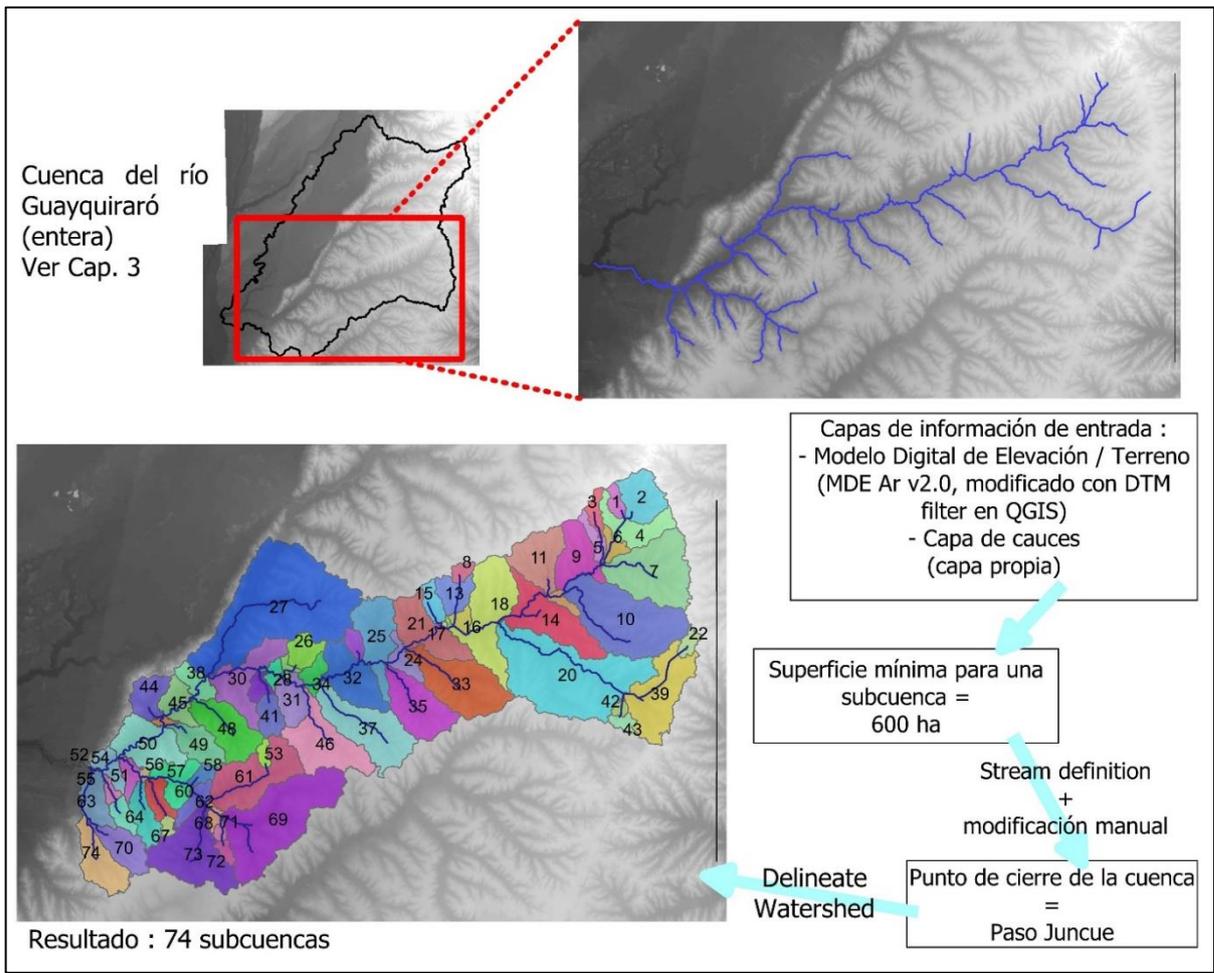


Figura 70. Proceso de delimitación de la cuenca del río Guayquiraró superior con el modelo SWAT.

5.2.2. Pendientes, suelos y coberturas terrestres.

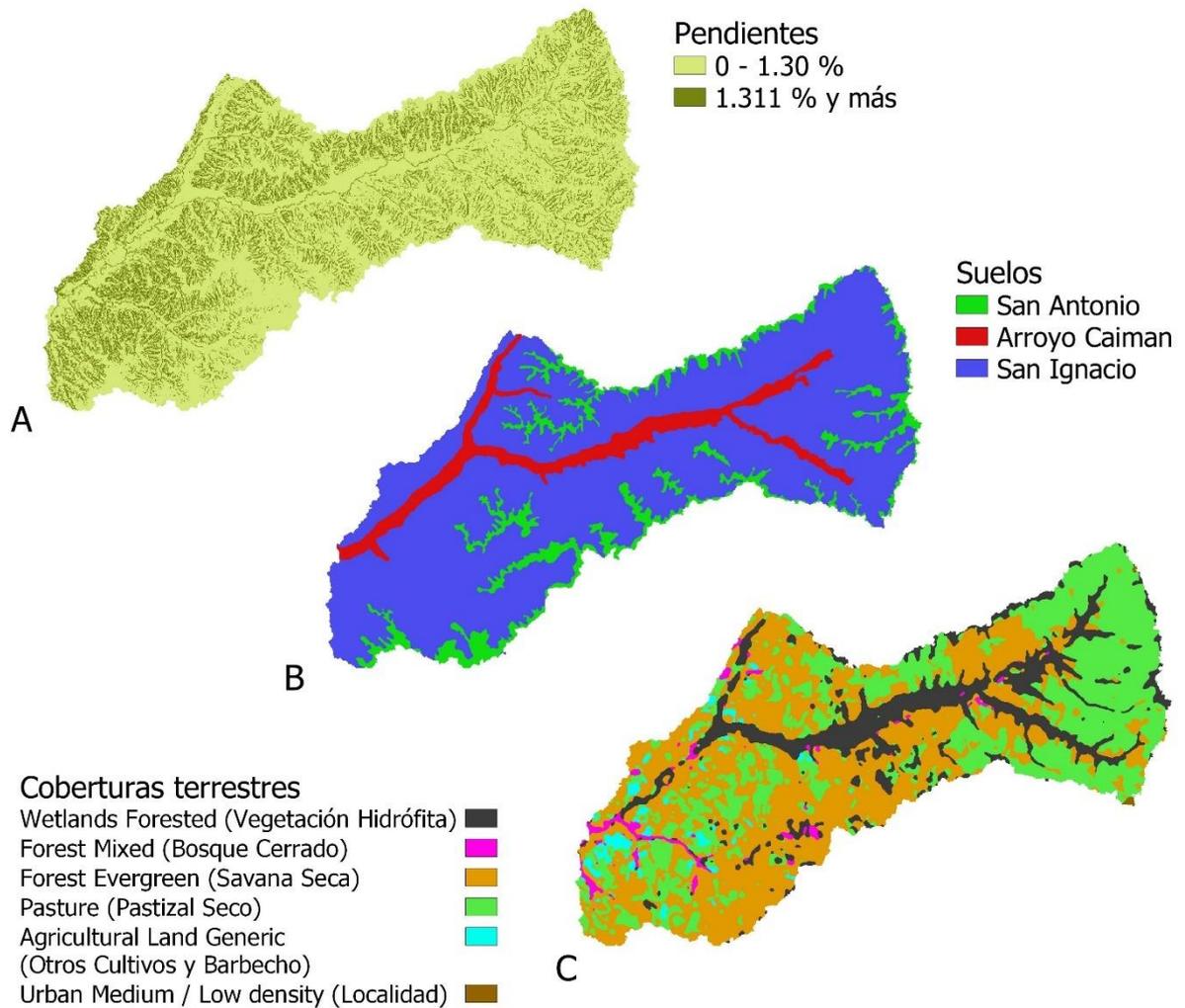


Figura 71. Clases de pendientes (A), Series de suelos (B) y coberturas terrestres de 1987 (C) utilizados en el modelo SWAT.

Se optaron por esquemas simples de pendientes y de suelos y un mayor nivel de detalles en las coberturas terrestres. Las pendientes de la cuenca fueron divididas en dos clases: de 0 % a 1,3 % y superior a 1,3 %.

Se usaron los polígonos del mapa de UG del Capítulo 3 como base espacial para asignar los suelos, usando la premisa que una UG tiene un suelo o un conjunto de suelos dominantes. Las series de suelos utilizados para el modelo son los más representativos espacialmente en las unidades geomorfológicas: fueron elegidos en base a cartas de suelos de la región (Ligier et al., 2001; Ligier et al., 2012, Plan Mapa de suelos, 1986). Así, se asignó un Argiacuol vértico (serie San Antonio, Ligier et al., 2001) para las divisoras planas, un Argüidor vértico (serie San

Ignacio, Ligier et al., 2001) para los valles fluviales y un Endoaquoll vértico (serie Arroyo Caiman¹⁰, Plan Mapa de suelos, 1986) para las planicies de inundación.

La mayoría de los parámetros de los suelos fueron asignados directamente a partir de las series de suelo. Los parámetros de densidad, de conductividad hidráulica en saturación y de capacidad de agua fueron estimados a partir de la granulometría y del porcentaje de materia orgánica con el programa Soil Plant Atmosphere Water Field and Pond Hydrology (Saxton, 2017). El albedo del suelo se estableció en base a Gijssman et al. (2007) donde se establece un valor entre 0,09 y 0,17 según el color del horizonte superficial. Se usaron fórmulas disponibles en el manual del usuario de SWAT (Arnold et al., 2013) basadas en los porcentajes de arena, limo, arcilla y carbón orgánico para determinar el K de USLE del horizonte superficial. Para el volumen máximo de grietas, se puso el valor de 15 % para los suelos San Antonio y San Ignacio, basado en el trabajo hecho en campo.

Los tres suelos hacen parte del grupo hidrológico C: tienen un potencial de escorrentía medio-alto (porcentaje de arena menos de 50 %, porcentaje de arcilla entre 20 y 40 %, Gijssman et al., 2007).

Los datos de coberturas terrestres provienen de los mapas de coberturas terrestres producidas por clasificaciones de imágenes satelitales en el Capítulo 4. Los mapas de 2019 y de 1987 fueron pasados 14 veces por un *filtro majority* del plugin SAGA en QGIS para suavizar los conjuntos de coberturas y deshacerse del efecto salpicado (píxeles de cobertura aislados) y así evitar procesamientos muy largos posteriormente.

El mapa de coberturas de 2019 contempla el cambio territorial producido por la expansión de la agricultura convencional y arrocería (clases OCyB, Ar y AS), sin considerar las diferencias detectadas en los otros tipos de ecosistemas, los cuales se deben en parte a cambios reales y en parte a la variabilidad climática.

Finalmente, el ecosistema de VE fue excluido de las coberturas, al cubrir una superficie pequeña (1,5 % de la cuenca) y tener características ecológicas y edafológicas singulares con poca información disponible. Se lo consideró como SS.

Las coberturas fueron asignadas a coberturas de la base de datos de usos de suelo de SWAT, usando aquellas semejantes (Tabla 12).

¹⁰ Se asignó la serie Arroyo Caiman, a pesar de haber sido identificada en la cuenca del río Mocoiretá, al no contar con información detallada de los suelos de las planicies de inundación del río Guayquiraró. Los viajes al campo comprobaron que la serie Arroyo Caiman es similar a los suelos que se encuentran en las planicies del río Guayquiraró, por los menos en su granulometría rica en arcilla y limo.

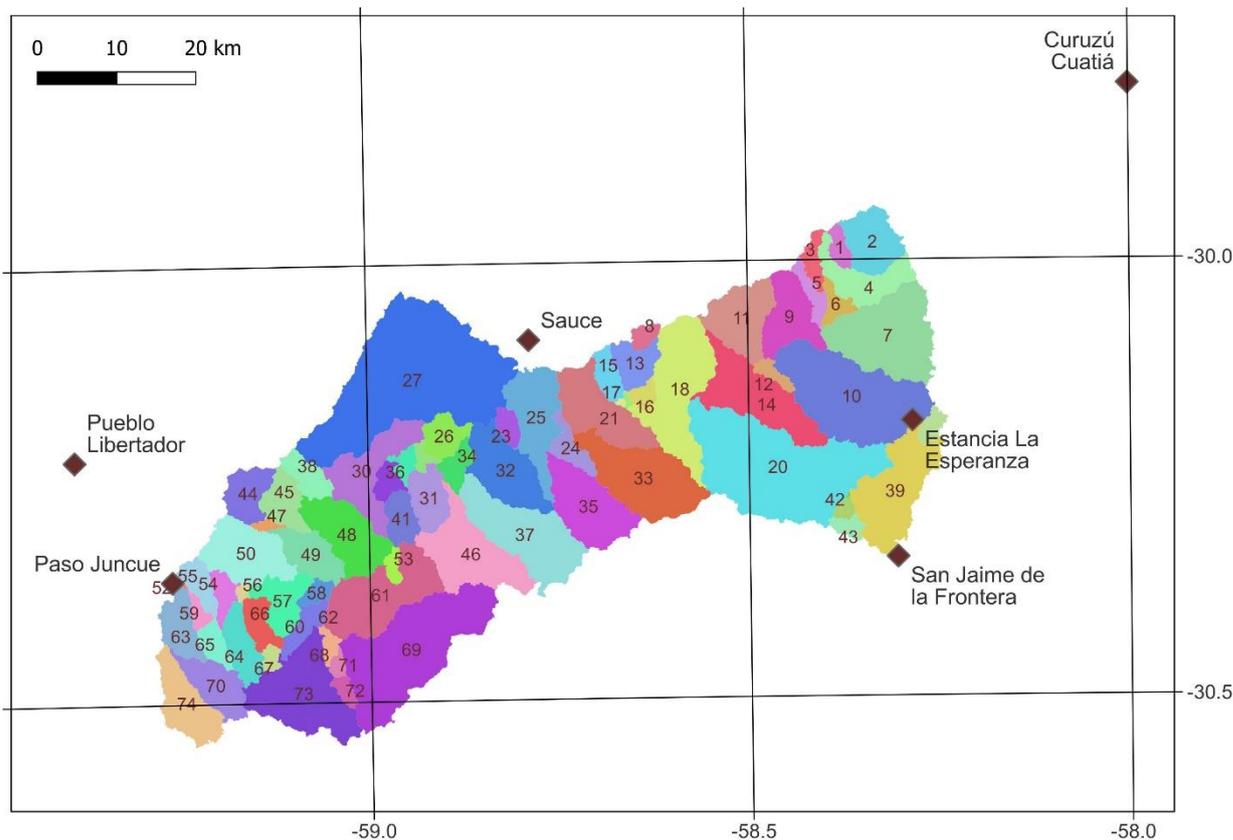
5.2.3. Unidades de respuesta hidrológica (HRU)

Para el suelo y las clases de pendientes se usó el valor umbral de 10%, que es el porcentaje mínimo de superficie en la subcuenca que debe ser superado para ser considerado para los HRU; para las coberturas de suelo, se usó 5 % y las coberturas de OCyB, BC, AS, Lo y Ar fueron eximidas. Se obtuvieron 602 HRU.

Tabla 12. Superficies de las clases de pendientes, de los suelos y de las coberturas terrestres que forman los HRU

	1987	2019
Pendientes		
0 -1.3 %	77.7%	77.8 %
1.3 – 9999 %	22.3 %	22.2 %
Suelos		
San Antonio	9.8 %	10.1 %
Arroyo Caiman	8.0 %	8.0 %
San Ignacio	82.2 %	81.9 %
Coberturas terrestres		
VH (Wetlands-Forested)	15.6 %	15.0 %
BC (Forest-Mixed)	1.7 %	1.7 %
SS (Forest Evergreen)	45.0 %	45.2 %
PS (Pasture)	35.6 %	23.8 %
OCyB (Agricultural Land-Generic)	1.9 %	12.9 %
AS (Water)	0 %	0 %
Ar (Rice)	0 %	1.2 %
Lo (Residential-Med/Low Density)	0.1 %	0.1 %

5.2.4. Datos meteorológicos



	Serie de tiempo	Fuente
Precipitaciones		
Estancia la Esperanza	1980 – 2020	RHI
Pueblo Libertador	1984 – 2021	RHI
Humedad relativa		
Sauce	1980 – 1990	SMN
San Jaime de la Frontera	2011 – 2021	INTA
Temperaturas mínimas y máximas		
Sauce	1980 – 1990	SMN
San Jaime de la Frontera	2011 – 2021	INTA
Viento		
Curuzú Cuatiá	2019 – 2022	INTA
Radiación solar		
Pueblo Libertador	2019 – 2021	SMN

Figura 72. Estaciones meteorológicas utilizadas en SWAT

Los datos meteorológicos de entrada del modelo provienen de 6 estaciones meteorológicas (Figura 72). Todas son de bases de datos de acceso libre: la Red Hidrológica Nacional (RHI, 2022), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2022) y el Sistema de Información y de Gestión Agrometeorológica del INTA (INTA, 2022). El modelo SWAT atribuye las variables meteorológicas diarias a cada subcuenca a partir de la estación más cercana a ella, y simula

los datos faltantes a partir una serie de estadísticas a escala mensual que se prepara para este fin en el programa WGEN Parameters Estimation Tools (<https://swat.tamu.edu/software/>) con los datos meteorológicos existentes.

La razonabilidad de los datos meteorológicos además de los resultados directamente vinculados a ellos fue verificada con mapas de isohietas o con valores promedios en la ciudad cercana de Mercedes, recuperados desde Escobar et al. (1996), especialmente la radiación solar total, las precipitaciones, la evapotranspiración real, los vientos, las temperaturas y la humedad relativa. De este modo, por ejemplo, se decidió excluir los datos de viento de la estación de Pueblo Libertador y así utilizar solamente los datos de Curuzú Cuatiá. También, se ajustaron al alza de 1,4 MJ los datos de radiación solar para obtener una evapotranspiración potencial más cercana a aquella de Hämmerly et al. (2019), tomando en cuenta la falta de datos de radiación solar.

5.2.5. Ajustes suplementarios

El principio físico en el cual se fundamenta SWAT para modelar la infiltración y el escurrimiento del agua en las cuencas es el de curva número (CN), una variable matemática creada por el Servicio de Conservación del Suelo de Estados Unidos (USSCS) que representa el exceso de precipitaciones en el suelo (Feldman, 2000).

En cuanto a los parámetros de cauce fluvial, se establecieron con base a bibliografía y se ajustaron con observaciones hechas en campo y en Google Earth, interpolándolos en la cuenca según el orden de Sthraler.

Además, se deben especificar los manejos de cultivos y ganaderos según cada cobertura terrestre con el fin de modelar el crecimiento de la vegetación y/o de los cultivos y así representar adecuadamente la evapotranspiración. Los parámetros relativos al crecimiento y la evapotranspiración fueron ajustados para las coberturas PS, SS, VH y BC hasta alcanzar valores realistas para la evapotranspiración comparando con lo establecido para la región, es decir algo menos de 1000 mm anuales (Escobar et al., 1996).

Los detalles de los ajustes suplementarios pueden ser consultados en el

ANEXO V.

5.2.6. Calibración y validación del modelo

La calibración del modelo se llevó a cabo usando de referencia los datos de caudal líquido diarios de la estación hidrométrica Paso Juncue entre el 1 de enero de 1985 y el 31 de diciembre de 1989 (Figura 73 y Figura 74), y la validación con los datos del período 1 de enero

de 1991 - 31 de diciembre de 1994 (Figura 75). El mapa de coberturas utilizado para la calibración del modelo es aquél del año 1987.

Primero se procedió a una calibración manual del modelo, confirmando o descartando ajustes en los parámetros a partir de los resultados de las corridas.

Segundo, se procedió a una calibración más fina con la ayuda del programa de calibración semi-automática SWAT-CUP, usando el módulo SUFI2 (Abbaspour, 2013). Este programa permite correr el modelo con una multitud de combinaciones de parámetros y comparar los resultados de aquellas corridas directamente con los datos observados. Según las corridas que dieron mejores resultados, SWAT-CUP informa la mejor combinación de parámetros y propone un nuevo rango para afinar todavía más la calibración.

Se seleccionaron 10 parámetros para calibrar con SWAT-CUP. Se eligieron estos 10 parámetros a partir de los resultados de la calibración manual, del conocimiento de la zona de estudio y de los antecedentes de uso de SWAT en Argentina (Feler et al., 2014; Havrylenko et al., 2016; Romagnoli et al., 2017; Weber y Baigorri Ocampo; 2019; Guevara-Ochoa, 2019; Guevara-Ochoa, 2020).

Los detalles de los parámetros utilizados para la calibración pueden ser consultados en el ANEXO V.

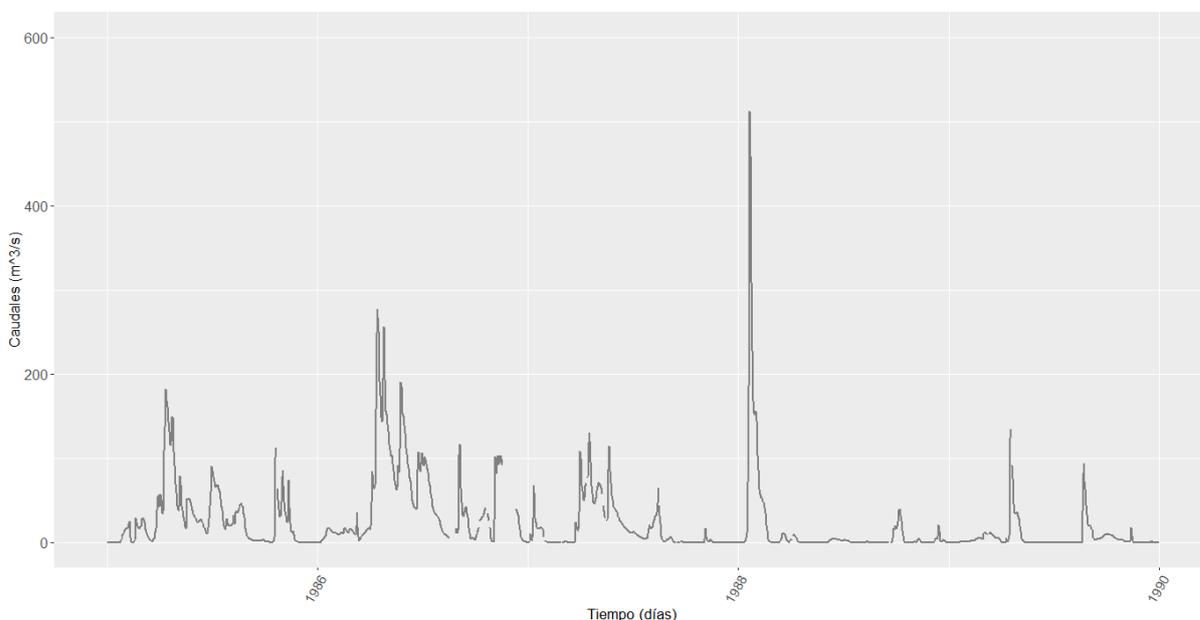


Figura 73. Hidrograma de referencia: datos observados utilizados para la calibración. Periodo 01/01/1985 – 12/31/1989.

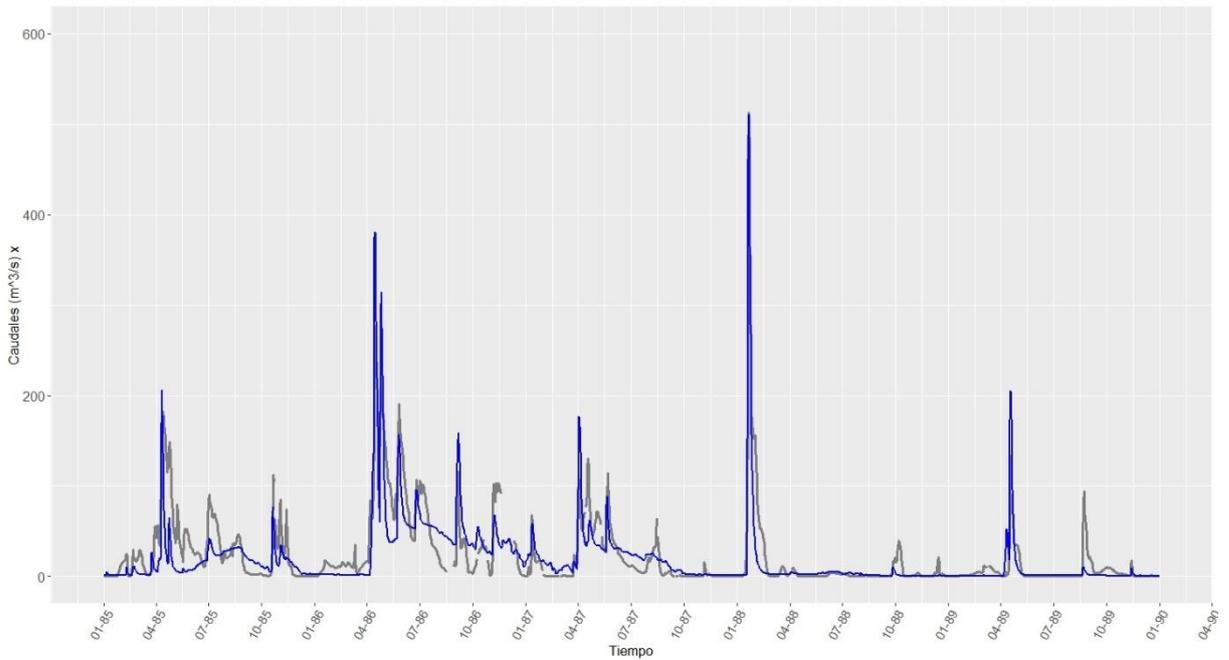


Figura 74. Hidrograma de calibración del modelo de cuenca. Periodo 01/01/1985 – 12/31/1989. (Línea gris: caudales observados, Línea azul: caudales modelados).

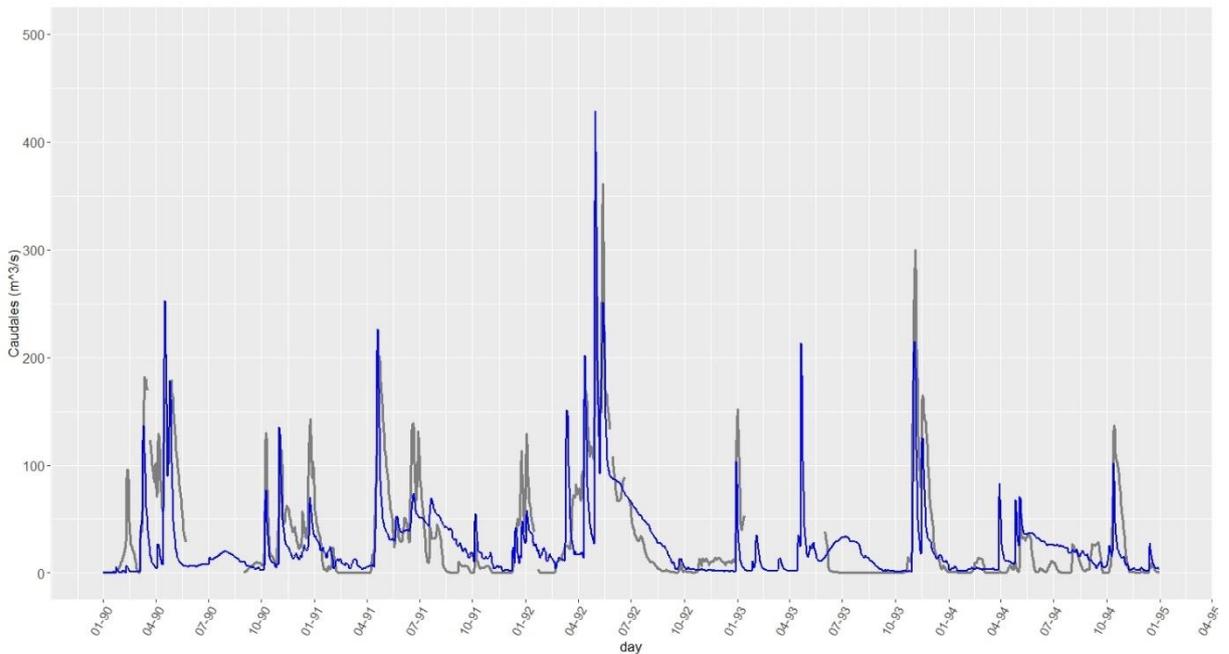


Figura 75. Hidrograma de validación del modelo de cuenca, periodo 01/01/1990 – 12/31/1994. (Línea gris: caudales observados, Línea azul: caudales modelados).

La calibración (Figura 74) y la validación (Figura 75) del modelo muestran una buena representación en los picos de crecida. El modelo se adecua a los periodos húmedos y secos que indican los caudales observados en Paso Juncue. Además, el índice Nash Cliffe (NSE) obtenido para la calibración fue de 0,72 y de 0,56 para la validación (se suele considerar 0,50 como el valor mínimo para considerar un modelo válido).

Además, se compararon los valores de evapotranspiración potencial, mensuales y promedio anual con los antecedentes en la región (Hammerly et al., 2019; Escobar et al., 1996) y se comprobó que el modelo SWAT modela adecuadamente la evapotranspiración.

Por estas razones, la calidad del modelo se considera satisfactoria.

5.2.7. Planteo de los escenarios

Los escenarios probados y analizados son los siguientes (Tabla 13). Las corridas se hicieron desde el 1 de enero de 1985 hasta el 31 de diciembre 2019 (35 años). Una atención particular fue dada a la cobertura terrestre de "Agua Superficial", ya que la misma está asociada al embalse creado por el uso de represas arroceras. Cabe aclarar que las características de cada escenario (coberturas terrestres, agua superficial y represas arroceras) fueron aplicadas sobre este rango completo de años para facilitar las comparaciones entre cada escenario a posteriori.

Tabla 13. Escenarios de modelación

1. Situación histórica (la versión utilizada para la calibración) Coberturas terrestres de 1987
2. Expansión de la agricultura Coberturas terrestres de 2019 (sin Agua Superficial)
3. Uso de las represas arroceras Coberturas terrestres de 1987 + Agua superficial + Represas arroceras
4. Situación actual Coberturas terrestres de 2019 + Agua superficial + Represas arroceras

5.2.8. Limites metodológicos

La falta de estaciones meteorológicas con datos de precipitaciones prolongados en el tiempo y coherentes entre sí induce una incertidumbre sobre los resultados del modelo SWAT. También existe una incertidumbre al momento de simplificar espacialmente los datos de entrada: los mapas de coberturas, el mapa de suelo y los manejos agropecuarios, tanto a nivel agrícola como ganadero. Por ejemplo, los pequeños embalses ganaderos sobre cauces de orden menor (tajamares) fueron excluidos del modelo.

Algunos cambios en las prácticas agropecuarias entre la situación histórica y actual han tenido que ser simplificados y generalizados para la modelación. Por ejemplo, los cambios de prácticas de los productores como las rotaciones y las labranzas son consideradas sin cambiar desde los años 1980, lo cual probablemente no es el caso.

Algunos procesos biofísicos significativos podrían escapar a SWAT, por ejemplo, el drenaje por las grietas de los vertisoles.

En cuanto a la modelación de las arroceras, su funcionamiento hidrológico es complejo y varias simplificaciones fueron necesarias. Entre ellas, no se contempla el reintegro de las aguas de las arroceras a la red hídrica al final de la temporada de cultivo.

Además, existe una duda sobre el CN del arroz y la efectividad misma de este método para esta cobertura, debido a la dinámica de anegamiento y la complejidad de los sistemas de riego utilizados (Im et al., 2007).

5.3. Resultados

5.3.1. Balances hídricos

Tabla 14. Balances Hídricos de los escenarios modelados (valores en mm)

<i>Situación histórica</i>					
Ganancias		Pérdidas			
Precipitaciones	Evapotranspiración	Infiltración			Escurrimiento Superficial
1302	822 (potencial: 1192)	369			108
		Re- evaporación desde la napa freática.	Hacia acuífero profundo	Flujo base	
		223	18	118	
<i>Expansión de la agricultura</i>					
Precipitaciones	Evapotranspiración	Infiltración			Escurrimiento Superficial
1302	789 (potencial: 1192)	389			121
		Re- evaporación desde la napa freática.	Hacia acuífero profundo	Flujo base	
		223	19	139	
<i>Represas arroceras</i>					
Precipitaciones	Evapotranspiración	Infiltración			Escurrimiento Superficial
1302	825 (potencial: 1197)	370			103
		Re- evaporación desde la napa freática.	Hacia acuífero profundo	Flujo base	
		222	19	121	
<i>Situación actual</i>					
Precipitaciones	Evapotranspiración	Infiltración			Escurrimiento Superficial
1302	791 (potencial: 1197)	391			117
		Re- evaporación desde la napa freática.	Hacia acuífero profundo	Flujo base	
		222	20	142	

Tal como se muestra en Tabla 14, y tomando como base de referencia la situación actual, el escurrimiento superficial es de unos 117 mm, es decir el 9 % de las precipitaciones, mientras que el flujo base (aportes subterráneos a la red hídrica) es de unos 142 mm, lo que implica un total de 259 mm (o 20 % de las precipitaciones) que son aportados a los cauces y finalmente, hacia Paso Juncue.

Se observa que la expansión de la agricultura reduce la evapotranspiración, aumenta la infiltración (convirtiéndose en mayor flujo base) y el escurrimiento superficial, mientras que las represas arroceras tienen muy poco efecto sobre el balance hídrico en general. En la situación actual, la evapotranspiración es 31 mm menos que la de la situación histórica, y el flujo base y el escurrimiento superficial son 22 mm y 9 mm más respectivamente.

Los resultados por tipo de cobertura muestran cómo los cultivos (arroceras y los otros cultivos) reducen la evapotranspiración, a beneficio de la infiltración y del escurrimiento superficial (Figura 76). Los otros tipos de cobertura son muy similares entre ellos. La SS y la VH son las dos coberturas que favorecen más la evapotranspiración.

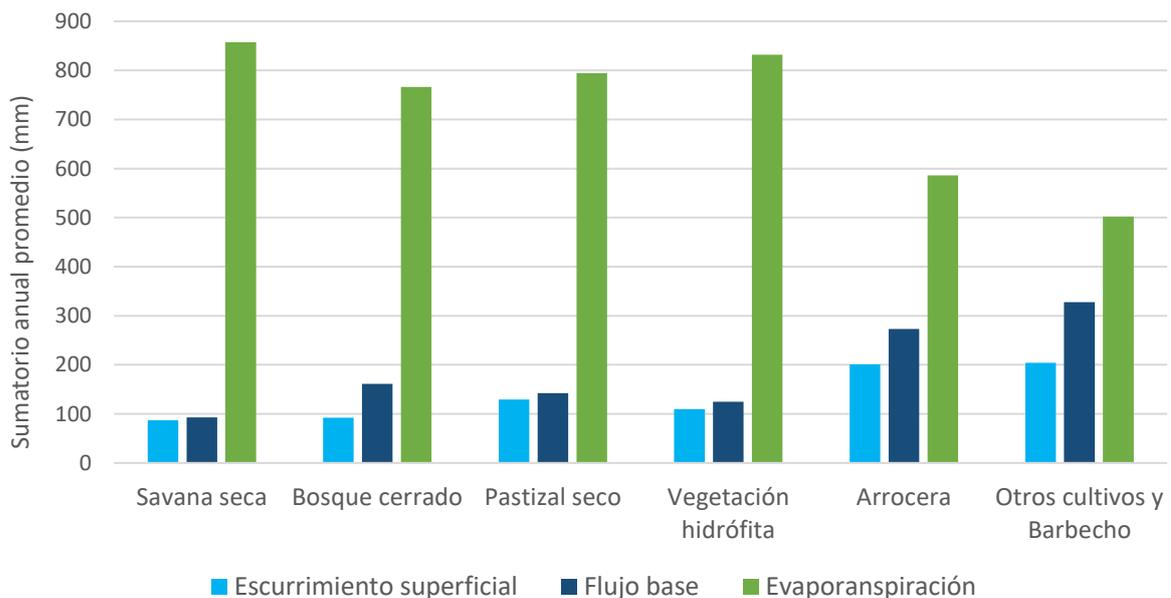


Figura 76. *Balances hídricos por tipo de cobertura del suelo (estado actual).*

5.3.2. Hidrogramas y curva de duración de caudales

A continuación, se presentan algunos hidrogramas de crecidas destacables del río Guayquiraró que tuvieron lugar entre 1985 y 2019. Los hidrogramas completos (35 años) se pueden consultar en el ANEXO VI.

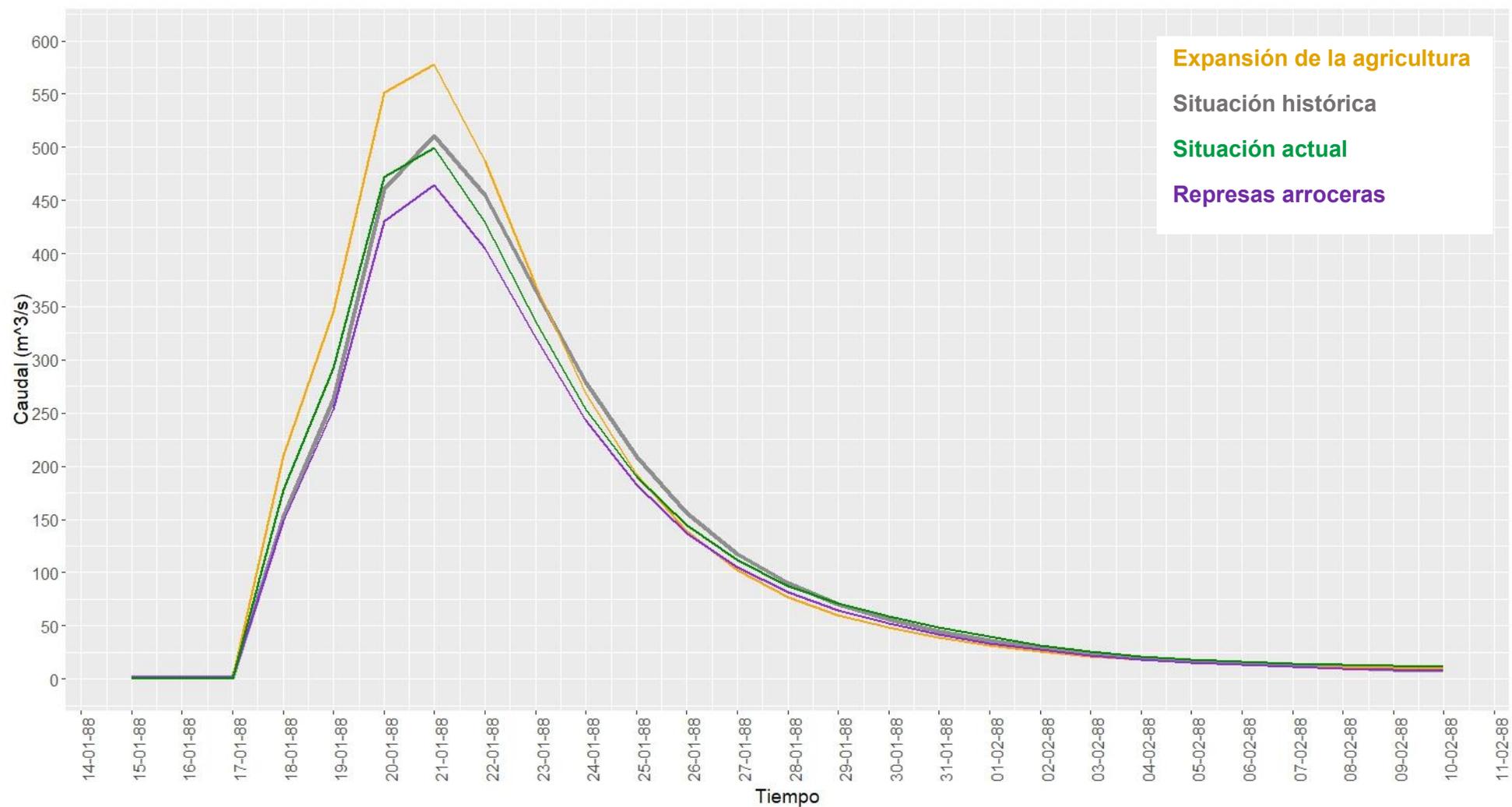


Figura 77. Hidrograma modelado de la crecida del año 1988

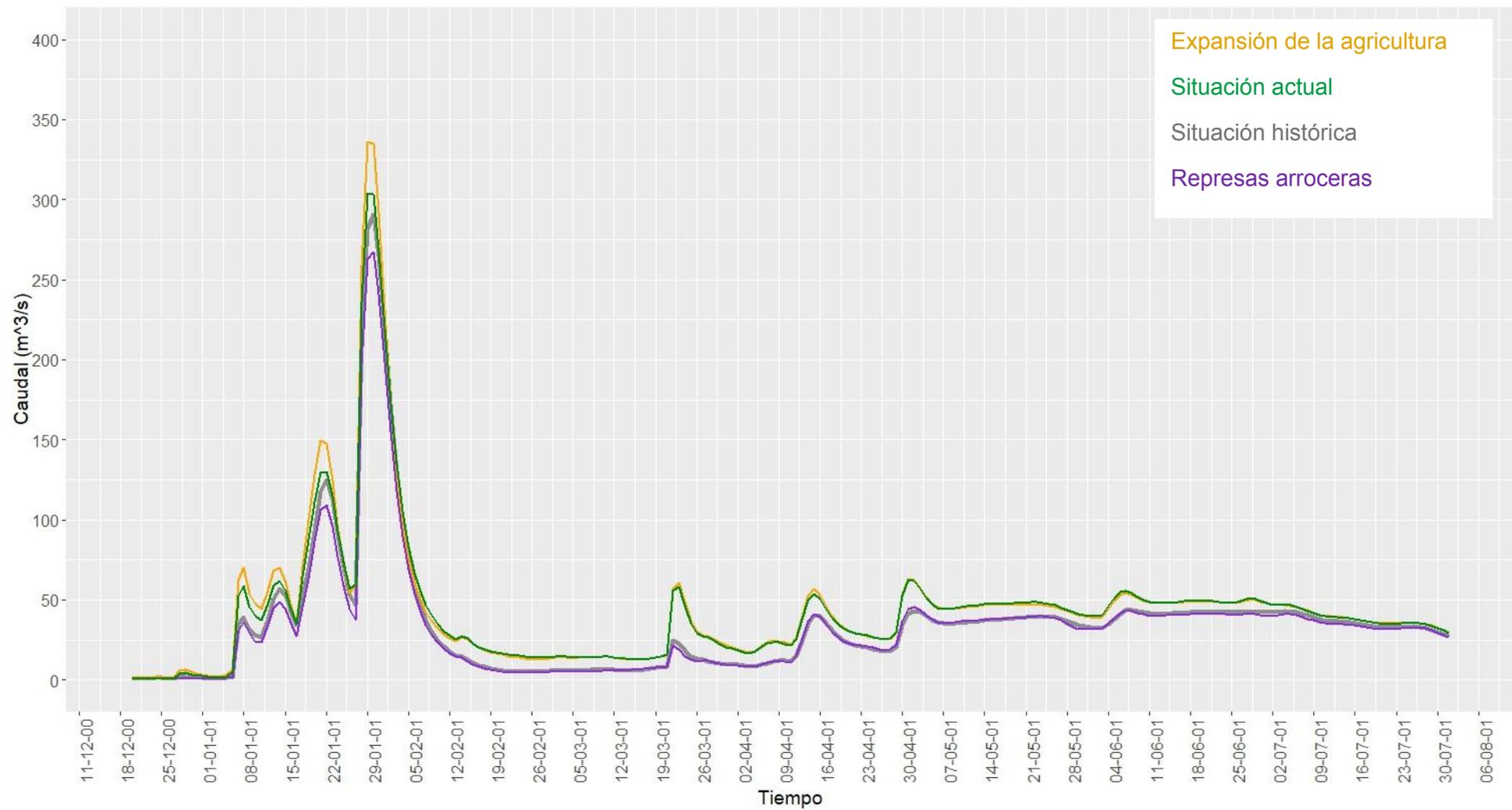


Figura 78. Hidrograma modelado de la crecida de 2000

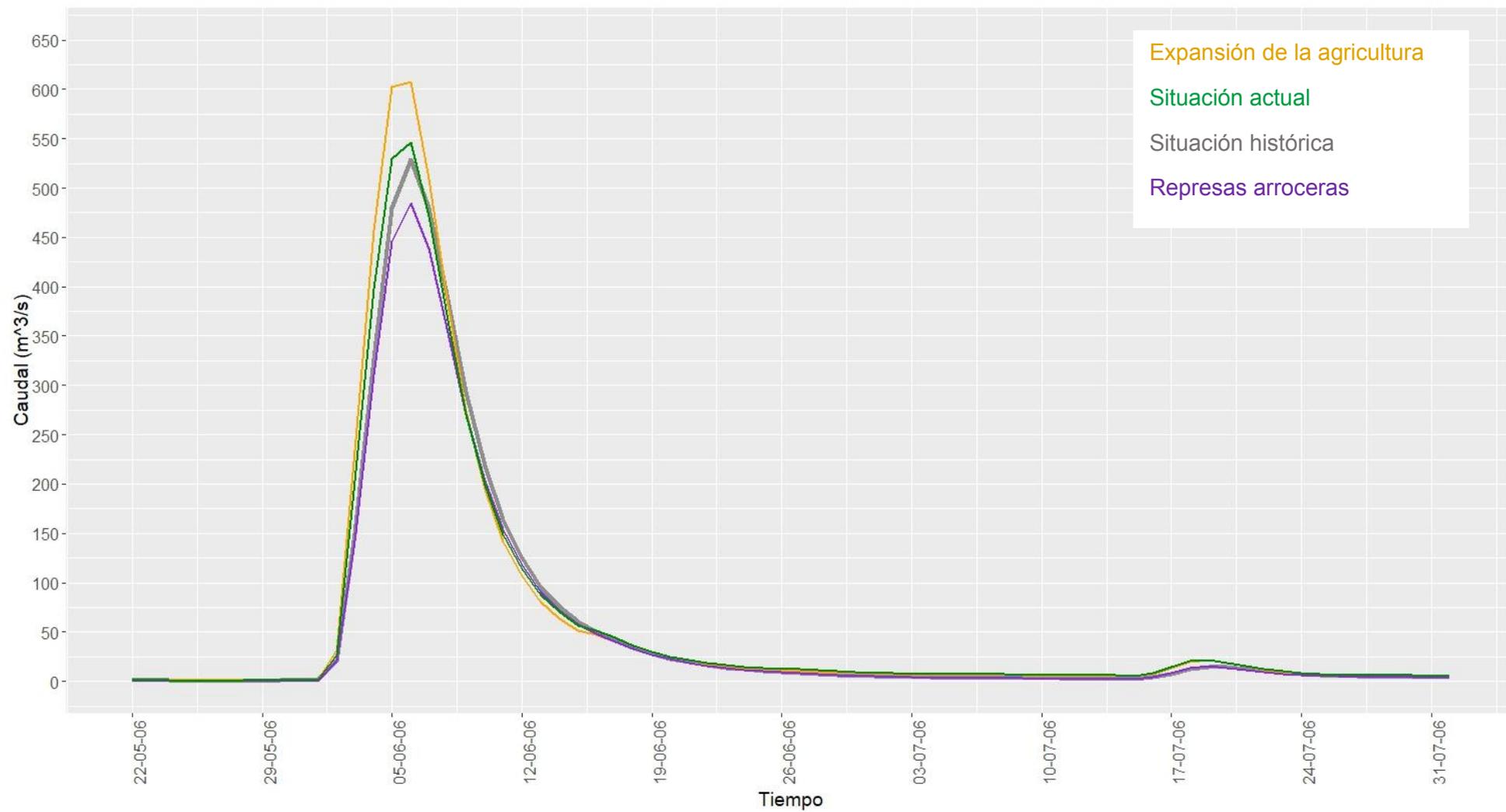


Figura 79. Hidrograma modelado de la crecida de 2006

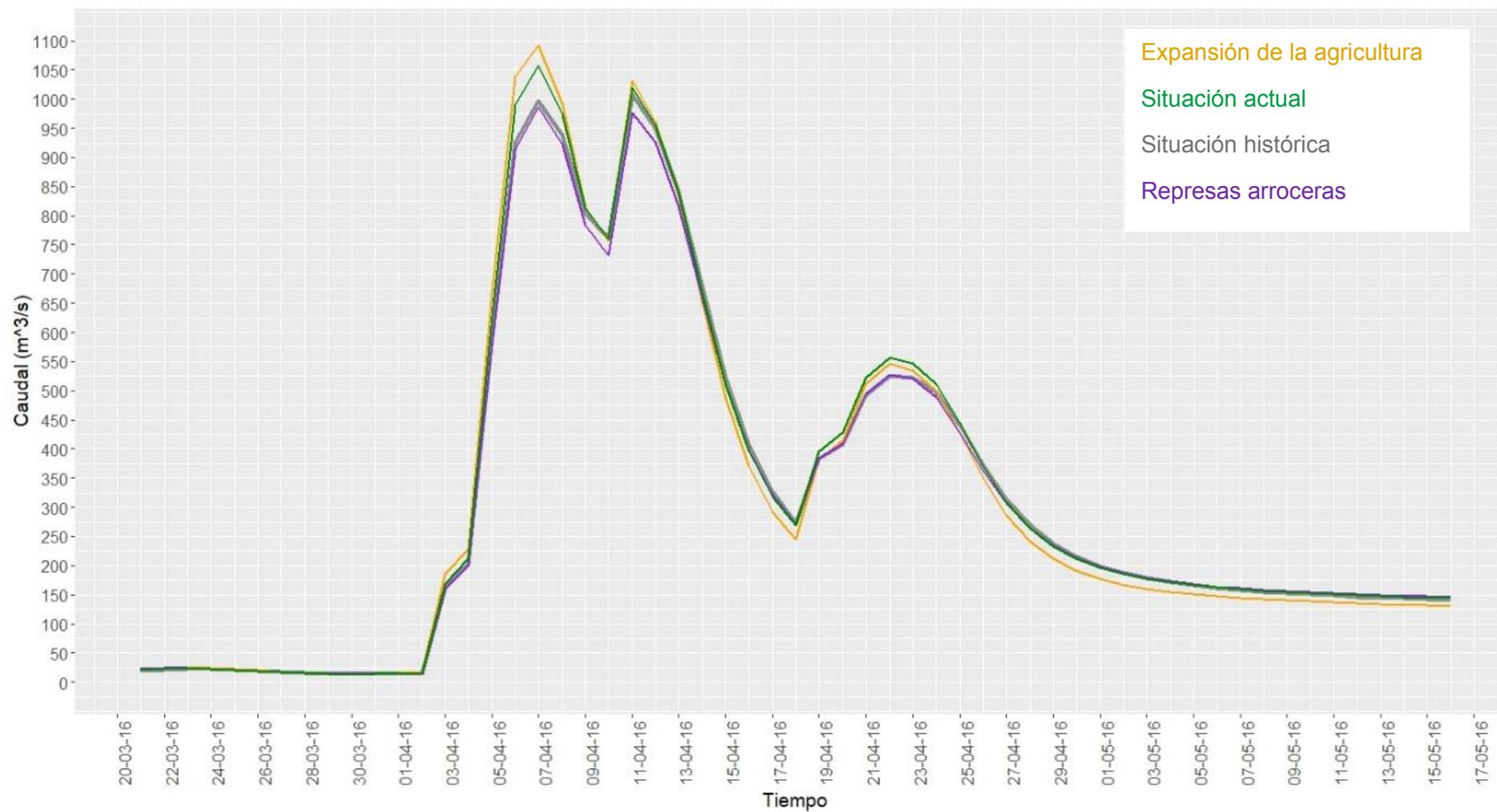


Figura 80. Hidrograma modelado de la crecida de 2016

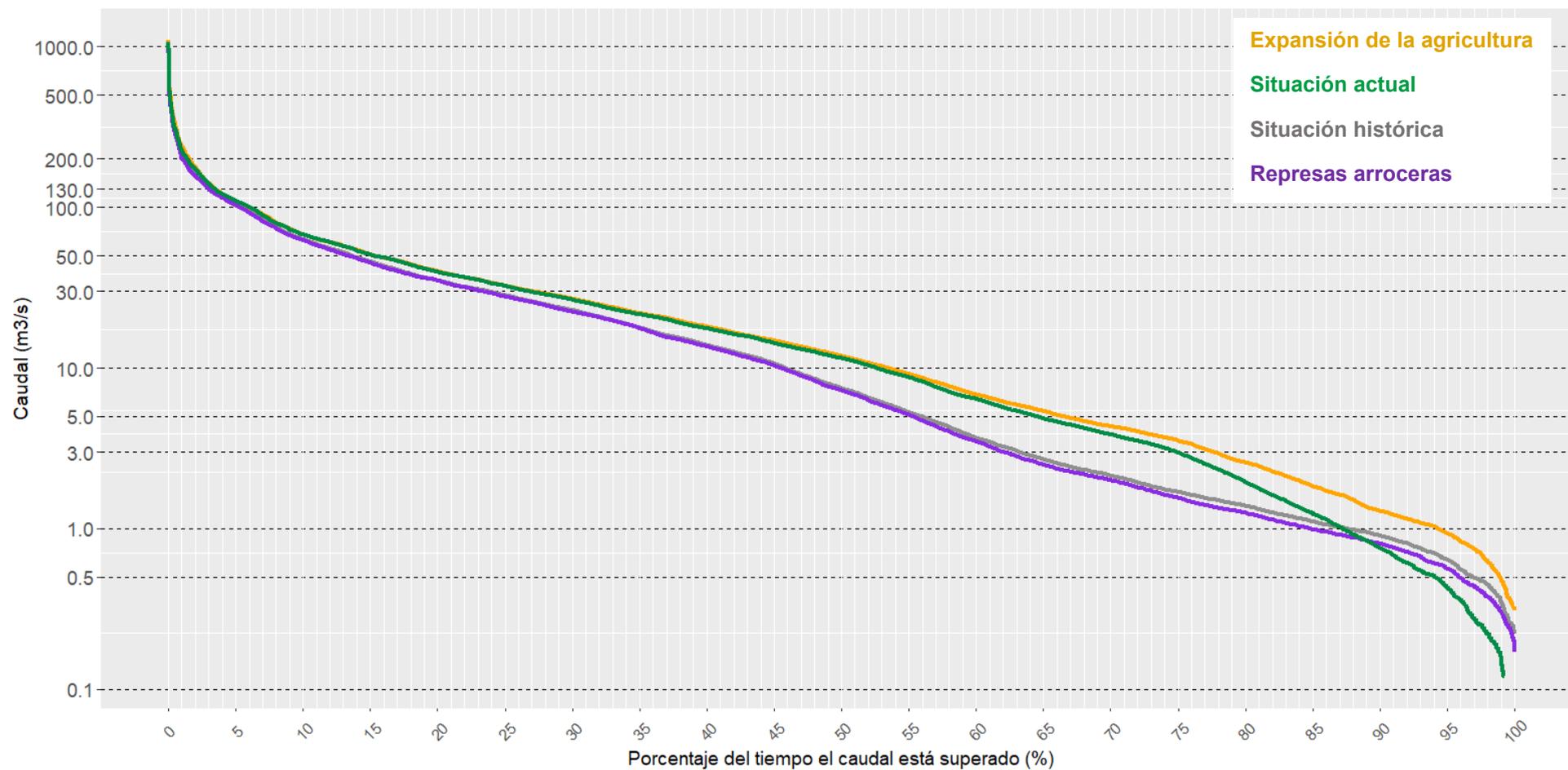


Figura 81. Curva de duración de caudales

En el escenario de la expansión de la agricultura, se observan aumentos sustanciales en los picos de crecida. El efecto es más notable en las pequeñas crecidas ($<100 \text{ m}^3/\text{s}$), en las cuales la expansión de la agricultura frecuentemente duplica el pico de caudal del río Guayquiraró (Figura 78). Se estima un incremento de caudales de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ con expansión de la agricultura (del orden del 10 %, Figura 80) en la crecida extraordinaria de 2016.

Durante las crecidas ordinarias (1988 ; Figura 77, 2000 ; Figura 78 , 2006 ; Figura 79), el escenario con represas arroceras tiene picos de crecida levemente reducidos (entre 5 y 10 % menos) en comparación con la situación histórica, lo cual no se observa para las crecidas pequeñas. Para la crecida extraordinaria del 2016 (Figura 80), el efecto de las represas se hizo notar solamente en el segundo pico de crecida, con una reducción de aproximadamente 7,5 % del pico de caudal.

Con relación a la frecuencia de los caudales (Figura 81), se aprecian diferencias entre la situación histórica y la situación actual en los caudales menores (los que son superados 87 % del tiempo), los cuales son más bajos en la situación actual que en cualquier otro escenario.

Esta situación se revierte para porcentajes menores a 87 %, donde la situación actual tiene caudales más altos que en la situación histórica (esto vale hasta aproximadamente la cifra del 15 %, donde la diferencia se vuelve mínima). Por lo tanto, son los caudales intermedios los que se ven aumentados en la situación actual. Por ejemplo, el río Guayquiraró supera $10 \text{ m}^3/\text{s}$ el 46 % del tiempo en la situación histórica, mientras que lo supera el 53 % del tiempo en la situación actual.

Para los caudales que están superados entre 0 y 75 % del tiempo, la situación histórica y el escenario con represas arroceras funcionan de forma muy similar. Ocurre lo mismo con la situación actual y el escenario de expansión de la agricultura.

5.3.3. Producción de agua por subcuenca

Históricamente, la producción de agua¹¹ era más importante en el este de la cuenca, la parte dominada por PS. En el escenario de las represas arroceras, no se observa casi cambio en la producción de agua. En el escenario de la expansión de la agricultura y la situación actual, las subcuencas entrerrianas del suroeste aumentan considerablemente su producción en agua, tal como se observa en las subcuencas del este donde las presas arroceras se han construido.

¹¹ La producción de agua en SWAT (Water yield) representa el escurrimiento superficial, el flujo base y la recarga al acuífero profundo.

La producción máxima es de 582 mm en una subcuenca ocupada por soja, arroz y una represa arrocera, en la situación actual.

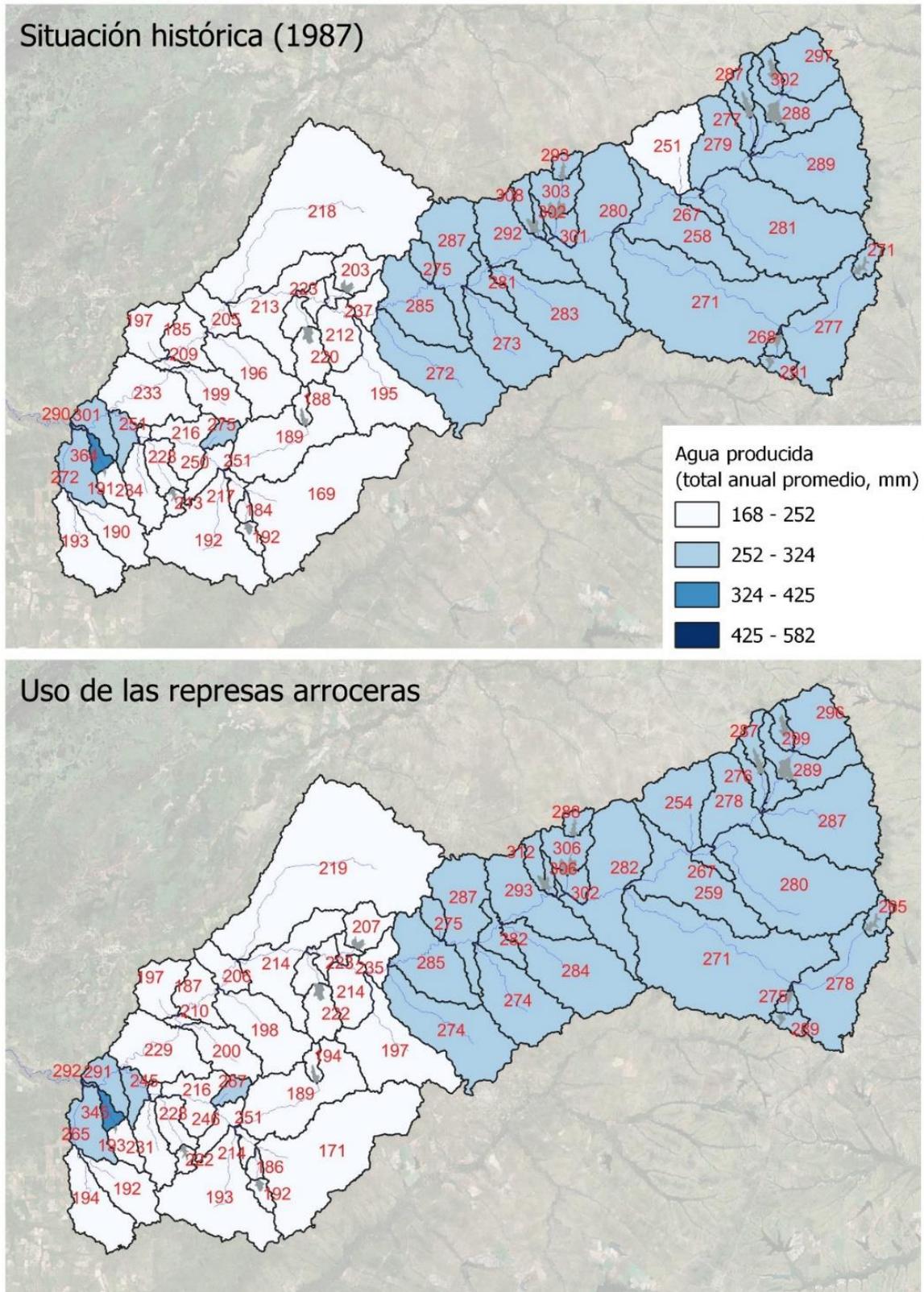


Figura 82. Mapas de producción de agua (promedios anuales en mm), a escala de subcuenca. Escenarios 1 y 2.

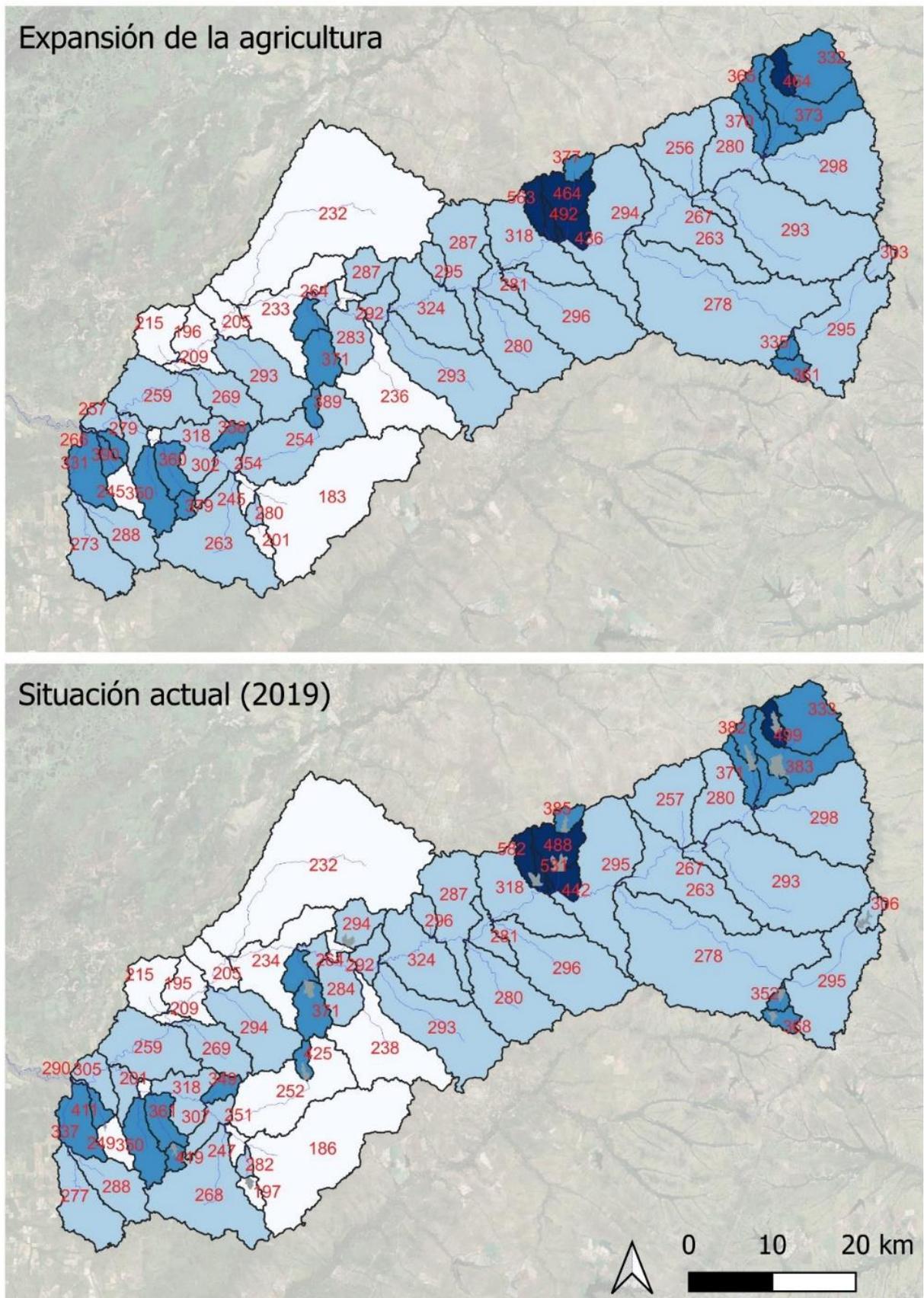


Figura 83. Mapas de producción de agua (promedios anuales en mm), a escala de subcuenca. Escenarios 3 y 4.

5.3.4. Análisis comparativo a escala de subcuenca: nacimiento del Guayquiraró y arroyo Capivarí

Estas dos subcuencas que forman las cabeceras del río Guayquiraró superior son de superficie y características morfométricas y edafológicas comparables. En 1987 tenían el mismo tipo de cobertura del suelo, principalmente PS. La subcuenca del arroyo Capivarí se mantuvo sin grandes cambios (Figura 23 arriba), mientras que una arrocera se instaló en la subcuenca de la naciente del río Guayquiraró (Figura 55, Figura 56, Figura 57) utilizando dos represas (Figura 84).

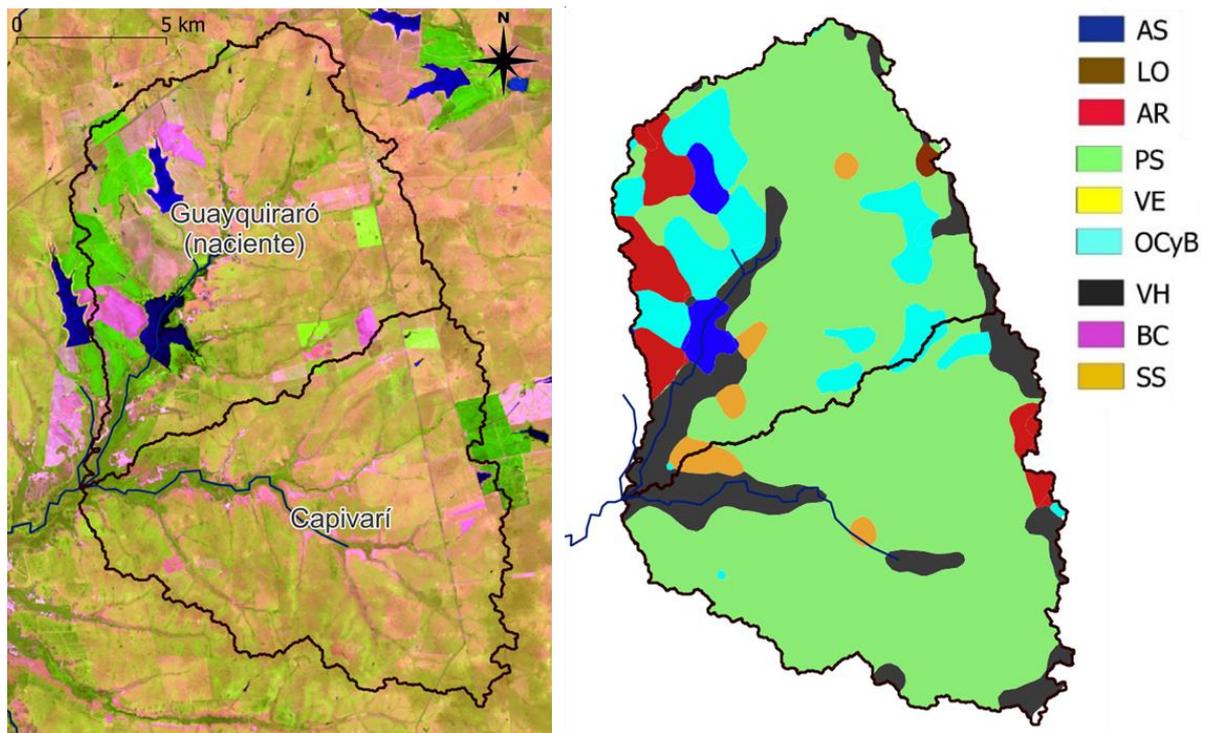


Figura 84. Subcuencas del río Guayquiraró superior en su nacimiento y el arroyo Capivarí. Imágenes del 2019

a) Aspectos hidrológicos

El escenario de represas arroceras reduce los picos de crecida del Guayquiraró (naciente), muchas veces drásticamente. Por ejemplo, en 1992, una crecida de 20 m³/s pasa a ser de 2,5 m³/s en el escenario de represas arroceras (Figura 85). En otros casos, los hidrogramas son los mismos.

Sin embargo, en base a los escenarios de expansión de la agricultura y de la situación actual, las crecidas se ven aumentadas en vez de reducidas, consecuencia del cambio en el uso de suelo en la cuenca. De 1985 a 2019, hay solamente tres crecidas sustanciales cuyos picos de

crecida son más bajos en la situación actual que en la situación histórica (por ejemplo, en 2009, Figura 86).

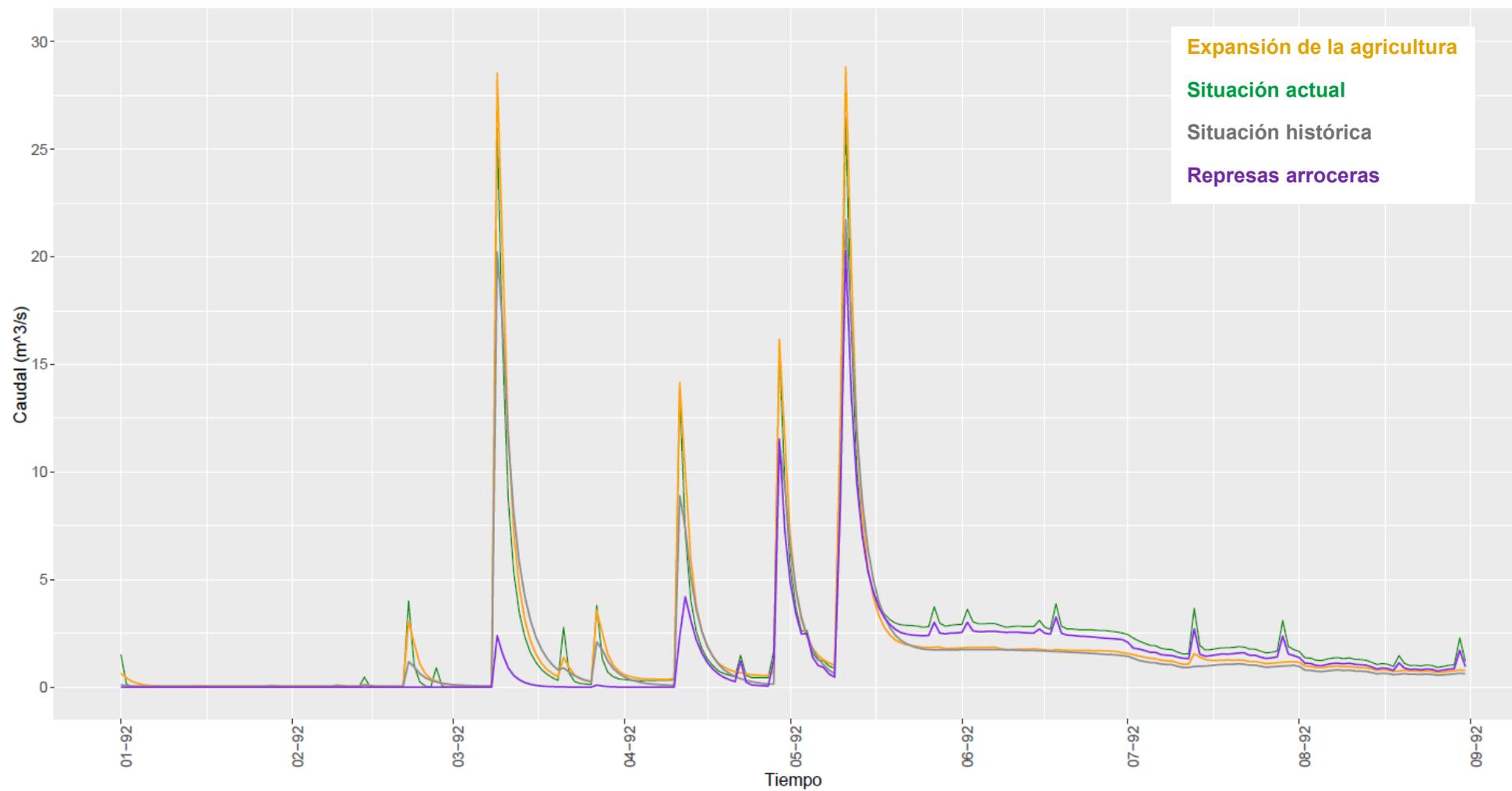


Figura 85. Hidrograma modelado del río Guayquiraró en su nacimiento. Año 1992.

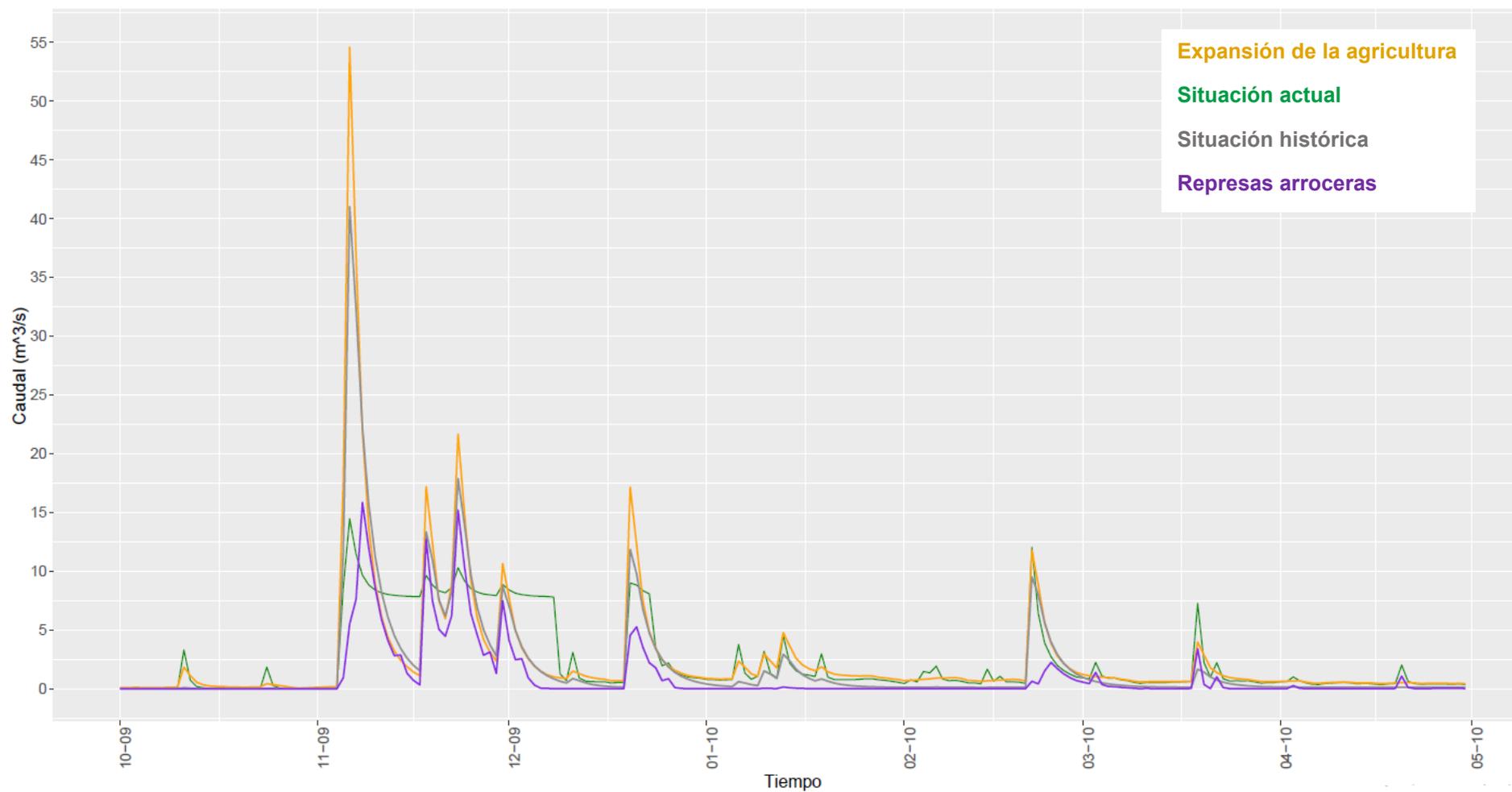


Figura 86. Hidrograma modelado del río Guayquiraró en su nacimiento. Años 2009-2010.

b) Aspectos geomorfológicos

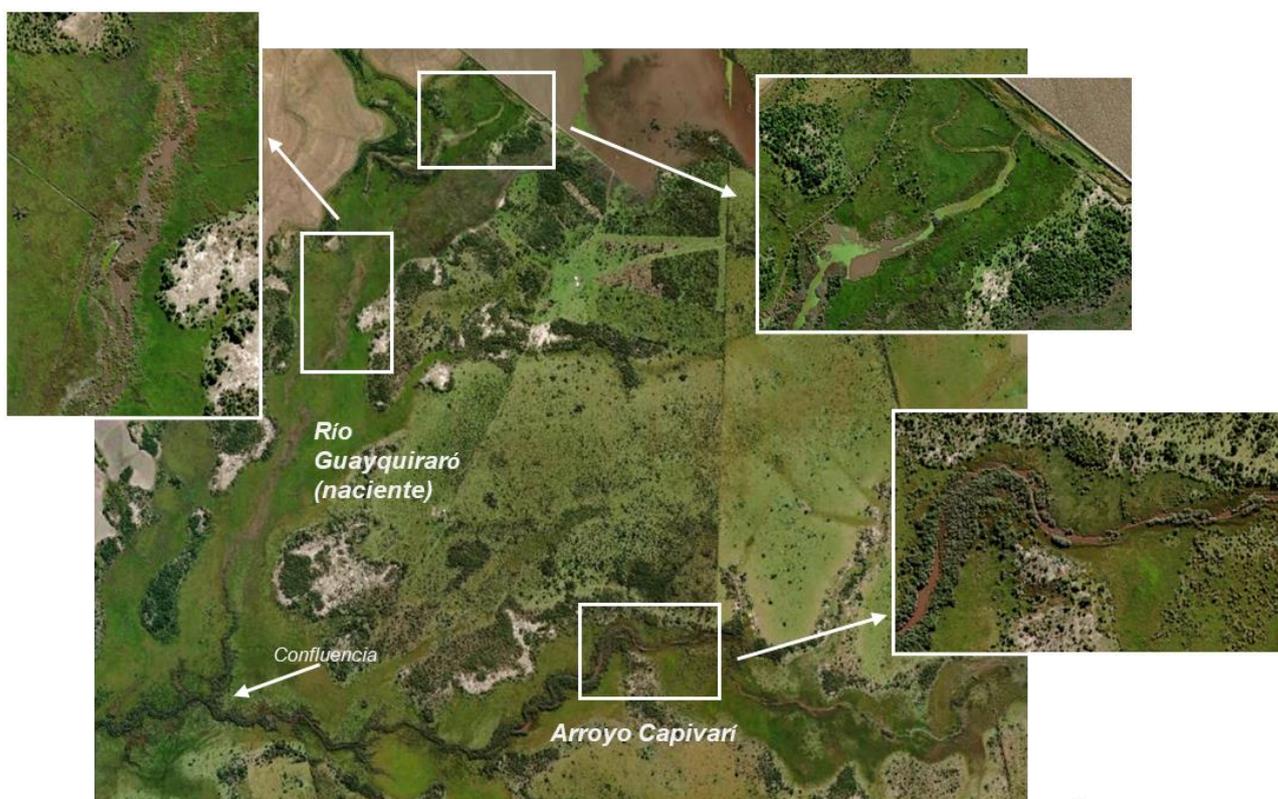


Figura 87. El río Guayquiraró superior (en su nacimiento) y el Capivarí. Fuente: Bing Aerial.

El río Guayquiraró, entre la represa y la confluencia con el arroyo Capivarí, fluye por partes de manera difusa y por partes de manera encauzada (Figura 83). Comparando con fotos aéreas del año 1981¹² (ver Anexo VIII), comprobamos la existencia de esa misma propiedad en esta época. Por lo tanto, esta morfología particular no es el resultado de la instalación de represas arroceras en esta subcuenca.

Dicho esto, directamente aguas abajo de la represa, el río Guayquiraró está ocupado por importantes colonias de plantas acuáticas flotantes, lo cual probablemente está facilitado por el corte de flujo que provoca la represa. El accionar conjunto de estas plantas y de la represa podría facilitar la sedimentación de las partículas finas en suspensión en el agua, lo cual llevaría a la colmatación y la eutrofización del cauce. Identificamos también que la compuerta no se encuentra al frente del río, sino 850 m en su lado izquierdo, lo cual implica que el agua vertida por la compuerta no contribuye al mantenimiento del cauce.

¹² Las fotos fueron obtenidas directamente del departamento de ventas del Instituto Geográfico Nacional, el 10 de agosto 2023.

Por su parte, el arroyo Capivarí tiene un patrón meandriforme encauzado con márgenes bien definidas.

En la confluencia, ambos cauces están encajonados y muestran señas de erosión importante (Figura 88).

Durante el trabajo de campo, se pudo comprobar que el río Guayquiraró en su nacimiento tiene un caudal netamente inferior que el arroyo Capivarí, por lo menos en condición de estiaje¹³.



Figura 88. El río Guayquiraró superior (naciente) unos metros aguas arriba de su confluencia con el arroyo Capivarí.

¹³ Esta observación se hizo en condiciones de estiaje por parte de ambos cauces, el 21 de agosto de 2022.

Capítulo 6. Discusión sobre las prácticas agropecuarias recientes y su vínculo con la hidrogeomorfología de la cuenca

6.1. Introducción

La incisión marcada de los cursos de agua del RVCE, el alcance de niveles de desborde de los ríos fuera de sus planicies de inundación en el MAAP y los aumentos en la velocidad de la migración lateral son desequilibrios hidrogeomorfológicos que podrían resultar de una evolución geológica a largo plazo o bien de perturbaciones antrópicas (ver sección 3.3.3). En efecto, la influencia antrópica es una hipótesis válida ante la apreciación de cambios geomorfológicos fluviales (Knighton, 1998). Particularmente en la región del norte de Entre Ríos, Iriondo et al. (1985) sugerían investigar las prácticas agropecuarias para explicar el aumento de energía y los cambios morfológicos en la planicie del arroyo Feliciano.

Las perturbaciones a los sistemas hídricos provocadas por las PAR analizadas en esta tesis podrían explicar, al menos en parte, estos desequilibrios y tendencias que observamos en la cuenca. Además de los efectos cumulativos o generalizados a escala de cuenca, algunas prácticas influyen a nivel local sobre cauces o subcuencas específicos, desde sistemas de cabecera hasta el mismo arroyo Barrancas. Actúan tanto de forma indirecta, es decir a partir de manejos en la cuenca que influyen los regímenes de caudales sólidos y líquidos, como de forma directa a partir de intervenciones mecánicas concretas.

En el siguiente capítulo, se discute sobre las alteraciones que provocan las PAR sobre el funcionamiento hidrogeomorfológico de la cuenca y sus implicaciones en diversos aspectos.

6.2. Efectos de las canalizaciones y terraplenes

El uso de terraplenes y canalizaciones en el MAAP, frecuentemente sobre decenas de kilómetros, aumenta la conexión hidrológica entre los grandes humedales de los abanicos aluviales y la red hídrica aguas abajo (Figura 65). Estas obras reducen el tiempo de residencia en la cuenca y probablemente aumenten los picos de crecida en la cuenca baja. Han sido remarcados como problemáticos los efectos producidos por un terraplén de gran alcance en el MAAP, en los esteros del Iberá (ver el caso del terraplén ilegal de Yahaveré, Waller, 2011). El aumento de la velocidad del flujo, el cambio desde un flujo laminar hacia un flujo concentrado, el aumento del potencial erosivo, la formación de cuerpos de aguas estáticos y las transfluencias entre subcuencas son los fenómenos que remarca el autor. En efecto, las canalizaciones contribuyen en algunos casos a conectar aguas sobrepasando los límites topográficos de la cuenca del río Guayquiraró, un fenómeno que ocurre también naturalmente.

Otra cuestión es en relación con el sostenimiento a largo plazo de los humedales, cuando uno de los fines específicos de las canalizaciones es justamente el de eliminar estos ecosistemas. Aunque la magnitud de las canalizaciones en la DSB hoy en día no parece ser suficiente para la desaparición de sus humedales, claramente contribuyen a su degradación, especialmente en los años secos. Los terraplenes, por su parte, desvinculan hidrológicamente los humedales, y así se altera notablemente el intercambio bi-direccional de nutrientes y otras propiedades entre ellos.

En general, la construcción de terraplenes y de canalizaciones parece ser una práctica que aumentó en las últimas décadas: por ejemplo, se identificaron grandes zanjas de drenaje en el MAAP construidas después de 1975 en la cuenca del arroyo Salinas.

6.3. Efectos de los embalses ganaderos (tajamares)

Los embalses ganaderos (tajamares) tienen una larga trayectoria en la región, utilizadas desde por lo menos 180 años (Bosch, 1954). Reducen la conectividad hidrológica y sedimentaria de los cauces de primer y segundo orden (Rodríguez et al., 2021), pero permiten el escurrimiento superficial en las crecidas importantes, ya que cuentan con un vertedero lateral (Petillo et al., 2012). Constatamos en campo que son propensos a procesos erosivos en sus inmediaciones.

Más allá del cambio que provoca el tajamar a nivel local, no se observan cambios de índole geomorfológico en los cursos o vías de escurrimiento directamente aguas abajo de ellos. El efecto que hace la sumatoria de tajamares en los cauces de orden mayor no ha sido justipreciado en esta tesis.

6.4. Efectos de las obras ingenieriles fluviales

Con el objetivo de aumentar la velocidad del agua y así su capacidad de drenaje, han reducido drásticamente la rugosidad del arroyo Barrancas con la homogeneización de la geometría del canal (trapezoidal) y el retiro de la vegetación. Es probable que lo mismo reduzca el tiempo de residencia del agua en el arroyo y consecuentemente en la zona más aguas arriba donde se hizo la obra. Sin embargo, en un ambiente de relieve inexistente como la DSB donde las inundaciones son severas y largas, no es seguro que el efecto de esta obra sobre el drenaje de los campos relativo sea significativo.

La obra aumenta la velocidad del agua y consecuentemente favorece la concentración del pico de caudal. Los terraplenes construidos por dragado (Figura 89) potencian aún más estos efectos, aumentando la capacidad hidráulica del arroyo. Además de desconectar al arroyo de

su propia planicie, modifica las condiciones hidráulicas para los puentes que se han construido aguas abajo, los cuales ya están precarizados.

Desde un punto de vista ecológico, se pueden esperar varios impactos negativos para la fauna piscícola, entre ellas la falta de conectividad entre el cauce y su planicie de inundación, el aumento de la temperatura del agua asociada a la falta de sombra después del desmonte de los márgenes, la destrucción de hábitat y la falta de fuente en comida.

Finalmente, al dejar las márgenes del arroyo expuestas, libres de vegetación, la sensibilidad ante la erosión y la migración lateral se aumenta de forma considerable. Esto pone en serio peligro los puentes sobre el arroyo, como, por ejemplo, el puente en la Figura 94. Como la obra sobre el arroyo Barrancas se ha hecho recientemente, es poco probable que haya influenciado el análisis de migración lateral presentado en esta tesis. Dicho esto, otras obras de este tipo se han hecho en el pasado sobre este mismo arroyo¹⁴.



Figura 89. El arroyo Barrancas directamente después de las obras de 2017-2018. Fotos obtenidas desde el sitio web del ICAA.

¹⁴ No se pudo tener acceso a ninguna documentación sobre estas obras.

6.5. Efectos de los cambios en las coberturas terrestres

Después del cambio desde una vegetación natural hacia cultivos anuales (Figura 90), los suelos quedan mucho más expuestos a la erosión. Los suelos con tasas altas en limo son aquellos que se deben vigilar, ya que es la porción granulométrica que da más fragilidad a un suelo. Un productor en las cercanías de San Víctor, en Feliciano, confirmó haber tenido problemas con erosión en campos de cultivo ante eventos de precipitaciones importantes. Se pudieron resolver con el uso de terrazas, curvas adecuadas y canalizaciones de desagüe en los bordes de los lotes.

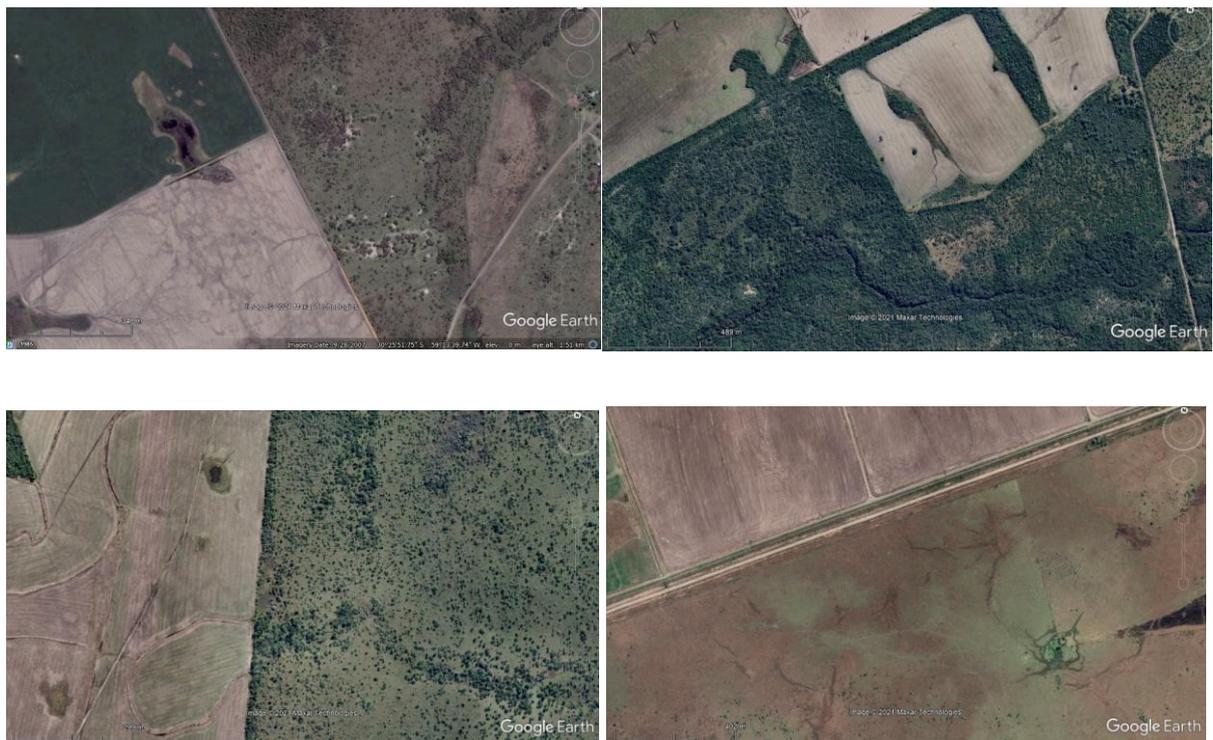


Figura 90. Ejemplos de cambios en las coberturas terrestres. Arriba, izquierda: hidromorfismo en campo de cultivo. Arriba, derecha: pérdida de BC a mano de OCyB. Abajo, izquierda: pérdida de SS a mano de OCyB. Abajo, derecha: pérdida de VH a mano de AR.

Pero el tipo de erosión que podría ser el más problemático en la región es la formación de cárcavas: algunas de ellas llegan a dimensiones importantes (Figura 91). El origen de estas puede ser multicausal, pero una componente antrópica, al menos, es indiscutible favoreciendo su desarrollo, habida cuenta que se observaron en campos de cultivo principalmente.



Figura 91. Cárcavas de erosión de hasta 5 m de ancho en campo.

Al modificar y reducir la vegetación en la cuenca, el avance de la agricultura redujo la evapotranspiración, aumentó el escurrimiento superficial y, al contrario de lo esperado, favoreció la infiltración del agua (Tabla 14). Podría ser el caso en las zonas llanas, no en las zonas donde los interfluvios tienen pendientes sustanciales. Durante las crecidas pequeñas ($<100 \text{ m}^3/\text{s}$) y medianas ($>100 \text{ m}^3/\text{s}$, $<1000 \text{ m}^3/\text{s}$), el pico de caudal se ve aumentado por el efecto de la expansión de la agricultura.

Este cambio en el régimen hidrológico, profundizándose con el avance constante de la frontera agrícola, podría ser parte de la explicación del aumento en la tasa de migración lateral que hemos constatado en el río Guayquiraró. El hecho de que la cuenca del arroyo Sarandí (incluyendo a los SH del arroyo Barrancas alto y del arroyo Ávalos) no tuvo este avance de la agricultura y que su tasa de migración lateral se haya mantenido constante es coherente con esta hipótesis. Otro elemento para considerar es el aumento en la eficiencia del drenaje de la cuenca traído por la incisión de la red hídrica, lo cual puede estar teniendo un efecto importante sobre el régimen hidrológico del río Guayquiraró.

Con respecto al fenómeno de incisión fluvial, es también presente en la cuenca vecina del arroyo Feliciano (Ramonell y Alberdi, 2015) y en buena parte de Entre Ríos. Sus causas deben buscarse en cambios durante el Plioceno y el Cuaternario en la posición relativa del nivel de base de estas cuencas, es decir, el río Paraná, o bien en aumentos de la capacidad erosiva de los cauces (Schumm, 2007). En este sentido, los cambios en la superficie traídos por la expansión de la agricultura podrían contribuir al fenómeno, ya que incrementan el

escurrimiento superficial y consecuentemente la energía de los cauces. Dicho esto, el levantamiento tectónico de la región tampoco debería descartarse como posible contribución al proceso. En este sentido, la incisión fluvial bien podría ser multifactorial. De hecho, su componente antrópico podría ser anterior a la llegada de las PAR. En efecto, la deforestación traída por los europeos, o incluso antes por las comunidades autóctonas (comunicación personal con José Luis Fontana, 1 de agosto de 2023) podría provocar hasta hoy un cambio en el régimen hidrológico afectando de manera generalizada el paisaje fluvial regional. No hay pruebas concluyentes sobre la magnitud de esta deforestación¹⁵: esclarecer esta parte de la historia regional podría ser clave para diferenciar los componentes antrópicos de los naturales en el fenómeno de incisión actual en el RVCE.

6.6. Efectos de las represas arroceras

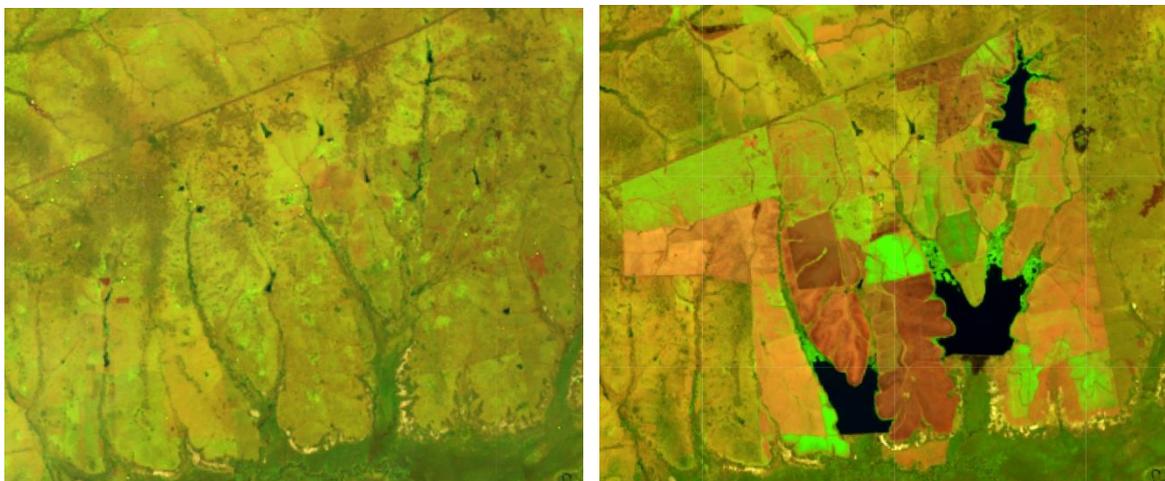


Figura 92. Cambios territoriales en el departamento de Sauce, Corrientes, antes y después de la instalación de una arrocera (entre 1998 y 2008).

Según la teoría proveniente de la geomorfología fluvial, es casi inevitable que la construcción de una represa en un cauce fluvial produzca, a una escala temporal y espacial dada, una respuesta en la morfología del cauce (Schumm, 2007; Biedenharn et al., 2008). Sin embargo, estos estudios tratan generalmente de una represa individual, de gran tamaño y en el cauce principal de un sistema fluvial. A nivel de cuenca, un conjunto de represas puede tener un efecto acumulativo, pero podría ser despreciable si la recuperación del sistema es rápida (Fencl et al., 2015) o si la cantidad de tributarios con represa es proporcionalmente baja.

¹⁵ Es de debate si los pastizales de Corrientes son naturales, semi-naturales o completamente antrópicos, y desde que época existen. Se reconoce el uso del fuego por las comunidades autóctonas pre-hispánicas, por lo cual los pastizales correntinos podrían ser fruto del accionar del ser humano. Sin embargo, la presencia de especies de sabanas endémicas en Corrientes indica la larga trayectoria de los espacios abiertos en esta región (comunicación personal, Alejandro Raul Giraudo, 9 de septiembre de 2023).

En el caso de la cuenca del Guayquiraró, son varias represas de tamaño mediano ubicadas en cauces de bajo orden. En este contexto, se pueden pensar las influencias que tienen las represas arroceras en la cuenca de Guayquiraró según dos escalas: la escala local y la escala de cuenca.

a) Escala local

A escala local, la represa arrocera tomada por si sola tiene un efecto reductor sobre las crecidas. Sin embargo, como siempre está acompañada de un cambio en el uso de suelo de la subcuenca, el efecto real de las arroceras es, al contrario, un aumento en los picos de crecida.

Durante el estiaje, una represa arrocera puede reducir considerablemente el caudal en la subcuenca donde se instala, lo cual hemos constatado *in situ* en la confluencia del río Guayquiraró (naciente) y del arroyo Capivarí.

Además, el hecho de verter las aguas en la planicie (por la compuerta o los vertederos laterales) en vez de hacerlo en el canal provocará, a mediano plazo, la modificación de la morfología del arroyo, ya que implica un cambio completo en los caudales líquidos y sólidos transitándolo (Leopold, 1994). Por ejemplo, en el caso del río Guayquiraró (naciente), el cauce está severamente invadido por vegetación acuática sobre 1700 m directamente aguas abajo de la presa (Figura 87). A largo plazo, podemos suponer que este tramo acumulará vegetación y sedimento fino hasta convertirse en una cañada.

Entonces, la construcción de represas implica la degradación del arroyo directamente aguas abajo del mismo. Esto dicho, no está demostrado que cambiar de un sistema encauzado hacia un sistema pantanoso sea algo negativo desde un punto de vista ecológico; de hecho, gran parte de la red hídrica de la cuenca funciona así naturalmente (ver las cañadas en la UG de valles fluviales).

Relativo al transporte de sedimentos, las represas actúan como trampas. Sin embargo, según el personal de la estancia arrocera que visitamos, hay muy poca acumulación de sedimento en el fondo del embalse después de 22 años de uso. En este sentido, las represas arroceras no parecen captar una cantidad de sedimento que podría tener un impacto significativo en el transporte de sedimento en la cuenca. Dicho esto, cabe destacar que normalmente se genera una entrada importante de sedimentos en la cuenca al momento de la construcción de la represa (Petts y Gurnell, 2005).

Con respecto a lo que ocurre aguas arriba de la represa, se suelen considerar las represas arroceras como beneficiosas para el ecosistema ya que actúan como un hábitat para la fauna

(Manual BPA, 2014). En efecto, los embalses arroceros son humedales antrópicos (Minotti, 2007; Falcón et al. 2014). Nosotros comprobamos en campo que las arroceras y los embalses son ambientes habitados por numerosas especies de tetrápodos (tortugas, ñandúes, yacarés, carpinchos, garzas, etc.). Sin embargo, a pesar de que puedan ser beneficiosos para especies específicas, la fauna y la flora regional están adaptadas a los ambientes regionales, no a lagos como los que forman las represas, por lo cual el impacto real sobre la biodiversidad es incierto.

b) Escala de cuenca

La gran mayoría del tiempo, es decir desde otoño hasta fines del verano, el agua está retenida en el embalse y en la arrocera. Hacia fines del verano, cuando la cuenca se encuentra normalmente en estiaje, el agua es reintroducida a la red hídrica. Sin embargo, solo una pequeña porción del agua se reintroduce, ya que buena parte de ella fue evapotranspirada.

Cuando se consideran las represas arroceras en conjunto con la expansión de la agricultura, se constata un leve aumento en los picos de crecidas medianas del río Guayquiraró ($>100 \text{ m}^3/\text{s}$, $<1000 \text{ m}^3/\text{s}$), aunque no es constante. En las pequeñas crecidas ($<100 \text{ m}^3/\text{s}$) la expansión de la agricultura aumenta los picos del hidrograma de manera más contundente, mientras que las represas tienen poco o ningún efecto.

Al analizar la curva de frecuencia de caudales (Figura 81), es interesante el punto de inflexión observado para los caudales superados el 87 % del tiempo. Para los caudales inferiores a éste ($<1,0 \text{ m}^3/\text{s}$), la combinación de la expansión de la agricultura y las represas arroceras tiene el efecto de achicarlos, mientras que para los caudales superiores el efecto es de agrandarlos. El resultado es un régimen hidrológico en el cual los caudales están de forma general aumentados, pero reducidos durante los estiajes más importantes.

Iturburu (2007) promocionó los efectos beneficiosos para la sociedad de las represas arroceras, es decir la regulación hídrica y la mitigación de inundaciones en los ríos aguas abajo. La modelación muestra que efectivamente, las represas arroceras reducen levemente los picos de crecida en la cuenca del río Guayquiraró. Sin embargo, como siempre están acompañadas de un cambio en el uso de suelo (expansión de la agricultura), parece ser que el efecto real de las arroceras sea el aumento en los picos de crecida del río Guayquiraró.

Capítulo 7. Propuestas para el manejo integral de cuenca hidrográfica

7.1. Contexto socioambiental

Como en otras regiones del Litoral, la cuenca del río Guayquiraró es un territorio donde muchos espacios son propensos naturalmente al anegamiento y a los desbordes de los cursos de agua. Cuando afectan a la sociedad de forma negativa, calificamos estos fenómenos de inundaciones¹⁶.

En el departamento Feliciano de Entre Ríos, han ocurrido inundaciones importantes desde arroyos medianos que han inundado casas, campos con animales y caminos (Figura 93). Los habitantes han observado en los últimos años un cambio en la respuesta de los arroyos ante la lluvia, la cual consideran más rápida e intensa.



Figura 93. Camino rural inhabilitado por el desborde del arroyo Trochi, departamento de La Paz, Entre Ríos. Foto cortesía de Luis Prevedel.

Al menos tres puentes públicos se han derrumbado en los últimos años: el puente del Paso Juncue, vinculando el departamento correntino de Esquina con el departamento entrerriano de La Paz, en 2008; el puente de la ruta 126 en Paso La Llana, uniendo Pueblo Libertador con parajes y la ciudad de Sauce hacia el este, en 2015, y el puente de la ruta 63 uniendo Pueblo Libertador con Rincón del Sarandí, en 2019. En el caso del puente de Paso La Llana, la migración lateral del arroyo Sarandí parece haber sido la causa de su caída, ya que se cayó

¹⁶ Han ocurrido varias inundaciones en los últimos años en la cuenca del río Guayquiraró. Esta nota da fe de inundaciones en 2019: <https://www.nortecorrientes.com/144349-socavo-puente-sobre-arroyo-barranca-y-aislo-a-pobladores-de-pueblo-libertador>

la base de la ribera cóncava de un meandro activo (Figura 94). A pesar de que el puente esté reemplazado actualmente, la evolución del meandro lo amenaza todavía, junto con las casas de los ribereños. En el caso del puente sobre la ruta 63, la causa de la caída no es clara, aunque podría estar vinculada con las obras de readecuación del arroyo Barrancas que se hicieron en 2017 y 2018.



Figura 94. En 2015 ocurrió la caída parcial del puente de la ruta 126 entre Sauce y Pueblo Libertador, ubicado aguas abajo de la unión natural del Sarandí con el Barrancas.

El territorio de la cuenca del río Guayquiraró es netamente rural. Está alejado de los grandes centros urbanos y fuera de las regiones de mayor atención política. Una parte importante de los habitantes de la cuenca es pobre y algunos incluso viven en condición de alta de precariedad. Las causas de la pobreza son complejas y múltiples; no obstante, se puede expresar que el mal estado de la red vial y los aislamientos provocados por las inundaciones o por rupturas de puentes empeoran la calidad de vida de los habitantes. Los aislamientos pueden durar hasta semanas, complicando el acceso a servicios de salud en caso de emergencias, además de impedir el traslado de mercancías.

Hemos constatado que los habitantes de la zona están acostumbrados a inundaciones, aunque sigue siendo perjudicial para el desarrollo de sus actividades. Varios de ellos han comentado haber perdido muchos animales en los últimos años a causa de los desbordes de los cauces.

Otra cuestión socioambiental relevante es la deforestación, particularmente en el sur de la cuenca (Figura 95). Los lugareños que encontramos la remarcaron como en aumento en los

últimos años. Muchos lo vinculan con el aumento en los desbordes de los arroyos, en el sentido que las inundaciones son una consecuencia del fenómeno.



Figura 95. Ejemplo de deforestación en las cercanías a Las Mulas, Departamento Feliciano, Entre Ríos. Foto cortesía Luis Prevedel, ANP Don Sebastián.

7.2. Mecanismos de gestión provincial actuales relativos a la hidrogeomorfología

En la provincia de Entre Ríos, la institución encargada del manejo de los recursos hídricos es la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos, fundada en 2002 y dependiente de la Secretaría de Ambiente y del Ministerio de Producción, Turismo y Desarrollo Económico. Relacionado con ella, el Consejo Regulador de Usos de Fuentes de Aguas (CORUFA) regula los usos de agua comerciales en la provincia.

En la provincia de Corrientes, el manejo del agua se rige por el Código de Aguas de la Provincia, el cual estipula desde 2001 que el agua es un bien indispensable a la vida y a la actividad del hombre, y consecuentemente está fuera de comercio. Tanto las aguas públicas como las privadas están sometidas a los reglamentos del Código. El Instituto Correntino de Agua y Ambiente (ICAA), un ente del Ministerio de la Producción, Turismo y Trabajo, es la autoridad competente del Código de Aguas, además de la Normativa Ambiental, y de las tierras e islas fiscales, entre otros. El Código de Aguas determina que las modificaciones al escurrimiento natural del agua deben evitarse o tener la aprobación del ICAA.

Desde la publicación de las dos guías de buenas prácticas para el cultivo de arroz (2008, 2016), el ICAA exige que los nuevos proyectos arroceros se presenten bajo sus directivas.

Un resumen no exhaustivo de mecanismos de gestión relevantes a las cuestiones de hidrogeomorfología se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15. Leyes y mecanismos de gestión por parte de las provincias, de interés para la hidrogeomorfología de la cuenca

Corrientes	Entre Ríos
<p>Ley 191/01 del Código de aguas de la provincia de Corrientes.</p> <p>Permite obras hidráulicas privadas, mientras que no produzca perjuicio a tercero ni al público.</p> <p>Se destacan los siguientes artículos:</p> <p>Art. 59. <i>"La Autoridad de Aplicación podrá fijar áreas de protección de cuencas, pudiendo adoptar medidas conducentes a la regulación de la presión de pastoreo, desforestación, talas forestales, cultivos, cuando se pudiere ver afectada la integridad natural de las mismas por peligros de erosión y/o sedimentación [...]"</i></p> <p>Art. 219. <i>"La Provincia realizará las obras necesarias para ordenar cauces, corregir escurrimientos perjudiciales, encausar o eliminar obstáculos al escurrimiento natural, regular y/o almacenar aguas en los cauces naturales o artificiales."</i></p> <p>Art. 222. <i>"La Autoridad de Aplicación deberá prestar asistencia técnica a los propietarios, usufructuarios o tenedores de terrenos inundados o pantanosos que sea necesario desecar o sanear"</i></p>	<p>Ley 9172 de Uso Productivo del Agua.</p> <p>Permite obras hidráulicas privadas, mientras que no produzca perjuicio a tercero y que respete la Ley Anti-Represa (esta ley se aplica solamente a los ríos Paraná y Uruguay).</p> <p>Se destacan los siguientes artículos:</p> <p>-</p> <p>Art. 93. <i>"El Estado Provincial tomará las medidas necesarias a los fines de evitar y controlar [...] todo fenómeno hecho por el hombre o natural que se manifieste con síntomas de erosión, [...] drenaje inadecuado, eutroficación y cualquier otro proceso de contaminación ya sea de los suelos o las corrientes y cursos de agua."</i></p> <p>Art 50. <i>"El Poder Ejecutivo impondrá servidumbres administrativas cuando ello sea necesario para [...] control de inundaciones, anegamiento y desecación de pantanos o tierras anegadizas"</i></p>
<p>Ley Nº 5.974 de Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos de Corrientes.</p> <p>Los bosques en el RVCE son de categoría verde (desmonte). Si lo requiere el ICAA, se debe presentar un plan de cambio de uso de suelo, incluyendo una evaluación de impactos ambientales y una audiencia pública (Fontán, 2012).</p>	<p>Ley 10.284 de ordenamiento territorial de bosque nativo de la provincia de Entre Ríos.</p> <p>Los bosques son en su mayoría en las categorías roja (conservación) o amarilla (uso sin desmonte). No pueden ser desmontadas.</p>

<p>El Reglamento de Canon para Uso de las Aguas Públicas (2012) estipula una contraprestación anual por los particulares que gozan de un derecho de uso del agua. El mismo depende de la cantidad de agua utilizada, del rendimiento, del valor del arroz y del tipo de riego utilizado.</p>	<p>El CORUFA prevé un costo para la solicitud de permiso para empresas que hacen uso del agua (superficial o subterráneo) en Entre Ríos, a razón de cuatro categorías según el volumen de agua consumido. Los mismos se encuentran entre 23.800 hasta 59.500 pesos argentinos, en mayo de 2022.</p>
<p>El ICAA pide incluir una compuerta en la represa para asegurar un caudal si algún vecino aguas abajo lo demanda o si existe una emergencia. El ICAA exige la presencia de un canal de restitución asociado a la represa y a la chacra. El ICAA pide además contar con un aforador para la medición del caudal ecológico y asegurarse de su efectividad, según Fontán (2012).</p>	<p>Se desconoce si el CORUFA pide tener compuerta y/o aforador.</p>
<p>Un estudio de impacto ambiental (EIA) debe ser realizado a solicitud del ICAA para proyectos susceptibles de causar efectos relevantes en el medioambiente.</p> <p>Esto incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>"Transformaciones en el uso del suelo que impliquen eliminación de la cubierta vegetal arbustiva y/o arbórea y en todo caso cuando dichas transformaciones afecten a superficies superiores a 100 Has."</i> • <i>"Grandes presas."</i> <p style="text-align: right;">Ley N° 5067</p>	<p>Un estudio de impacto ambiental (EIA) debe ser realizado para proyectos susceptibles de causar efectos relevantes en el medioambiente.</p> <p>Esto incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>"Movimiento de suelos y preparación de terrenos para obras (Incluye drenaje, remoción de rocas, [...] movimiento de tierra p/hacer terraplenes o desmontes previos a la construcción de vías, carreteras, autopistas, ferrocarriles, etc. "</i> • <i>"Cultivos agrícolas bajo riego"</i> <p style="text-align: right;">Decreto 4977</p>
<p>El ICAA hace inspecciones puntuales en los establecimientos arroceros y demás estancias.</p>	<p>El CORUFA hace inspecciones puntuales en los establecimientos arroceros y demás estancias.</p>

7.3. Ejes del manejo

7.3.1. Manejo de las represas arroceras

Para sostener el cultivo del arroz en la región, la construcción de reservorios como fuente de agua de riego es probablemente la tecnología más adecuada, tanto a nivel económico como ambiental, ya que asegura un agua no salada y un costo operacional y energético más bajo que el agua subterránea. Sin embargo, esta práctica tampoco es inocua, claramente, ya que perturba la red hídrica superficial, por lo que debe ser gestionada de la mejor forma posible.

Normalmente, para conservar la integridad del ecosistema aguas abajo de una represa, se recomienda conservar un régimen de caudal de agua saliendo de la misma. Esta noción, llamada caudal ecológico, fue sugerida para el caso de las represas arroceras del Noreste argentino por expertos en este tema (Fontán, 2012; Carñel et al., 2014; Lell Kliphan, 2018; Currie y Montoya, 2019). Según bibliografía, el ICAA exige que los establecimientos arroceros mantengan un caudal ecológico a la salida de sus represas.

El concepto de caudal ecológico es sujeto a debate, ya que es difícil definirlo. Existen diferentes enfoques, desde un caudal mínimo constante durante todo el año, hasta regímenes de caudal más complejos que buscan reproducir las variaciones temporales naturales y/o permitir otras actividades socioeconómicas aguas abajo de la represa. Currie y Montoya hicieron una revisión de varios métodos que se utilizan para la definición del caudal ecológico en el contexto arrocero (2019).

Según Currie y Montoya (2019), el ICAA utilizó como criterio mantener un caudal que represente un 5% del volumen máximo del lago durante un cierto tiempo (30 a 100 días). A priori, este criterio parece ser apropiado, ya que podría reproducir la dinámica hidro-climática natural de la región, caracterizada por periodos secos y húmedos muy marcados. Cabe notar que la mayoría de los cursos de agua con represa arrocera de la cuenca del río Guayquiraró son de dinámica hidrológica efímera, y varios de ellos simplemente ausentes (se construyen represas sobre fondos de valle no encauzados). Ambos aspectos deben ser tomados en cuenta a la hora de definir criterios para el caudal ecológico.

La implementación de un caudal ecológico adecuado permitiría a la industria arrocera realmente afianzarse como respetuosa a nivel ambiental y así ganar la aceptación de los grupos ambientalistas y de la sociedad en general. Dicho esto, la calidad del agua saliendo de las represas debe también ser considerada a la hora de implementar un caudal ecológico.

7.3.2. Manejos fluviales

Como se discutió previamente, las crecidas en los grandes ríos y arroyos de la cuenca no solamente pueden inundar las planicies fluviales en la cuenca baja, sino también parte de su ladera adyacente. Es decir, el límite geomorfológico no es relevante para definir zonas inundables por la red hídrica, las cuales se desconocen. Se deben llevar a cabo estudios para determinar las zonas inundables, particularmente las que pueden afectar a zonas habitadas como en las cercanías de Pueblo Libertador. Conocerlas es el primer paso para una buena planificación territorial hídrica.

No son solamente los cursos de agua de la cuenca baja que presentan riesgo hídrico: los pequeños afluentes torrenciales provocan cortes de camino en época de crecida (Figura 93).

Es preciso prestar atención a estos arroyos, los cuales no reciben el interés científico y administrativo que se merecen.

En cuanto a los procesos de erosión y sedimentación de los ríos, la visión por parte de las autoridades sobre la mismas es en general negativa (ver Tabla 15). En realidad, estos fenómenos son parte del funcionamiento natural de una cuenca hidrográfica. Esto dicho, existen infraestructuras públicas, como los puentes y las rutas, que se deben proteger si estos fenómenos naturales los amenazan. La buena comprensión de las dinámicas de migración lateral y del funcionamiento geomorfológico fluvial en general son fundamentales para prevenir futuras rupturas de infraestructuras, realizar obras ingenieriles durables y, en definitiva, asegurar la conexión vial para los habitantes y productores de la zona, todo ello a tono con la funcionalidad natural del sistema.

Por ejemplo, los meandros de los arroyos Barrancas y Sarandí aguas arriba de los puentes que conectan Pueblo Libertador con Sauce amenazan el conectarse próximamente. En 2024 estaban separados por una franja de terreno de solamente unos 25 m de distancia uno de otro (Figura 96). Cuando se conecten, las condiciones geomorfológicas e hidráulicas para estos puentes cambiarán drásticamente, incrementándose el flujo del brazo sur del puente (o Barrancas), ya que en el brazo norte disminuirán los aportes del Sarandí. Este cambio seguramente será perjudicial para el puente del brazo sur, que tenderá a ensancharse y/o a meandrificar. Hay diversas alternativas de solución aplicando métodos de geomorfología ingenieril e ingeniería fluvial que podrían adoptarse para prevenir consecuencias indeseables producto del avance del fenómeno descrito (Schumm y Harvey, 2008).



Figura 96. La conexión entre los arroyos Sarandí y Barrancas se hará en los próximos años. Fuente: Google Earth.

Otro aspecto crucial para la durabilidad de las infraestructuras fluviales es entender la dinámica de incisión afectando la red hídrica. Esta se caracteriza por la erosión del lecho del arroyo y de ambos taludes, que llevan a su profundización y ensanchamiento en cauces de distinta jerarquía. En el caso del arroyo San Victor, cerca del pueblo del mismo nombre, este fenómeno compromete seriamente el puente de un camino rural (Figura 96). Existen diversos métodos para estabilizar el cauce o para adaptar el diseño de la obra en base a estimaciones de ancho y profundidad que podrían ser alcanzados (Johnson, 2006; Schumm y Harvey, 2008).



Figura 97. La estabilidad de este puente cruzando el arroyo San Victor está comprometida por la erosión afectándolo.

Actualmente, el paradigma de gestión estatal del agua es el apoyo a la producción agropecuaria. La obra ingenieril en el arroyo Barrancas es un ejemplo concreto de ello (Figura 98). En una primera aproximación, esta obra no es acorde al tipo de intervenciones que se hacen en las prácticas de ingeniería fluvial actuales a nivel internacional, en las que se promueve una mínima desnaturalización del funcionamiento natural de un río. Específicamente, la obra conlleva al aumento de la velocidad del agua, a la concentración de los picos de crecida, a la precarización de las márgenes del arroyo y a cambios en las condiciones hidro-sedimentarias debido a la modificación sustancial de anchos y profundidades medias. En ese sentido, y considerando conceptos actualmente bien establecidos en la literatura fluvial, como son los de las respuestas compleja, no-lineal y espacio/tiempo-dependiente de los sistemas fluviales (Schumm, 2007; Biedenharn et al., 2008), las modificaciones realizadas conducen a niveles de incertidumbre altos en cuanto a impacto ambiental y a eficiencia a futuro.

Por supuesto, la voluntad de reducir el tiempo de permanencia del agua en los campos de la DSB y así los impactos negativos de las inundaciones de la zona es legítima, así como el de obtener el mismo efecto para los habitantes ribereños de Pueblo Libertador y otros parajes. Sin embargo, ello debe hacerse con una perspectiva integral de la cuenca hidrográfica. Las

intervenciones de corrección fluvial de esta envergadura deben ser sustentadas en enfoques modernos de la ingeniería fluvial (Schumm y Harvey, 2008) y ser evaluadas desde una mirada integral. En este sentido, esta obra podría ser un ejemplo de gestión inadecuada, habida cuenta la magnitud de cambios introducidos y los niveles de incertidumbre que, como respuesta, conllevan.



Figura 98. Realización de la obra ingenieril sobre el arroyo Barrancas en 2018.

Además de la obra sobre el arroyo Barrancas, la forma de manejar el excedente de agua en la DSB ha sido a través de la construcción de canalizaciones y terraplenes (Figura 65). Aunque se supone que el Estado debe evaluar y autorizar las mismas, nada indica que lo haga. Además de otorgar o no autorización, el Estado provincial debería coordinar un espacio de planificación de ellas, y asegurarse que no impliquen un aumento de la presión hídrica aguas abajo. Para asegurarlo, se debe invertir en la investigación sobre la DSB y planificar la gestión hídrica de este espacio, lo cual implica caracterizar los abanicos aluviales y avanzar en el conocimiento general. Las autoridades de gestión deben también estar presentes y fiscalizar a los que hacen terraplenes y canalizaciones ilegales.

El espacio que se busca aliviar de los excesos hídricos son los abanicos aluviales y las planicies fluviales antiguas. Estos sistemas complejos tienen características propias de sistemas hídricos no típicos, una denominación utilizada en hidrología argentina para identificar buena parte de sus cuencas de llanura: relieve escaso, inexistencia de red de avenamiento, cuencas con límites dinámicos, etc.

A esta complejidad se suma la gran variabilidad climática característica de la región, con años muy secos y otros muy lluviosos, lo mismo agravado por el cambio climático. En este contexto, se debe implementar prácticas de manejo resilientes e inteligentes. Después de episodios de inundaciones catastróficas durante los años 90, las autoridades de gestión en los Países Bajos han llevado a cabo métodos de manejo del agua distintos a aquellas hasta ahora dominantes, es decir canalizaciones y el confinamiento de los ríos entre diques. El programa *Room for the River* (Espacio para el río) propone métodos innovadores para la reducción de las inundaciones, entre ellos excavación de planicie de inundación, relocalización de terraplenes y definición de áreas destinadas al almacenamiento de agua (Rijke et al., 2012).

7.3.3. Ordenamiento territorial y fomento de la conservación

Incluyendo los humedales y los blanquizales, se deforestaron (o inundaron para crear las represas arroceras) aproximadamente 350 km² desde 1987 en la cuenca del río Guayquiraró. A pesar de las leyes provinciales y nacionales sobre los bosques, pudimos comprobar a través de los relatos de los habitantes locales y de nuestras propias observaciones que el desmonte sigue en Entre Ríos, aun cuando los bosques estén dentro de la categoría amarilla o roja para preservarlos. Es necesario que las autoridades dejen de tolerar estas prácticas y fiscalicen a los productores que desmontan ilegalmente.

En la región existe turismo para la caza y la pesca, lo cual podría tener más importancia si tuviera ayuda por parte de los gobiernos o del sector privado. Sin embargo, debe ser acompañado de controles para que no se cacen especies en peligro de extinción.

La conservación puede pasar también por la puesta en valor del patrimonio geológico. El Área Natural Protegida Don Sebastián, por ejemplo, cuenta con una geodiversidad alta¹⁷: tres cauces de jerarquía distinta sobre un pequeño territorio (el arroyo Colorado, el arroyo Mulas, el río Guayquiraró). El río Guayquiraró y el arroyo Mulas cuentan con altas barrancas debido al encajamiento de los cauces. El área protegida incluye además una superficie considerable de blanquizal, un ecosistema singular y pintoresco (Figura 99).

¹⁷ <https://www.unesco.org/es/days/geodiversity>



Figura 99. Blanquizal en el Area Natural Protegida Don Sebastián. Foto cortesía de Luis Prevedel, ANP Don Sebastián.

7.4. Propuestas de manejo

Propuestas a corto plazo:

- Verificar si los puentes sobre la ruta 126 entre Pueblo Libertador y Sauce podrán soportar los cambios hidráulicos que les será efectivo a partir de la conexión eminente entre los arroyos Sarandí y Barrancas, ca. 1 km aguas arriba de ellos. En el caso negativo, tomar las medidas necesarias para proteger los puentes o cambiarlos, o implementar estudios y obras de corrección de cauce que amortigüen la naturaleza de la conjunción de cauces;
- Aumentar rápidamente los controles por parte de los estados provinciales en cuanto a los desmontes ilegales para hacer respetar las leyes de bosques, particularmente en Entre Ríos;
- Por parte de CORUFA e ICAA, exigir el registro del caudal de salida de las represas arroceras (por compuerta y vertederos laterales) y del canal de restitución de los campos, y además el nivel hidrométrico de los embalses por parte de las empresas arroceras y la entrega periódica de estos datos;

Propuesta a mediano plazo:

- Evaluar desde una perspectiva ecológica, hidrológica, hidráulica y económica las obras ingenieriles hechas en los arroyos Barrancas y Saturno para ver el progreso de

la respuesta fluvial natural y contrastar su respuesta en cuanto a su eficiencia e impacto ambiental originalmente esperados con ellas. Adoptar medidas de corrección de estas en caso de ser necesarias.

- Cartografiar las zonas inundables de los cauces de la cuenca;
- Llevar a cabo una investigación sobre el caudal ecológico adecuado en la región. El mismo deberá tener en cuenta tanto los aspectos ecológicos (suporte de la biodiversidad) como los hidrogeomorfológicos (mantenimiento de un régimen de caudales compatible con la morfología del arroyo) y los socioproductivos (uso del agua aguas abajo de las represas e impactos a escala de cuenca). La revisión de los métodos para definir el caudal ecológico por Currie y Montoya (2019) es un buen punto de partida;
- Releva el estado de los puentes y caminos de la cuenca y el nivel de riesgo hídrico que los afecta. La concepción de los puentes debe contemplar no solamente las crecidas de diseño, sino también los aspectos hidrogeomorfológicos, como son la erosión y la sedimentación;
- A partir de un espacio de coordinación de distintas experticias y sectores y de estudios previos, hacer un plan de gestión hídrica en la DSB, que incluya zonas donde se habiliten y deshabiliten canalizaciones de drenaje y terraplenes. Se deben fomentar intercambios en Argentina en lo relativo a los sistemas hídricos no típicos. En base a este plan, lanzar una moratoria para que se puedan conformar los propietarios de terraplenes y canalizaciones ilegales. Después, aumentar los controles por parte de las autoridades en cuanto a los terraplenes y canalizaciones ilegales, particularmente en Corrientes;

Propuesta a largo plazo:

- Instalar estaciones hidrométricas sobre los arroyos Barrancas (superior), Ávalos y Sarandí, además de un arroyo de orden intermedio de la cuenca del río Guayquiraró.
- A partir de estas estaciones hidrométricas y de los mapas de zonas inundables, desarrollar un sistema de alerta de inundaciones.
- Desarrollar planes de acción para los pequeños productores para la salvaguarda de sus animales antes inundaciones, por ejemplo, sistemas de comunicaciones y convenios con propietarios de lugares topográficamente más altos donde se los pueda llevar temporalmente.
- Seguir la evolución de las represas arroceras a escala de cuenca a través de estudios hidrológicos y en base a los datos de caudal de salida de las represas.

Capítulo 8. Conclusiones

Finalizado el estudio y análisis, se puede concluir respecto de los objetivos:

1) Determinar las influencias de las prácticas agropecuarias recientes sobre el régimen hidrológico y el régimen de erosión y sedimentación fluvial.

- a) En cuanto a las influencias sobre el régimen hidrológico, **los efectos a escala de cuenca son leves**. Las PAR provocan la reducción de la evapotranspiración y el aumento del escurrimiento superficial y de la infiltración en la cuenca del río Guayquiraró superior en un orden menor al 10%, y **leves aumentos en sus picos de crecida**. Los mismos se ven atenuados por las represas arroceras, aunque, como siempre las represas están acompañadas de la expansión de la superficie agrícola, el efecto real de estos sistemas aún no está esclarecido.

Los efectos a escala de subcuenca (tributario de orden 2-4) **son mayores**. Según el modelo hidrológico de cuenca, la expansión de la agricultura en las últimas décadas ha aumentado de forma significativa los picos de crecida.

Además, **una represa arrocera puede reducir significativamente el caudal de estiaje** en la subcuenca donde se instala, lo cual hemos constatado *in situ* en la naciente del río Guayquiraró, unos 5 km aguas abajo de una represa.

- b) En cuanto al régimen de erosión y sedimentación fluvial, constatamos **la incisión en el río Guayquiraró superior y una buena parte de la red hídrica del RVCE**. Podría estar fomentado por las PAR, fundamentalmente por el avance de la agricultura, aunque **su origen debe ser anterior**. Las causas se deben buscar en la deforestación asociada a la expansión de la ganadería extensiva en la región a partir del siglo XVII (o incluso antes) y fenómenos naturales como el levantamiento tectónico regional.

2) Evaluar cambios geomorfológicos recientes en cauces de la cuenca y justipreciar su relación con las prácticas agropecuarias recientes.

Constatamos la **aceleración de la migración lateral** en el río Guayquiraró y el arroyo **Barrancas** en los últimos años. Aunque las pruebas no son concluyentes, las PAR podrían tener el efecto de aumentar la velocidad del desplazamiento de estos cauces, ya sea a través del **aumento en el escurrimiento en la cuenca** (río Guayquiraró) o

Conclusiones

por **obras ingenieriles** (arroyo Barrancas). Las obras de 2017-2018 sobre el arroyo Barrancas también inciden fuertemente sobre su funcionamiento hidrogeomorfológico, en cuanto desnaturalizan su morfología e impactan a nivel hidráulico al concentrar escurrimientos y aumentar sus velocidades, y ecológico al impedir la vinculación cauce-planicie de inundación más los efectos biogeoquímicos asociados.

- 3) Comparar estrategias de gestión de las prácticas agropecuarias por parte de Corrientes y de Entre Ríos y proponer mejoras que contribuyan a la sustentabilidad de la cuenca.

La **falta de información** complica las posibilidades que tiene el Estado para llevar a cabo buenas estrategias de manejo (p.ej., el alcance de las zonas inundables). A ello se suman **prácticas de manejo inadecuadas**, como la obra ingenieril en el arroyo Barrancas, sumando incertidumbres sobre el funcionamiento del sistema fluvial actual.

Se hicieron **12 propuestas de manejo** con las que se puede encarar MICH en la cuenca del río Guayquiraró, y con orden de prioridad y de planificación propuesto (corto, medio y largo plazo).

Además, se obtuvieron las siguientes conclusiones complementarias a partir del nuevo volumen de información generada:

- 4) La cuenca del río Guayquiraró, debido a su evolución geológica, se encuentra conformada por dos regiones fisiográficas muy contrastantes: el relieve de valles correntino-entrerrianos (RVCE) y el mega abanico aluvial del río Paraná en los Esteros del Iberá y del Ñemmbucú (MAAP). Esta dupla fisiográfica tan diferente entre sí complejiza el análisis de la cuenca como una unidad singular. Entre otros aspectos, inhabilita la subdivisión clásica entre cuenca alta, cuenca media y cuenca baja.
- 5) Se definieron 6 unidades geomorfológicas en la cuenca: los valles fluviales, las divisoras planas, la planicie multilagunar, las planicies de inundación fluvial, los abanicos aluviales, y las planicies fluviales antiguas. Desde un punto de vista de la gestión, las tres últimas merecen más atención, al ser espacios donde ocurrieron inundaciones y/o se intervino fuertemente sobre el paisaje fluvial en los últimos años.
- 6) Se definieron precisamente los límites de la cuenca del río Guayquiraró y de 5 sistemas hidrográficos (SH) subordinados. La red hídrica fue mejorada respecto de la oficial del IGN, al delinearse a mano en vez de con una herramienta geomática automatizada, para

Conclusiones

evitar incluir en la misma tributarios inexistentes; esto se debe a la naturaleza hidrogeomorfológica de la cuenca, precisamente que está compuesta por varios valles que carecen de cauce.

- 7) El río Guayquiraró y sus tributarios de orden bajo e intermedio no se comportan como típicos cauces de llanura, ya que la respuesta de su caudal ante precipitaciones es rápida. El Guayquiraró tarda entre 2 y 4 días para alcanzar el pico de avenida.
- 8) Se aproxima el caudal módulo de la cuenca a 80 m³/s. El caudal máximo desde 1980 fue por lo menos de 1820 m³/s, el 18 de abril 1986, aunque la crecida de 2016 seguramente fue mayor; sin embargo, no existen datos al respecto. En crecida, el arroyo Barrancas es aproximadamente 3 veces más caudaloso que el río Guayquiraró, a la altura de Pueblo Libertador.
- 9) La visión de la región del sur de Corrientes y del norte de Entre Ríos como territorios inaptos a la producción agrícola e inevitablemente dedicado a la producción ganadera, heredada de la época colonial, ya no corresponde con la realidad socioeconómica actual. Factores mercantiles y fisiográficos han permitido y siguen permitiendo la expansión de la agricultura en Entre Ríos y Corrientes. Con la constante alza por la demanda mundial de alimentos, todo indica que esta presión seguirá incrementándose en las próximas décadas.
- 10) Entre 1987 y 2019, la superficie de la cuenca dedicada a la agricultura triplicó (un aumento neto de 40 000 ha). La expansión ha sido a expensas principalmente de sabanas y de pastizales. La superficie de humedales perdida por nuevos proyectos agrícolas es menor (aproximadamente 8000 ha).

Las tierras agrícolas siguen siendo poco en proporción a la superficie total de la cuenca, es decir aproximadamente 7% de ella. El aumento fue concentrado en el sur; las cuencas de los arroyos Barrancas, Ávalos y Sarandí han tenido muy pocos cambios territoriales desde 1987.

- 11) Entre 1993 y 2013, se construyeron 19 represas arroceras para riego, de los cuales seguían activos 16 en 2019. En conjunto, retenían aproximadamente 45 Mm³ de agua en 2019, estando llenos o casi llenos.
- 12) Constatamos las rupturas de tres infraestructuras en años recientes. Al menos una (el puente de la ruta 126 entre Sauce y Pueblo Libertador en 2015) se debe al desplazamiento

Conclusiones

del cauce. Estas experiencias muestran que se debe tomar en cuenta en la región los aspectos geomorfológicos en el diseño de los puentes, es decir la migración lateral de los cauces, la acumulación transitoria de sedimento asociada a ellos y la incisión fluvial.

- 13) Muchos aspectos hidrológicos y geomorfológicos del territorio de la depresión del Sarandí-Barrancas (DSB) nunca fueron estudiados y quedan como interrogantes. Entre ellos, mencionemos la conexión (o desconexión) hídrica entre el arroyo Ávalos y lo demás de la cuenca del río Guayquiraró, los trasvases entre cuencas y la presencia de cuerpos de agua nombrados como arroyos pero que más bien poseen una dinámica de laguna (segmento superior del Arroyo Sarandí).

Agradecimientos

Ante todo, gracias a mis directores de tesis, Carlos G. Ramonell y Pablo Spalletti, por la confianza y por el acompañamiento.

Gracias a toda la gente que tomó de su tiempo para ayudarme en este proyecto sin esperar nada a cambio: Zuleica Marchetti, Roberto Lell Kliphan, Verónica Alejandra Blanco, Rafael Sebastián Moreno, Dante Bedendo, Daniela García, Edna Espinosa Gómez, Vanesa Ali Santoro, José Luis Fontana, Manuel del Rey Rodriguez, Manuel Gallegos, Matias Postai, Pía Fernández, y muchos más.

Gracias especialmente a Patricia Kandus por la ayuda a la hora de llevar a cabo la (complicada) clasificación de imágenes satelitales.

Gracias a la empresa Pro INSA por dejarme utilizar sus fotos aéreas.

Gracias a Juan Rosas, quién abrió la puerta de la estancia arrocera que pudimos visitar en dos ocasiones. Nos acompañó y respondió a todas mis dudas, y junto al personal, nos hicieron llegar donde necesitábamos llegar.

Gracias a Luís Prevedel para invitarnos a su reserva, la ANP Don Sebastián, para permitir llevar a cabo esta investigación, y además para compartir unas comidas y unas buenas charlas.

Gracias a todos mis compañeros de la maestría, quienes me hicieron instantáneamente sentir parte del grupo cuando arrancamos la clase en agosto 2019, a solamente 3 días de mí llegada a la Argentina.

Gracias a mí compañera de vida, Valentina Bulgarella, por siempre apoyarme en este proyecto. Gracias a vos conocí a Argentina, un país que me enseñó mucho y con el cual también me enamoré, especialmente de su región litoraleña.

Finalmente, un gracias caluroso a todos los habitantes de la cuenca del río Guayquiraró con quien charlamos y quienes nos acompañaron hacia los ríos y arroyos. A fin de cuentas, son ellos quienes se ven afectados por las cuestiones abordadas en esta tesis, por lo cual se los dedico.

Bibliografía

- Agropuerto. (2007). *Plan estratégico del sector arrocerero. 2008-2012*.
https://proarroz.com.ar/static/trabajos/plan-estrategico-del-sector-arrocero-argentino-2008-2012_6.pdf
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 413-430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- Abbaspour, K. C. (2013). *Swat-cup 2012. SWAT calibration and uncertainty program—A user manual*.
- Abelleyra D, Veron S, Banchemo S, Mosciaro J, Franzoni A, Boasso M, Valiente S, Puig O, Goytia S, Iturralde Elortegui M, Maidana D, Martini J, Murray F, Marini F, Propato T, Ferraina A, Gómez Taffarel C, Sarraihle S, Petek M, Messa J, Kurtz D, Perucca R, Benedetti P, Muñoz S, Volante J. (2020). Mapa Nacional de Cultivos campaña 2019/2020. Colección 1. Versión 1.0. Informe. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina.
- Aceñolaza, F. G. (2007). *Geología y recursos geológicos de la Mesopotamia Argentina*. Instituto Superior de Correlación Geológica. <http://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/scg-22-0-00.pdf>
- Agropuerto. (2007). *Plan estratégico del sector arrocerero. 2008-2012*.
https://proarroz.com.ar/static/trabajos/plan-estrategico-del-sector-arrocero-argentino-2008-2012_6.pdf
- Alarcón, M. F., & Insaurralde, J. A. (2011). Recursos hídricos y aprovechamiento de la cuenca del río Miriñay, provincia de Corrientes, Argentina.
- Armando Alberto Tasi, H. (2009). *Aplicación de las Cartas de Suelos de Entre Ríos, Argentina, para evaluar Índices de Productividad Específicos para los principales Cultivos Agrícolas*. Tesis de Doctorado. Universidad de Coruña.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2013). *SWAT 2012 input/output documentation*. Texas Water Resources Institute.
- Ashmore, P. (2015). Towards a sociogeomorphology of rivers. *Geomorphology*, 251, 149-156.
- Baéz, S., Ludmila, C., & Gauna, S. (2015). TRANSFORMACIONES Y CONFLICTOS TERRITORIALES A PARTIR DEL AVANCE DE LA PRODUCCION DE ARROZ EN LA PROVINCIA DE CORRIENTES (ARGENTINA). EL CASO DEL DEPARTAMENTO MERCEDES, 1995-2011. XVII JORNADAS DE GEOGRAFÍA DE LA UNLP, Ensenada, Buenos Aires.
- Beatriz Bosch. (1954). Los tajamares de Entre Ríos (Argentina). *Revista Geográfica*, T. 15, 41, 67-80.
- Bebendo, D., Schulz, G., Pausich, G. (2014). Carta de suelos de Entre Ríos 1:100 000. Convenio Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Gobierno de Entre Ríos. Recuperado de <http://www.geointa.inta.gob.ar/page/3/>. Fecha de descarga el 17 de febrero 2021.
- Benzaquen, L., D.E. Blanco, R. Bo, P. Kandus, G. Lingua, P. Minotti y R. Quintana. (editores). 2017. *Regiones de Humedales de la Argentina*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Fundación Humedales/Wetlands International, Universidad Nacional de San Martín y Universidad de Buenos Aires.
- Biedenharn, D.S., Watson C.C., Thorne, C.R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. En García, M. (Ed.). *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice*. American Society of Civil Engineers.
- Bó, R. y Quintana, R. (2017). Subregión ríos, esteros, bañados y lagunas del río Paraná. G.I.E.H. ; UNSAM 3iA, Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental ; Wetlands International ; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Presidencia de la Nación.
- Bogado, G. N. (s. f.). *Obras Hidráulicas para el Riego de Cultivo de Arroz en la Provincia de Corrientes— Argentina*. 16.
- Brandt, S. A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *CATENA*, 40(4), 375-401. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00093-X)
- Brumatti, C.M.P, Duarte, O.C. y Lenzi, L.M. (2007). Evaluación agrohidrológica de represas para riego. Primera aproximación en Díaz, E.L., Duarte, O.C., Zamanillo, E.A. y Lenzi, L.M. (2007). *Evaluación agrohidrológica de represas para riego: su estudio en Entre Ríos*. EDUNER.

Bibliografía

- Bruniard, Enrique D. (1966). Bases Fisiográficas para una División Regional de la Provincia de Corrientes. *Revista Nordeste* N° 8. Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Nordeste.
- Burkart R., Bárbaro N., Sánchez R. y Gómez D. (1999). *Eco-regiones de la Argentina. Administración de Parques Nacionales. Secretaria de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable*. Presidencia de la Nación.
- Bustos, M. L., Ferrelli, F., & Piccolo, M. C. (2018). Comparative Study of Three Climatic Models Applied to Argentina. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 40(1), 34-43. https://doi.org/10.11137/2017_1_34_43
- Calvi, M. (2009). *Análisis y evaluación de estrategias tecnológicas y productivas de los sistemas de producción ganaderos predominantes en el Centrosur de Corrientes*. Tesis Magister en Agroeconomía. Unidad Integrada Balcarce, Universidad Nacional de Mar del Plata – INTA, Balcarce, Argentina.
- Cangiani, S.N. (2002). Sistema de trasvasamiento de cuencas con alternativas hídricas multipropósito. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional del Nordeste.
- Carñel, G.R., Boschetti, G.N y Quintero, C.E. (2014). *Manual de buenas prácticas agrícolas en el cultivo de arroz para la provincia de Entre Ríos*. Fundación Proarroz.
- Carnevali, R. (1994). *Fitogeografía de la provincia de Corrientes*. Gobierno de la provincia de Corrientes- INTA. 324 pp.
- Casermeyro, J. R. (2007). Bosques nativos: pasado, presente, y futuro en Díaz, E.L., Duarte, O.C., Zamanillo, E.A. y Lenzi, L.M. (2007). *Evaluación agrohidrológica de represas para riego: su estudio en Entre Ríos*. EDUNER.
- Charlton, R. (2007). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge.
- Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Co.
- Christopherson, RW (2017) *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*. 10 ed. Prentice Hall Inc.
- Chuvieco, E. (1991). Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, 52(203), 371.
- Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata. (2016). *Inventario de regiones de humedales de la cuenca del Plata* [Versión Preliminar. <http://cicplata.org/wp-content/uploads/2016/12/inventario-de-regiones-de-humedales-de-la-cuenca-del-plata.pdf>. Descargado el 18 de febrero 2021.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. CRC press.
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Conte, A. S., Etchepareborda, M., Marino, M. y Róvere, F. V. (2010). Oleaginización de la agricultura argentina. V Jornadas Interdisciplinarias de Estudios. Facultad de Ciencias Económicas. Universidad nacional de Buenos Aires.
- Contreras, F.I., Contreras, S.A., Méndez, C.R., Baruzzo, M.N., Ojeda, E.A., Kovalsky, I.E. (2018). El paisaje de lomadas arenosas desde el Pleistoceno superior a la actualidad. *Boletín geográfico*, 40(1), 30-50.
- Crutzen, P. J. (2006). The “anthropocene” en Ehlers, E., Krafft, T. (eds). *Earth system science in the anthropocene* (pp. 13-18). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Cruzate, G., Gomez, L., Pizarro, M.J., Mercuri, P. y Banchero S. (1990). *Atlas de suelos de la República Argentina*. Versión digitalizada 9,0. Proyecto PNUD ARG/85/019. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Cruzate, G. y Panigatti, J. L. (2008). *Suelos y ambientes de Corrientes*. <http://www.geointa.inta.gob.ar>
- Currie, H. M., & Ruberto, A. R. (2003). Calculo hidrológico de un embalse con fines de riego en la provincia de Corrientes. *Agrotecnia*, 11.

Bibliografía

- Currie, H.M. y Reggi, L.A. (2015). El ciclo del Agua y sus Colores en la Rotación Arroz – Pacú. ISBN 978-987 – 24407 – 4 – 0. 466 p. XXV CONGRESO NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA 2015), 15 al 18 de junio de 2015. PARANA, ENTRE RÍOS, Argentina.
- Currie, H.M. y Reggi, L.A. Meichtry, M.A. (2015). Balance Hídrico y Energético en la Rotación Arroz-Pacú en el Chaco Húmedo Argentino. ISBN 978-987 – 24407 – 4 – 0. 466 p. XXV CONGRESO NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA 2015), 15 al 18 de junio de 2015. PARANA, ENTRE RÍOS, Argentina.
- Currie, H.M. y Montoya, N.A. (2019). Manual de riego para el cultivo de arroz en Latinoamérica.
- Dell'Orto, A. M. H. F. de. (1995). Articulación y Tendencias del Proceso de Ocupación del Espacio en el Nordeste Argentino. *Revista Geográfica*, 122, 149-168.
- Díaz, E., Romero, E.C., Boschetti, N.G. y O. Duarte. (2009). Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo Feliciano, Entre Ríos, Argentina. *Boletín Geológico y Minero* 120 (4), 533-542.
- Dirección Nacional de Agricultura - Dirección de Estimaciones Agrícolas. (2021). *Estimaciones agrícolas*. <http://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>
- Domínguez, J., Innocenti González, J., & Pagliettini, L. (2016). Análisis económico de la producción de arroz orgánico en Entre Ríos y Corrientes, Argentina. Comparación con respecto a la producción convencional. *Revista de la Facultad de Agronomía UBA*, 36(1).
- Domínguez, J., Pagliettini, L., Stortini, M., & Robles, D. (2010). Cambios en la estructura agraria del departamento de Mercedes, provincia de Corrientes (Argentina), al difundirse el arroz en la zona. Análisis de la Subcuenca del Arroyo Ayuí. *Ambiente y Desarrollo*, 14(26), Article 26.
- Duarte, O. C. y Díaz, E. (2007). Historia del arroz y las represas en Entre Ríos en Díaz, E.L., Duarte, O.C., Zamanillo, E.A. y Lenzi, L.M. (2007). *Evaluación agrohidrológica de represas para riego: su estudio en Entre Ríos*. EDUNER.
- Eclesia, R. P., Duarte, O.C., Romero, E. C., y Sione, S.M.J. (2007). Consideraciones básicas para la evaluación de impacto ambiental de presas de riego en Entre Ríos en Díaz, E.L., Duarte, O.C., Zamanillo, E.A. y Lenzi, L.M. (2007). *Evaluación agrohidrológica de represas para riego: su estudio en Entre Ríos*. EDUNER.
- Ejército Argentino - Instituto Geográfico Militar. (1944). Carta topográfica de la República Argentina. Arroyo Barrancas. Hoja 2960-36. Escala 1:100 000 en Neiff, J.J. (Ed.). *Humedales de Iberoamérica*. CYTED, Subprograma XVII – Red
- Escobar, E. H., Weber, J. F., & Baigorri Ocampo, S. (2019). Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina). *Aqua-LAC*, 11(1), 34–54. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-1-03>
- Escobar, E. H., Ligier, H. D., Melgar, R., Matteio, H., Vallejos, O. (1996). Mapa de suelos de la provincia de Corrientes 1 : 500 000. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Corrientes, Recursos Naturales.
- Everard, M., & Quinn, N. (2015). Realizing the value of fluvial geomorphology. *International Journal of River Basin Management*, 13(4), 487-500. <https://doi.org/10.1080/15715124.2015.1048457>
- Falcón, F. N., Currie, H. M., & Michellod, M. (2014). Evaluación de la eventual presencia de agroquímicos en distintos sustratos en una arrocería del Chaco Húmedo. *Agrotecnia*, (22), 30-34.
- Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Fencl, J. S., Mather, M. E., Costigan, K. H., & Daniels, M. D. (2015). How Big of an Effect Do Small Dams Have? Using Geomorphological Footprints to Quantify Spatial Impact of Low-Head Dams and Identify Patterns of Across-Dam Variation. *PLOS ONE*, 22.
- Fontán, R.F. (2012). *Represas para riego en Curuzu Cuatia y Sauce*. - 1a ed. - Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones, 193 p. ISBN 978-987-510-187-6 1. Infraestructura. 2. Represas. I. Acosta, Gloria Alejandra, colab. II. Rolón, Juan Carlos, colab.
- Frábega, T. C.-A. (1991). Principios de ecología cultural en la configuración de un territorio de frontera: La Mesopotamia argentina en el siglo XVII. *Estudios Ibero-Americanos*, 17(2), Article 2.

Bibliografía

- Fu, B., Merritt, W. S., Croke, B. F. W., Weber, T. R., & Jakeman, A. J. (2019). A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects. *Environmental Modelling & Software*, 114, 75-97. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.008>
- Gaitán, J., Navarro, M. F., Vuegen, L. T., Pizarro, M. J., y Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. INTA Ediciones.
- Garg, V., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., y Srivastav, S. K. (2019). Human-induced land use land cover change and its impact on hydrology. *HydroResearch*, 1, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.06.001>
- Gaspari F.J., Senisterra G.E., Delgado M.I., Rodríguez Vagaría A.M. y S.I.Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Editorial Autores.
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado, M. I., y Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Universidad Nacional de La Plata. ISBN 978-950-34-0963-3.
- Giraut, M. A., Rujana, M. R., y Valladares, A. I. (2009). El rol de los humedales en el contexto evolutivo de la red hídrica de la provincia de Corrientes, República Argentina. *Aqua-LAC*, 2(1), 8.
- Gijsman, A. J., Thornton, P.K., y Hoogenboom, G. (2007). Using the WISE database to parameterize soil inputs for crop simulation models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 56(2), 85-100.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. Gordon, L. J., Peterson, G.D., y Bennett, E. M. (2008). Agricultural modifications of hydrological flows create ecological surprises. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(4), 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.11.011>
- Guevara-Ochoa, C., Masson, I., Cazenave, G., Vives, L., y Amábilé Vázquez, G. (2019). A Novel Approach for the Integral Management of Water Extremes in Plain Areas. *Hydrology*, 6(3), 70. <https://doi.org/10.3390/hydrology6030070>
- Guevara-Ochoa, C., Medina-Sierra, A., y Vives, L. (2020). Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains. *Science of The Total Environment*, 722, 137886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137886>
- Gutierrez, M. (2012). *Geomorphology*. CRC Press.
- Gregorio, A D., y Jansen, L.J.M. (1998). *A new concept for a land cover classification system*. 10.
- Gvozdenovich, J., Pioto, C. y Paparotti, O. (2015). Variación del rendimiento del cultivo de soja debido a la erosión hídrica en Entre Ríos. *INTA EEA Paraná Serie Extensión Digital-Actualización Técnica Soja*, 45-49.
- Haas, H., Reaver, N G.F., Karki, R., Kalin, L., Srivastava, P., Kaplan, D.A., y Gonzalez-Benecke, C. (2022a). Improving the representation of forests in hydrological models. *Science of The Total Environment*, 812, 151425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151425>
- Haas, H., Kalin, L., y Srivastava, P. (2022b). Improved forest dynamics leads to better hydrological predictions in watershed modeling. *Science of The Total Environment*, 821, 153180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153180>
- Hämmerly, R.D.C., París, M. y Paz González, A. (2019). Determinación de campos areales de precipitación y evapotranspiración en la margen izquierda de la cuenca del Paraná en territorio de Argentina. I: polígonos de Thiessen y kriging. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe: Revista de xeoloxía galega e do hercínico peninsular*, 41, 75-98.
- Havrylenko, S.B., Bodoque, J M., Srinivasan, R., Zucarelli, G.V. yMercuri, P. (2016). Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. *CATENA*, 137, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.001>
- Feler, M. V., Vazquez-Amabile, G., van Meer, H., Gaspari, F.J., Mercuri, P. A., Prieto, D. y Flamenco, E. (2014). *Validación del modelo SWAT en la cuenca del río Quequén Grande y evaluación de potenciales cambios a nivel de cuenca*. II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Santa Fe, Argentina.
- Herber, L.G., Kruger, R.D. y Fontana, M.L. (2017). *El cultivo de arroz en Corrientes... Una producción con historia. Proyecto PROARROZ, Campaña 2016/2017. Volumen XXV*. Ediciones INTA.

Bibliografía

- Herbst, R., Jorge, N. y Cruz, S. (1985). *Mapa litoestratigráfico de la provincia de Corrientes (Vol. 2)*. Inst. de Geología y Paleontología Iberoamericana de Humedales.
- Herbst, R. y Santa Cruz, J.N., 1995. *Mapa geológico de la Provincia de Corrientes*. Secretaría de Minería, Dirección Nacional del Servicio Geológico.
- Im, S., Park, S., & Jang, T. (2007). Application of SCS curve number method for irrigated paddy field. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 11, 51-56.
- INDEC Argentina (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda 2010*. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-CensoNacional-999-999-Censo-2010>
- Instituto Correntino del Agua y del Ambiente. (2016). *Acondicionamiento del Cauce del Arroyo Barrancas desde su Desembocadura en el Río Guayquiraró a Estancia La Cecilia*. <https://icaa.gov.ar/Documentos/Ingenieria/> el 24 de febrero 2022.
- Instituto Geográfico Nacional. (2020) *Capas SIG*. <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- Instituto Nacional Tecnológico Agropecuario y la Asociación Correntina de Plantadores de Arroz. (2008). *Guía de Buenas prácticas agrícolas (BPA) para el cultivo de arroz en Corrientes*. ISSN 1852-0928.
- INTA (2022). *Sistema de información y gestión agrometeorológica*. <http://siga.inta.gov.ar/#/data>
- Irigoyen, M. (2007). Proyectos de represas destinadas al riego de arroz. Aspectos metodológicos en Díaz, E.L., Duarte, O.C., Zamanillo, E.A. y Lenzi, L.M. (2007). *Evaluación agrohidrológica de represas para riego: su estudio en Entre Ríos*. EDUNER.
- Iriondo, M. H. (1980). El Cuaternario de Entre Ríos. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, 1(11), 125-141. <https://doi.org/10.14409/natura.v1i11.3375>
- Iriondo, M. H., Tardivo, R. N., y Ceruti, C. N. (1985). Geomorfología y Cuaternario del Tramo Inferior del Arroyo Feliciano. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral* 2(16), 149-156. <https://doi.org/10.14409/natura.v2i16.3466>
- Iriondo, M. H. y Kröhling, D. (2022). *Cambios ambientales en la cuenca del río Uruguay : desde dos millones de años hasta el presente*. Ediciones UNL.
- Iturburu, J.R. (2007). Represas de riego en el norte entrerriano en Díaz, E.L., Duarte, O.C., Zamanillo, E.A. y Lenzi, L.M. (2007). *Evaluación agrohidrológica de represas para riego: su estudio en Entre Ríos*. EDUNER.
- Johnson, P. A. (2006). Assessing stream channel stability at bridges in physiographic regions (No. FHWA-HRT-05-072). United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development.
- Kamarudin, M.K.A., Nalado, A. M., Toriman, M.E., Juahir, H., Umar, R., Ismail, A., Abd Wahab, N., Saad, M.H.M., Maulud, K N., Hanafiah, M.M., Saudi, A.S.M. y Harith, H. (2019). Evolution of river geomorphology to water quality impact using remote sensing and GIS technique. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 149, 258-273. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23838>
- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms and processes: a new perspective*. Routledge.
- Kraemer, A., Moulin, J. F., Marín, A., Kruger, D. y Herber, L. (2020). *Manual del aguador arrocero, Principios básicos para el manejo del riego para el cultivo del arroz*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). https://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/academico/Manual_Aguador.pdf
- Lell Kliphan, R.G. (2018). *ENTRE RÍOS, NATURALEZA HIDRICA Y POTENCIALIDAD ECONOMICA - PRODUCTIVA*. Estudios y proyectos hidráulicos.
- Leopold, L.B. (1994). *A View of the River*. Harvard University Press.
- Ligier, H.D.; Vallejos, O; Perucca, A.R. y Matteio, H. (1998). La erosión hídrica en la provincia de Corrientes. EEA INTA Corrientes, Recursos Naturales. Publicación Técnica: 36 p., 10 mapas y 1 disquette.
- Ligier, H.D.; Perucca, A.R.; Vallejos, O. y Matteio, H. (2000). Limitaciones por excesos de agua en Corrientes. Resumen expandido en XI Congreso Internacional de Conservación de Suelos (ISCO 2000). Buenos Aires.

Bibliografía

- Ligier, H.D. (2012). *Mapa de suelos y aptitud de tierras en los departamentos Esquina, Goya y Lavalle, Corrientes*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Corrientes, Recursos Naturales.
- Ligier, H.D., Kurtz, D.B., Matteio, H.R., Perucca, R.A. y Vallejos, O. (2001). *Suelos y Vegetación de los departamentos Sauce y Curuzú Cuatiá, Provincia de Corrientes*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Corrientes, Recursos Naturales.
- Lindsay, J.B. (2014). *The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS*. Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, 16-18 April, DOI: 10.13140/RG.2.1.1010.8962.
- List, G., & Coomes, O. T. (2019). Ripiquetes and risk in the cultivation of rice in the floodplain of the Amazon river near Iquitos, Peru. *Folia Amazonica*, 28(1), 19-32.
- Magilligan, F.J., & Nislow, K.H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71(1-2), 61-78. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.017>
- Maidment, D.R. (1993). *Handbook of hydrology* (No. 631.587). McGraw-Hill.
- Maldonado, F.D., Sione, W.F. y Aceñolaza, P. G. (2012). Mapeo de desmontes en áreas de bosque nativo de la provincia de Entre Ríos, Argentina / Mapping of forest clearance in natural areas of Entre Ríos province, Argentine. *Revista Ambiente*, 8(Especial), 523-532. <https://doi.org/10.5777/ambiente.2012.04.07>
- Manzán, A., Pagliettini, L. y Robles, D. (2012). Valoración del agua para la producción de arroz en entre ríos. *Aqua-LAC*, 4(1), 1-8.
- Marano, R.P. y Filippi, R.A. (2015). Water Footprint in paddy rice systems. Its determination in the provinces of Santa Fe and Entre Ríos, Argentina. *Ecological Indicators*, 56, 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.027>
- Masin, Carolina Elisabet; Rodriguez, Alba R.; Maitre, Maria Ines; Cerana, Jorge Alberto; Hernandez, Juan; et al.; Riqueza de Lombrices de Tierra en un Argiudol bajo cultivo de soja (Colonia Ensayo, Entre Ríos). *Revista Científica Agropecuaria*; 19; 1-2; 12-2015; 39-50
- Martínez, S. J. (2010). *Cuenca del río Guayquiraró* (Versión 2010) [Cuencas y regiones hídricas de la República Argentina: Atlas 2010]. Subsecretaría de recursos hídricos de la nación - Instituto Nacional del Agua.
- Matteucci, S.D., F. Rodríguez, M.E. Silva y J. Morello. (2013). *Complejos de ecosistemas de Argentina*. https://www.researchgate.net/profile/Silvia_Matteucci/publication/281284852_Complejos_de_Ecosistemas_de_Argentina/links/55df4a8608aede0b572b8bb9.pdf.
- Miceli, J.H. (2015). El mito de Corrientes: Una introducción a su análisis y clasificación. *Cuadernos del Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano*, 24(2), Article 2.
- Micheli, E.R., Kirchner, J.W. y Larsen, E.W. (2004). Quantifying the effect of riparian forest versus agricultural vegetation on river meander migration rates, Central Sacramento River, California, USA. *River research and applications*, 20(5), 537-548
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP) (2019a). *Existencias bovinos*. <https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset/senasa-existencias-bovinas/archivo/1b920477-8112-4e12-bc2c-94b564f04183>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP) (2019b). *Existencias ovinos*. <https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset/senasa-existencias-bovinas/archivo/1b920477-8112-4e12-bc2c-94b564f04183>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP) (2021). *Agricultura- Estimaciones agrícolas*. <https://www.magyp.gob.ar/datosagroindustriales/>.
- Minotti, P. (2017). Subregión malezales, tembladerales y arroyos litoraleños en Benzaquen, L., D.E. Blanco, R. Bo, P. Kandus, G. Lingua, P. Minotti y R. Quintana. (eds.) (2017). *Regiones de Humedales de la Argentina*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Fundación Humedales/Wetlands International, Universidad Nacional de San Martín y Universidad de Buenos Aires.

Bibliografía

- Mira, A., Veroslavsky, G., Rossello, E., Vives, L., y Rodríguez, L. (2015). Subsurface geological modeling of Corrientes province (NE Argentina) and its relationships with the Guaraní Aquifer system function. *Journal of South American Earth Sciences*, 62, 148-163.
- Mira, A., Veroslavsky, G., Rossello, E., Vives, L. y Rodriguez, L. (2016). *Estructura geológica de la provincia de corrientes (argentina) e implicaciones en el sistema acuífero guaraní*. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea, Catamarca, Argentina.
- Muñoz, J. de D., Milera, S. y Romero, C. (2005). Bosques Nativos y Selvas Ribereñas en la Provincia de Entre Ríos. Publicaciones INSUGEO, *Miscelánea*, 14, 14.
- Navarro de Rau, M.F., (2012). *Dinámica de la cobertura y uso de suelo. Ecorregión Mesopotamia. Provincia de Corrientes, Departamentos Curuzú Cuatiá, Esquina, Mercedes, Monte Caseros y Sauce*. Informe PNECO 092022. INTA.
- Neiff, J.J., Casco, S.L. y Arias, J.C.(2004). Glosario de humedales de Iberoamérica. 336-380 en Neiff, J.J. (Ed.). *Humedales de Iberoamérica*. CYTED, Subprograma XVII – Red Iberoamericana de Humedales. Cuba. ISBN: 959-270-036-2.
- Orfeo, O. (2005). Historia geológica del Iberá, provincia de Corrientes, como escenario de biodiversidad. Temas de la Biodiversidad del Litoral fluvial argentino II. INSUGEO, *Miscelánea*, 14, 71-78
- Oyarzabal, M., Clavijo, J., Oakley, L., Biganzoli, F., Tognetti, P., Barberis, I., Maturo, H. M., Aragón, R., Campanello, P. I., Prado, D., Oesterheld, M. Y León, R.J.C. (2018). Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología Austral*, 28(1), 040-063. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.399>
- Pagliettini, L., y Gil, G. (2008). El valor del agua en el proceso productivo. Análisis en la cuenca del río Miriñay. *Revista brasileira de recursos hídricos*, 13(3), 165-175.
- Pagliettini, L., De Delfino, S.F. y Zabala, S.M. (2005). Transformaciones en los sistemas productivos del sector primario. El complejo arrocero en el Litoral Argentino. *Revista Interdisciplinaria de Estudios Agrarios*, 22.
- Pagliettini, L., Domínguez, J.N. y Filippini, O.S. (2016). El rol de los consorcios de riego en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Agroalimentaria*, 22(43), 19-35.
- Panigatti, J.L., Cruzate, G., Tasi, H y Bedendo, D. (2008). *Suelos y ambientes de Entre Ríos*. <http://www.geointa.inta.gob.ar/descargas/>.
- Panigatti, J.L. (2010). Argentina 200 años, 200 suelos. Ediciones INTA.
- Paruelo, J. M., y Guerschman, J. P. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*, 15(87), 10.
- Pietrantueno, M.F.B. (2019). *Recursos hídricos de Corrientes: Aspectos jurídicos y técnico-productivos*. V CONGRESO NACIONAL DE DERECHO AGRARIO PROVINCIAL.
- Perry, C. y Taylor, K. (Eds.). (2009). *Environmental sedimentology*. John Wiley & Sons.
- Petillo, M.G., Cámpa, P. y Ronzoni, C. (2012) MANUAL PARA EL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN DE TAJAMARES DE AGUADA. Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía. Y Dirección General de Recursos Naturales Renovables, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Ingeniero Agrónomo, Coordinador de la Unidad Prevención de Sequía, Proyecto Producción Responsable. ISBN: 978-9974-594-10-4.
- Plan Mapa de Suelos. Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos. (1986). Carta de suelos de la República Argentina. Departamento Feliciano. Provincia de Entre Ríos. *Serie Relevamiento de Recursos Naturales (3)* INTA-EEA Paraná. Entre Ríos. 96.
- Plan Estratégico Participativo Corrientes 2030 (2021). Gobierno de Corrientes.
- Pohl Schnake, V. y Vallejos V.H. (2011). Ordenamiento territorial de los bosques nativos en Corrientes. *Revista Geográfica de América Central*, 17.
- Poi, A., y Galassi, M.A. (2013) Humedales de los grandes esteros de la provincia de Corrientes en *Inventario de los humedales de Argentina: Sistemas de paisajes de humedales del corredor fluvial Paraná-Paraguay*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Poi, A., y Galassi, M.A. (2013a) Humedales de los tributarios correntinos y entrerrianos al este del río Paraná en *Inventario de los humedales de Argentina: Sistemas de paisajes de humedales del corredor fluvial Paraná-Paraguay* Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

Bibliografía

- Poi, A., y Galassi, M.A. (2013b) Humedales de los grandes esteros de la provincia de Corrientes en *Inventario de los humedales de Argentina: Sistemas de paisajes de humedales del corredor fluvial Paraná-Paraguay*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Poole, G C. (2010). Stream hydrogeomorphology as a physical science basis for advances in stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(1), 12-25.
<https://doi.org/10.1899/08-070.1>
- Popolizio, E. (1996). *Las unidades geomorfológicas del Noreste Argentino*. 15.
<http://icaa.gov.ar/trabajos-de-investigacion-del-ingeniero-doctor-eliseo-popolizio/>
- Pizzio, R., Bendersky, D., Barbera, P. y Maidana, E. (2021). *Caracterización y manejo de los pastizales correntinos*. Ediciones INTA.
- QGIS.org. (2022). *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Ramírez, L (2014). Comentarios Iniciales. Particularidades Fisiográficas del Territorio Correntino. En *Corrientes en Cifras*. Con Texto Libros. UNNE
- Ramonell, C.G. y Alberdi, R. (2015). *Geomorfología del Arroyo Feliciano, Noroeste de Entre Ríos*. VI Congr. Arg. de Cuaternario y Geomorfología, Libro de Resúm.: 215-216. Ushuaia.
- Ramonell, C.G. (2021). Geomorfología y morfodinámica de la planicie aluvial del río Paraná en su tramo medio [Doctor en Ciencias Naturales, Universidad Nacional de La Plata].
<https://doi.org/10.35537/10915/118717>
- Reboratti, C. (2010). Un mar de soja: La nueva agricultura en Argentina y sus consecuencias. *Revista de geografía Norte Grande*, 45, 63-76. DOI:10.4067/S0718-34022010000100005
- Richards, J.A. (2013). Remote sensing digital image analysis. An introduction. *Springer*. DOI:10.1007/978-3-642-30062-2
- Rijke, J., van Herk, S., Zevenbergen, C., & Ashley, R. (2012). Room for the River: delivering integrated river basin management in the Netherlands. *International journal of river basin management*, 10(4), 369-382.
- Rodríguez, L., Ramonell, C.G., García, D., Veizaga, E., Graciani, S., Giraudo, A. y Mihura, E. (2021). Clasificación e inventario de humedales en cuencas fluviales: Caso del arroyo Yaguarí, noreste de Argentina. *BOLETÍN GEOLÓGICO Y MINERO*, 132(1-2), 15-27.
<https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.002>
- Romagnoli, M., Portapila, M., Rigalli, A., Maydana, G., Burgués, M. y García, C.M. (2017). Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina. *Science of The Total Environment*, 596–597, 437–450.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.041>
- Romero, E.C., Sphan, E. y Patriarca, G. (2007). Evaluación del uso de la tierra, su evolución y la relación con el riego de arroz a partir de represas en el centro norte de Entre Ríos en Díaz, E.L., Duarte, O.C., Zamanillo, E.A. y Lenzi, L.M. (2007). *Evaluación agrohidrológica de represas para riego: su estudio en Entre Ríos*. EDUNER.
- Rubio, G., Lavado, R.S. y Pereyra, F.X. (Eds.). (2019). The Soils of Argentina. *Springer International Publishing*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76853-3>
- Santa Cruz, J. N., Orfeo, O. y Gulisano, F. (2019). *Geología de la provincia de Corrientes, Argentina y cuencas geotectónicas relacionadas*. Moglia.
- Santos, R. G. dos. (2009). Cultura de arroz por vía de ciclo natural de enchentes: Uma análise ambiental. *Revista da Casa da Geografia de Sobral*, 4(2).
<https://doi.org/10.5380/geografar.v4i2.16121>
- Sarreal, J. (2013). Revisiting Cultivated Agriculture, Animal Husbandry, and Daily Life in the Guarani Missions. *Ethnohistory*, 60(1), 101-124. <https://doi.org/10.1215/00141801-1816193>
- Saxton, K.E. (2017). *Soil-Plant-Atmosphere-Water Field and Pond Hydrology*. USDA Agricultural Research Service. Department of Biological Systems Engineering – Washington State University
- Scarpati, O.E., Capriolo, A.D. y Puga, Y. E. (2016). Producción arrocería y evolución de elementos climáticos en la provincia de Corrientes (Argentina). *Estudios Geográficos*, 77(280), 311–331.
<https://doi.org/10.3989/estgeogr.201611>

Bibliografía

- Schulz, G.A., Wilson, M.G., Tasi, H.A., González, C. y Pedelhez, O. (s. f.). *Desmonte en la provincia de Entre Ríos. Período 2004-2005*. Sc. Gobierno de Entre Ríos.
- Schumm, S.A. (1979). Geomorphic Thresholds: The Concept and Its Applications. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 4(4), 485. <https://doi.org/10.2307/622211>
- Schumm, S. A. (2007). *River variability and complexity*. Cambridge University Press.
- Schumm, S.A. y Harvey, M.D. (2008). Engineering geomorphology. En García, M. (Ed.). *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice*. American Society of Civil Engineers.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca – INTA, Versión Digital Corregida, Revisada y Aumentada (Versión 9.0): G. Cruzate, L. Gomez, M. J. Pizarro, P. Mercuri, S. Banchemo. (1990). *Atlas de suelos de la República Argentina*. Versión digitalizada 9,0. Proyecto PNUD ARG/85/019. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2013). *Inventario de los humedales de Argentina: sistemas de paisajes de humedales del corredor fluvial Paraná Paraguay*. Proyecto GEF 4206 PNUD ARG 10/003. Buenos Aires.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2007). *Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos, Informe Regional Espinal* (BIRF 4085-AR).
- Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación (s.f.). *Sistema Nacional de Información Hídrica*. Ministerio de obras públicas Argentina. <https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>
- Servicio Meteorológico Nacional (2022). *Centro de información meteorológica*. <https://www.smn.gov.ar/>
- Servicio Meteorológico Nacional (s.f.). *Atlas Climático Argentina*. <https://www.smn.gov.ar/clima/atlasclimatico>.
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.
- Solier, P., Duarte, O.C., Romero, E.C. y Boschetti, N.G. (2007). Balance hídrico en el área de presas para arroz en Díaz, E.L., Duarte, O.C., Zamanillo, E.A. y Lenzi, L.M. (2007). *Evaluación agrohidrológica de represas para riego: su estudio en Entre Ríos*. EDUNER.
- Sidle, R. C., & Onda, Y. (2004). Hydrogeomorphology: Overview of an emerging science. *Hydrological Processes*, 18(4), Article 4. <https://doi.org/10.1002/hyp.1360>
- Simon A, y Hupp C.R. (1986). *Geomorphic and vegetative recovery processes along modified Tennessee streams: an interdisciplinary approach to disturbed fluvial systems*. *Forest Hydrology and Watershed Management*. IAHS-ASSH Publ. 167.
- Statzner, B., Gore, J.A. y Resh, V.H. (1988). Hydraulic Stream Ecology: Observed Patterns and Potential Applications. *Journal of the North American Benthological Society*, 7(4), 307-360. <https://doi.org/10.2307/1467296>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Schellnhuber, H. J., Dube, O.P., Dutreuil, S., Lenton, T. M. y Lubchenco, J. (2020). The emergence and evolution of Earth System Science. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(1), 54-63. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0005-6>
- Subsecretaría de Recursos Hídricos e Instituto Nacional del Agua. (2002). *Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la República Argentina*.
- Subsecretaría de recursos hídricos. (2014). Red Hidrológica Nacional, Publicaciones Hidrometeorológicas 2013 - Edición 2014 / compilado por Edgardo Bortolozzi. - 1a ed. - Buenos Aires: Secretaría de Obras Públicas. ISBN: 978-987-25894-6-2. CD-ROM.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos. (2020). *Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina*. <https://2mp.conae.gov.ar/index.php/materiales-educativos/material-educativo/coberturas-vectoriales/417-cuencas-hidrograficas-subsecretaria-de-recursos-hidricos>
- Subsecretaría de Recursos Hídricos. (2020). *Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina*. <https://2mp.conae.gov.ar/index.php/materiales-educativos/material-educativo/coberturas-vectoriales/417-cuencas-hidrograficas-subsecretaria-de-recursos-hidricos>

Bibliografía

- Thorp, J.H., Flotemersch, J.E., Delong, M.D., Casper, A.F., Thoms, M.C., Ballantyne, F., Williams, B. S., O'Neill, B.J. y Haase, C.S. (2010). Linking Ecosystem Services, Rehabilitation, and River Hydrogeomorphology. *BioScience*, 60(1), 67-74. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.1.11>
- Tromp-van Meerveld, H.J., & McDonnell, J.J. (2006). Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. *Water Resources Research*, 42(2).
- Tujchneider, O.C. y Fili, M. (s.f. a). *Hidrogeología de la cuenca del arroyo Feliciano. Provincia de Entre Ríos, República Argentina. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas*. Universidad Nacional del Litoral.
- Tujchneider, O.C. y Fili, M. (s.f. b). *Aspectos geohidrológicos del noroeste de la provincia de Entre Ríos. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas*. Universidad Nacional del Litoral.
- Van der Sluijs, D. H. (1971). Native grasslands of the Mesopotamia region of Argentina. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 19(1), Art. 1. <https://doi.org/10.18174/njas.v19i1.17323>
- Waller, T. (2011). *El terraplén del Iberá, una asignatura pendiente. Incidencia del incumplimiento de la sentencia en el ecosistema*. Informe Ambiental Anual FARN, 317-334.
- Ward, A.D. y Trimble, S.W. (2003). *Environmental hydrology*. Crc Press.
- Weber, J. F., & Baigorri Ocampo, S. (2019). Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina). *Aqua-LAC*, 11(1), 34–54. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-1-03>
- Wilson, M.G., Tasi, H.A., Paz González, A., Indelángelo, N. y Díaz, E.L. (2008). *Indicadores de calidad para suelos del área de bosque nativo de Entre Ríos*. XXI Congreso argentino de la ciencia del suelo. Semiárido: Un desafío para la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, Argentina
- Wohl, E. (2014). Time and the rivers flowing: Fluvial geomorphology since 1960. *Geomorphology*, 216, 263-282. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.012>
- Wulder, M.A., Loveland, T.R., Roy, D.P., Crawford, C.J., Masek, J.G., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Belward, A.S., et al., (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, v. 225, 127–147, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>.
- Yang, Q. (2018). Enhancing SWAT simulation of forest ecosystems for water resource assessment. A case study in the St. Croix River basin. *Ecological Engineering*, 10.

Participaciones en congreso relacionadas con la investigación de esta tesis.

Riopel, F. y Ramonell, C.G. (2022, 19 – 23 septiembre). *Mapa de unidades geomorfológicas de la cuenca del río Guayquiraró, Noreste de Argentina*. [comunicación por póster]. 8^e Congreso Argentino de Cuaternario y de Geomorfología. San Juan Capital, San Juan, Argentina.

Riopel, F. y Ramonell, C.G. (2022, mayo). *Cambios morfológicos recientes en cauces de la cuenca del río Guayquiraró, Noreste de Argentina*. [comunicación por póster].]. 14^e Jornadas Nacionales de Geografía Física, Corrientes Capital, Corrientes, Argentina.

ANEXO I

Proceso de delimitación de la cuenca y de los SH

- i. *Acentuación de los cauces de agua en el MDE (DEM reconditioning)*.
Este paso permite acentuar la depresión del MDE donde están efectivamente ubicados los cauces de agua.
- ii. *Corrección del MDE llenando pozos (Fill sinks)*.
Permite rellenar los pozos sin salida en el MDE, los cuales pueden ser naturales o errores en la toma de datos.
- iii. *Definir la dirección del agua en cada pixel (Flow direction)*
Se define de manera automática basándose en el valor de elevación de cada pixel, es decir que el agua en un pixel tomará la dirección del pixel más bajo dentro de sus 8 vecinos.
- iv. *Definir la acumulación de agua en cada pixel (Flow accumulation)*
Se calcula a partir de la dirección del flujo calculado al paso previo. Los pixeles con valor alto de acumulación indican teóricamente la presencia de un cauce.
- v. *Definir el punto de cierre de la cuenca (Vector creation)*
El punto de cierre de la cuenca fue posicionado en la unión del río Guayquiraró inferior, canal sur, con un canal secundario del Paraná.
- vi. *Pegar el punto de cierre sobre un cauce (Snap pour point)*
- vii. Esta etapa permite ubicar con precisión el punto de cierre de la cuenca sobre un pixel con un valor alto de acumulación.
- viii. *Definición de las fronteras de la cuenca hidrográfica (Watershed)*
En la última etapa, se usan el raster de dirección de flujo de agua y el punto de cierre de la cuenca para determinar las fronteras de la cuenca hidrográfica.

ANEXO II

Procesamiento de los datos históricos meteorológicos e hidrológicos

Las estaciones La Esperanza, Malvinas Sur, Paso Juncue, Paso la Llana y Pueblo Libertador hacen parte de la red hidrológica nacional y sus datos se descargaron desde la Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH) de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación. La estación Curuzú Cuatíá es parte de la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y sus datos fueron proporcionados a pedido por el Centro de Información Meteorológica.

Con respecto a información sobre las precipitaciones y los caudales existe una falta importante de datos, ya sea en años enteros, en meses o en semanas. La siguiente figura resume la disponibilidad temporal de los datos en las estaciones consideradas.

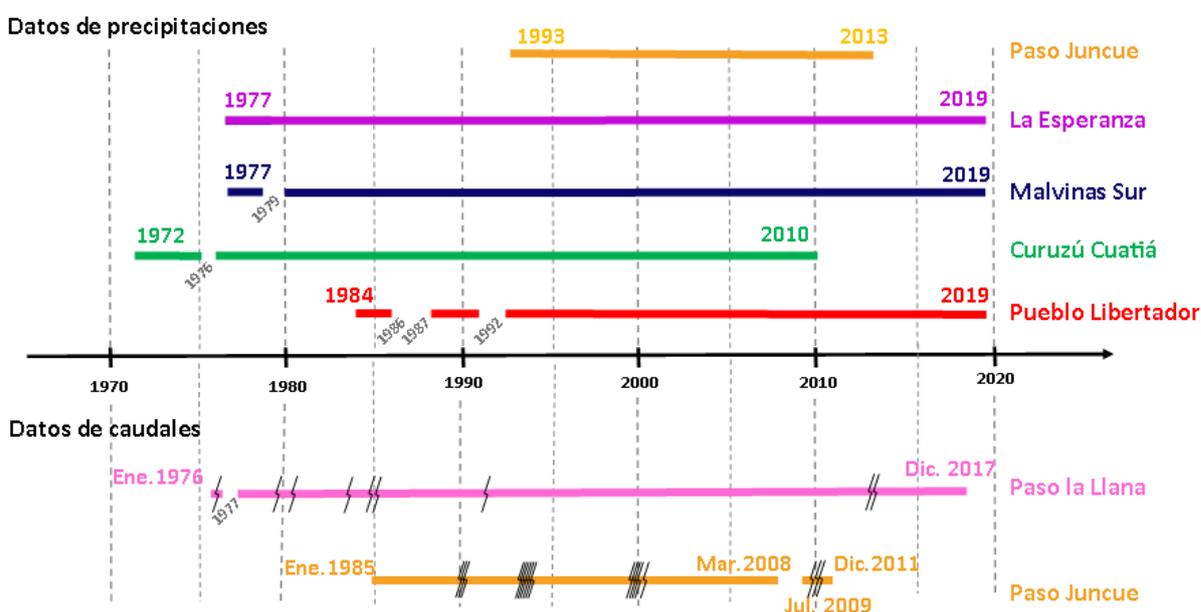


Figura A-II. 1. Disponibilidad temporal de datos mensuales de precipitaciones y de caudales en la cuenca en la Red Hídrica Nacional (Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación, s.f.). Las rayas en los datos de caudales representan meses sin dato. Los meses sin datos en las precipitaciones no fueron marcados.

Se usó el método de polígonos de Thiessen a través de herramientas geomáticas para el análisis de las precipitaciones, tal como recomendó Hämmerly et al. (2019) para la margen izquierda del Paraná medio. Basándose en la disponibilidad de los datos, se hicieron distintos polígonos de Thiessen según dos periodos: 1980-2009 y 2010-2019. No se consideraron años anteriores a 1980 por la escasez y la falta de datos previos a esta fecha.

Además, se analizaron las precipitaciones independientemente para dos subcuencas cerradas en las estaciones hidrométricas utilizadas en el análisis de caudales: Paso Juncue y Paso la Llana. Esto permitió comparar directamente los datos de caudales con las precipitaciones. Cabe destacar que la subcuenca de Paso Juncue es la misma que el SH del

Guayquiraró superior, mientras que la subcuenca de Paso la Llana corresponde a la suma del SH Sarandí – Barrancas medio con el SH Ávalos.

La escala de tiempo mensual representa los totales mensuales de precipitaciones en milímetros. Los meses sin datos fueron reemplazados por datos de otra estación cercana cuyos datos estaban disponibles. La escala anual representa la suma de los totales mensuales de precipitaciones en milímetros. En una misma estación fueron conservados los años en que no faltaban más de 2 meses de datos, reemplazándolos por el promedio mensual de todos los años (por ejemplo, en la estación Pueblo Libertador, el promedio del mes de septiembre fue utilizado para septiembre 1984).

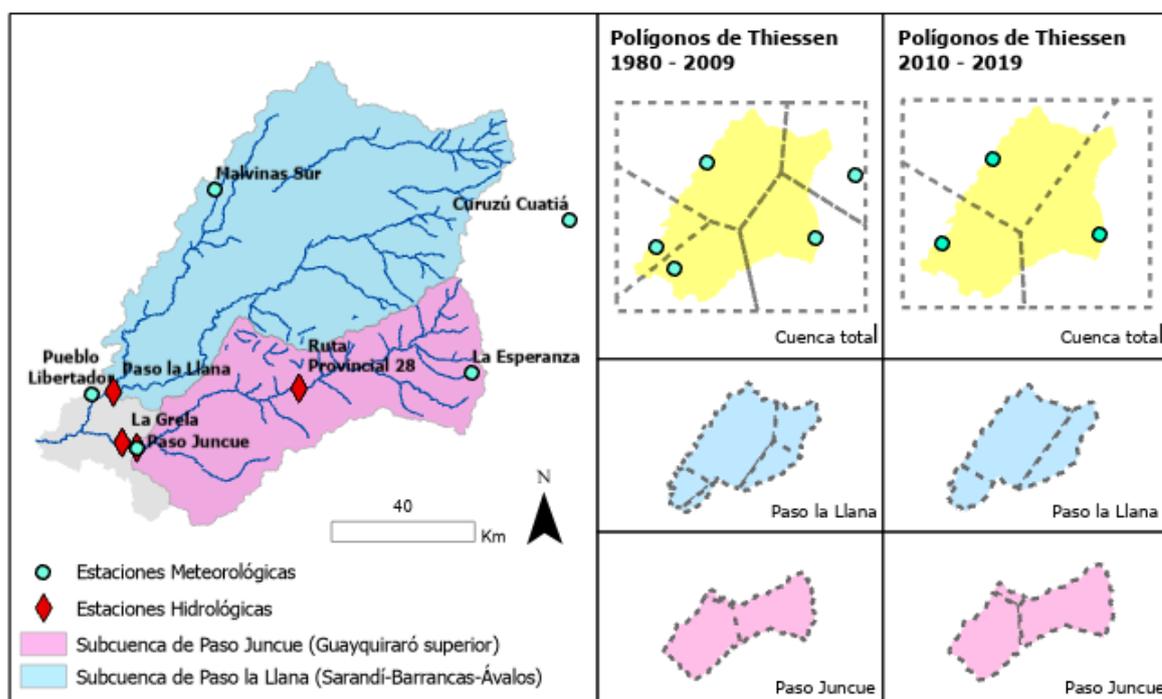


Figura A-II. 2. Método de polígonos Thiessen, ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas y subcuencas principales con datos de caudal en Paso Juncue y en Paso la Llana (Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación, s.f.).

También se presentan medias mensuales de precipitaciones para la cuenca entera, la subcuenca de Paso Juncue y la subcuenca de Paso la Llana, calculadas con datos del 1980 hasta 2019.

Los datos de caudal representados son los promedios de los datos diarios en el mes. Fueron considerados los años de 1980 hasta 2019 para coincidir con los datos de precipitaciones, y solamente los años con por lo menos 10 meses de datos, abarcando del 1980 hasta el 2013 para Paso la Llana y del 1985 hasta el 2009 para Paso Juncue.

Los datos de medias mensuales de caudal en Paso la Llana y en Paso Juncue fueron obtenidos desde la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2014). Finalmente, para

permitir la comparación, las medias mensuales de caudal de las dos estaciones fueron normalizadas dividiéndolas por el promedio total anual.

ANEXO III.

Compilación de datos de producción agropecuaria a escala departamental entre los años 2008 y 2021

Los datos sobre cabezas de ganado en los departamentos de la cuenca del río Guayquiraró así como la evolución en superficie sembrada de las principales producciones agrícolas están representados en las siguientes tablas. Cabe destacar que los datos presentados a continuación no son valores para la cuenca, ya que están hechos a la escala espacial de los departamentos. Representan las tendencias regionales.

Tabla A-III. 1. Existencias de bovinos y ovinos en departamentos de la cuenca del Guayquiraró en los últimos años según el MAGyP (2019a y 2019b)

	La Paz	Feliciano	Curuzú Cuatiá	Sauce	Esquina
Año	Bovino				
2008	419480	246587	624749	184960	269401
2012	377085	199997	587012	170536	247740
2016	392554	237276	672107	177990	268741
2019	374990	206247	596757	152839	237616
Variación total (%)	-10.6	-16.4	-4.5	-17.4	-11.8
	Ovino				
2008	43495	80057	473633	74322	22900
2012	53749	82327	369363	64686	41318
2016	67620	88872	411097	72123	52122
2019	73045	89483	357185	70619	53290
Variación total (%)	+67.9	+11.8	-24.6	-5.0	+132.7

Tabla A-III. 2. Superficie sembrada con arroz en hectáreas en departamentos de la cuenca del Guayquiraró en los últimos años.

Campaña agrícola	La Paz	Feliciano	Curuzú Cuatía	Sauce	Esquina
2008-2009	6822	5647	18 780	1721	1100
2014-2015	8600	6500	-	-	-
2019-2020	5400	7100	20 310	3300	2300
2020-2021	7500	6000	-	-	-
Variación total	+10%	+6%	+8%	+92%	+109%
Fuente	BCER	BCER	MAGyP	MAGyP	MAGyP

Tabla A-III. 3. Superficie sembrada con soja (de primera y de segunda) en departamentos de la cuenca del Guayquiraró en los últimos años.

Campaña agrícola	La Paz	Feliciano	Curuzú Cuatía	Sauce	Esquina
2008-2009	58 012	9290	1500	3900	8850
2014-2015	107 600	11 700	-	-	-
2019-2020	114 800	14 000	855	1875	140
2020-2021	101 100	14 800	-	-	-
Variación total	+74%	+59%	-43%	-52%	-99%
fuentes	BCER	BCER	MAGyP	MAGyP	MAGyP

Tabla A-III. 4. Superficie sembrada con maíz (de primera y de segunda) en departamentos de la cuenca del Guayquiraró en los últimos años.

Campaña agrícola	La Paz	Feliciano	Curuzú Cuatía	Sauce	Esquina
2008-2009	13 803	2808	1490	820	780
2014-2015	15 200	3000	-	-	-
2019-2020	31 600	4400	800	355	500
2020-2021	28 500	3300	-	-	-
Variación total	+106%	+18%	-46%	-57%	-36%
fuentes	BCER	BCER	MAGyP	MAGyP	MAGyP

Tabla A-III. 5. Superficie sembrada con trigo (de primera y de segunda) en departamentos de la cuenca del Guayquiraró en los últimos años.

Campaña agrícola	La Paz	Feliciano	Curuzú Cuatíá	Sauce	Esquina
2008-2009	27 130	1742	780	400	1270
2014-2015	19 470	4000	-	-	-
2019-2020	42 200	4000	270	1050	-
2020-2021	46 000	6300	-	-	-
Variación total	+70%	+72%	-65%	+163%	-
fuelle	BCER	BCER	MAGyP	MAGyP	MAGyP

ANEXO IV.

Detalles metodológicos para los mapeos de coberturas terrestres y los sondeos de infraestructuras agropecuarias.

Clasificaciones de imágenes satelitales

Después de familiarizarse con la evolución de las coberturas terrestres a lo largo de un año en imágenes Landsat, se eligieron las estaciones de primavera y verano para llevar a cabo las clasificaciones. En primavera, la vegetación está creciendo con vigor, lo que amplifica la distinción entre las zonas húmedas y las zonas secas. En verano, los cultivos están vigorosos, lo cual amplifica las diferencias entre los lotes de arroz, de secano y aquellos en barbecho; sin embargo, vista la sequía general en esta temporada, los ecosistemas naturales y semi-naturales húmedos y secos no se diferencian fácilmente.

En función de estas características fenológicas y de los objetivos de la tesis, se decidió proceder según el siguiente flujo de trabajo.

- i. Efectuar una primera clasificación con una imagen del mes de octubre, noviembre o diciembre, de un año de la década de los años 80. Este año representará el estado de la cuenca previo a las transformaciones territoriales.
- ii. Efectuar otra clasificación con la misma metodología y temporada en un año de la década de los años 2010, lo más cercano posible a la actualidad. Este año representará el estado actual de la cuenca.
- iii. Posteriormente a las dos clasificaciones, se analizarán los cambios de cobertura entre esos dos años por comparación de ambas.

Se optó por hacer clasificaciones no supervisadas de algoritmo K means. Las clasificaciones no supervisadas son recomendables para análisis rápidos en espacios con poca información previa. Estas se basan en agrupar píxeles con comportamientos espectrales semejantes en clases, sin información previa. Específicamente, el algoritmo K means se basa en calcular la distancia euclidiana entre cada píxel y el promedio de clase más cercano en un dominio espectral, en este caso las bandas de reflectancia seleccionadas; los cálculos de distancia y de promedio se repiten de manera iterativa, siempre buscando una combinación en la cual la distancia entre cada píxel y el promedio de su clase es reducida (Richards, 2013).

Para la elección de los años precisos para llevar a cabo la clasificación, se tomaron en cuenta los siguientes criterios.

- i. La disponibilidad de una imagen satélite en el mes de octubre, noviembre o diciembre, sin nubes en la zona de estudio o con una cantidad de nubes mínima.
- ii. El año de la toma de la imagen debía ser normal en términos de precipitaciones (aproximadamente entre los 1000 mm y 1500 mm).

- iii. Priorizar años lo más alejados posible uno del otro, a manera de poder observar cambios sobre el mayor rango de tiempo posible.

A partir de estos criterios, los años 1987 y 2019 quedaron seleccionados para el análisis. Para cubrir la superficie total de la cuenca fue necesario usar dos imágenes por año (*path/row* 226/81 y 226/80). Se sumó una imagen de 1986 para contar con información de la cuenca en un estado húmedo, es decir, con niveles altos de agua en los suelos y los cauces. Las imágenes fueron descargadas de forma libre desde la plataforma web de descarga Earth Explorer, del Earth Resources Observation and Science Center, United States Geological Survey, el instituto estadounidense responsable de las misiones Landsat junto con la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Se presentan en la siguiente tabla las distintas imágenes utilizadas, con sus especificaciones técnicas, en conjunto con la combinación de bandas utilizadas para las corridas de clasificación.

Tabla A-IV. 1. Imágenes satelitales utilizadas.

Misión	Instrumento	Collection	Tier	Fecha de toma	Resolución espacial	Path/row	Bandas utilizadas	Uso
Landsat 5	TM	1	1	11 de noviembre 1986	30 m	226/81	B4, B5, B7	Definición Sector fluviales
Landsat 4	TM	1	1	22 de noviembre 1987	30 m	226/81	B4, B5, B7	Definición Sector fluviales
Landsat 4	TM	1	1	22 de noviembre 1987	30 m	226/80	B1, B2, B3, B4, B5, B7	Coberturas 1987
Landsat 4	TM	1	1	22 de noviembre 1987	30 m	226/81	B1, B2, B3, B4, B5, B7	Coberturas 1987
Landsat 8	OLI	1	1	24 de diciembre 2019	30 m	226/80	B2, B3, B4, B5, B6, B7	Coberturas 2019
Landsat 8	OLI	1	1	24 de diciembre 2019	30 m	226/81	B2, B3, B4, B5, B6, B7	Coberturas 2019

Considerando la importante variabilidad espacial de las coberturas terrestres en la cuenca, se dividió la cuenca en tres ambientes distintos para llevar a cabo las clasificaciones por sectores. Lo mismo permitió aumentar la precisión en la clasificación de las coberturas.

1. **Sector Depresión:** Región fisiográfica del MAAP.

Digitalización: Se usó el polígono del MAAP realizado en el Capítulo 3.

2. **Sector Interfluviales:** Región fisiográfica del RVCE, excluido el sector Fluviales.

Digitalización: Resta del sector fluviales del polígono del RVCE.

3. **Sector Fluviales:** Planicies fluviales de varios órdenes partes del RVCE. Forman un contraste topográfico e hídrico con lo demás de los valles fluviales.

Digitalización: Se realizó una clasificación no supervisada en GEE con algoritmo *K-means* de 60 clases, 1000 iteraciones y 1000 semillas de entrenamiento. Se usaron una imagen Landsat en estado seco del 22 de noviembre del 1987, y una imagen Landsat en estado húmedo del 11 de noviembre de 1986. En la imagen en estado húmedo, la mayoría de las planicies fluviales se encuentran inundadas. Para la clasificación se usaron las bandas de infrarojo cercano (B4), de onda corta infraroja 1 (B5) y de onda corta infraroja 2 (B7), ya que son las más sensibles a la presencia del agua. Las clases resultantes partes de las planicies fluviales de la cuenca fueron seleccionadas y fusionadas en una capa máscara. Después, el resultado fue exportado e incorporado de nuevo al SIG, donde se aplicaron herramientas para mejorar la capa máscara, quitar píxeles que habían sido mal clasificados y finalmente convertir el raster binario a formato vectorial.

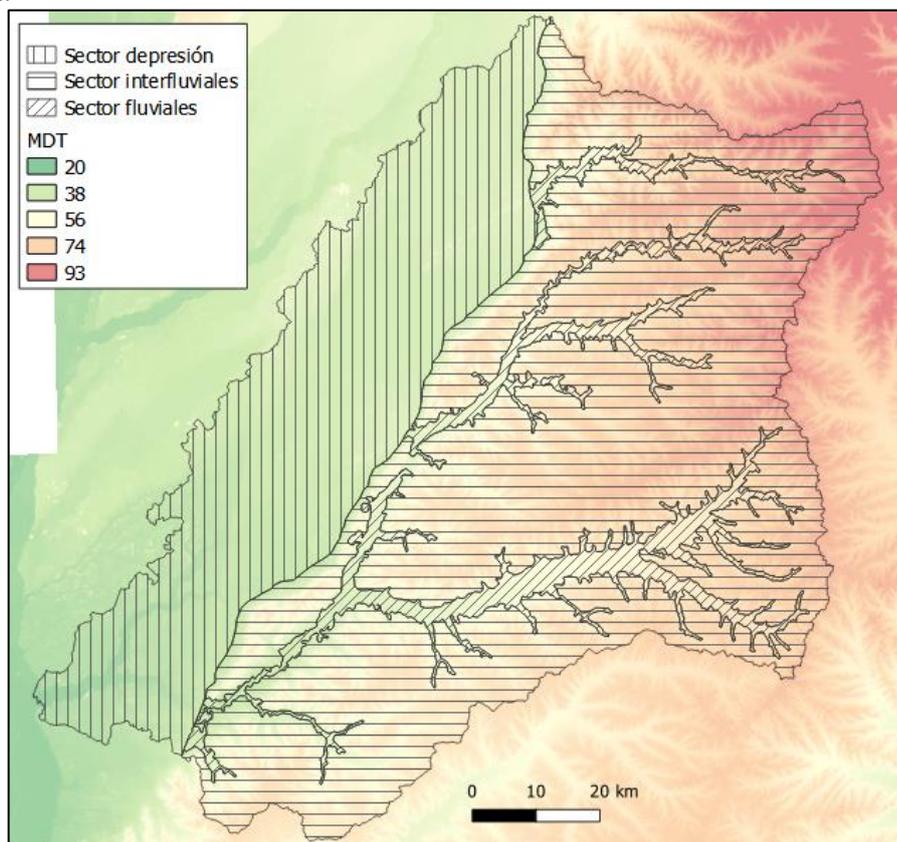


Figura A-IV.-1. Sectores establecidos en la cuenca para la realización de las distintas clasificaciones

Las clasificaciones se hicieron primero en GEE, usando el algoritmo K-means. Para cada año, se hicieron por separado 4 clasificaciones: una por cada sector y finalmente, una clasificación a escala de la cuenca enfocada en la agricultura. Esta última permitió mejorar la precisión de la metodología para la clase OCyB. Para ella, se realizó primero una máscara excluyendo las zonas de la cuenca donde no hay tierras cultivadas, y segundo un análisis de componentes principales (PCA) de las bandas de las imágenes satelitales.

Cada clase espectral fue asignada a una clase conceptual en el software SNAP, a partir de la comparación visual y de la comparación de las firmas espectrales entre las clases y polígonos de referencias.

Finalmente, la clase Ar fue digitalizada manualmente en el SIG, por interpretación visual, e integrada posteriormente a la clasificación, ya que este método era rápido y daba buenos resultados.

Etapas técnicas de las clasificaciones de imágenes satelitales

1. Crear polígonos para Sauce, Pueblo Libertador, San Jaime de la Frontera y Cazadores Correntinos. Las delimitaciones de los polígonos de las ciudades se hacen manualmente en un SIG, sobre la imagen de 2019, a escala 1:20 000 y están

- establecidas a partir de imágenes de alta resolución y observación en la imagen Landsat.
2. Crear máscaras a partir de los *shapes* de los 3 sectores (valles, interfluviales, depresión), sacando los polígonos de las ciudades. Aquellas máscaras se usarán para las clasificaciones.
 3. Con el plugin Semi-automatic Classification Plugin (SCP) de QGIS, definir polígonos de cobertura asegurada (llamados ROIs) en la imagen Landsat 4 TM del 22 noviembre 1987 (path/row: 226/81), basándose en: la estructura espacial del paisaje, la comparación con imágenes de alta resolución en zonas que no tuvieron modificaciones desde los años 80 y la apariencia de la imagen Landsat usando combinación falso color (B5-B4-B1). En las partes donde tenga duda sobre el tipo de cobertura, no crear polígono. Hacer por lo menos 10 ROIs por cobertura. A partir de esos ROIs, producir las firmas espectrales de las coberturas.
 4. Repetir la etapa 3 para la imagen de Landsat 8 OLI del 24 diciembre 2019 (path/row: 226/81).
 5. Importar las máscaras (depresión, interfluviales, valles) en Google Earth Engine (GEE). En GEE, importar las imágenes que interesan a este trabajo, es decir, del 22 de noviembre 1987 (path/row: 226/81 y 226/80) y 24 diciembre 2019 (path/row: 226/81 y 226/80). Hacer mosaicos entre las imágenes de mismas fechas. El row 81 (sur) tiene prioridad, es decir que en los casos de los píxeles que solapan entre las dos imágenes, serán seleccionados los píxeles del row 81.

Fluviales 1987:

6. En GEE, hacer una clasificación no supervisada con algoritmo K means (10 000 píxeles de entrenamiento, 10 000 semillas, 10 000 iteraciones, 35 clases) con la imagen 1987, usando la máscara valles pre construida.
7. Exportar del GEE en formato GeoTIFF y abrir en el programa SNAP.
8. En SNAP, asignar para cada clase espectral una clase conceptual para la cual corresponde. Basarse en todos o los más prácticos de los siguientes criterios: lugar lógico en la estructura espacial del paisaje, comparación con la misma imagen Landsat, correspondencia o gran proximidad con la firma espectral de la cobertura, comprobación con imágenes de alta resolución. En este último, siempre considerar que la cobertura puede haber cambiado.
9. Abrir el GeoTIFF en QGIS y reclasificar usando el SCP. A partir de este paso, la clasificación está "reclasificada", por lo cual los píxeles toman valores entre 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 8.

Interfluviales 1987:

10. Hacer el mismo tipo de clasificación que aquella del punto 6, salvo que usando 70 clases y la máscara sobre interfluviales.
11. Repetir los pasos 7,8 y 9.

Depresión 1987:

12. Hacer el mismo tipo de clasificación que aquella del punto 6, salvo que usando 40 clases y la máscara sobre depresión.
13. Repetir los pasos 7,8 y 9.

Clase de Otros Cultivos y Barbecho, 1987:

Los pasos siguientes permiten obtener un mayor grado de precisión de la clasificación para la clase OCyB.

14. En GEE, en el mismo mosaico de imágenes del 22 de noviembre de 1987, crear un polígono en la depresión donde no aparecen tierras cultivadas ni en 1987 ni en 2019.
15. Combinar este polígono con la máscara del sector valles. Usando el polígono de la cuenca como base y usando la función de diferencia, obtener el inverso de aquellas combinaciones. El resultado es una máscara incluyendo a todas las zonas posibles en la cuenca con tierras cultivadas.
16. Usando esta máscara, hacer un análisis de componentes principales (PCA) de las bandas. Esta transformación estadística de los datos de reflectancia superficial resulta en 6 componentes principales. Cada componente principal está correlacionado entre si y no correlacionado con los otros, lo que permite visualizar una información o patrón del paisaje distinto para cada componente.
17. Tras la visualización de los componentes principales, elegir aquellos que son más eficaces para diferenciar los campos de cultivos de los demás coberturas. En el mosaico 1987, nos quedamos con los componentes 1,2 y 4. Formar una imagen con estas 3 bandas.
18. Hacer una clasificación no supervisada con algoritmo K means (10 000 píxeles de entrenamiento, 10 000 semillas, 10 000 iteraciones, 38 clases)
19. A partir de las 38 clases, quedarse solamente con las clases que corresponden a tierras cultivadas, ya sea en estado de barbecho, de cultivo de arroz o de otros cultivos. Juntar en una misma imagen de tipo booleana, es decir con valores de 1 o 0.
20. Usando herramientas del GEE, deshacerse de los pequeños grupos de píxeles de cultivo. Se establece el mínimo a 15 píxeles para que el grupo este conservado, sin considerar las conexiones diagonales.
21. Pasar el resultado en un filtro de tipo "*majority*", usando como valor 60 metros. El filtro majority actúa pasando por toda la imagen una ventana de 60 metros por 60 metros, es decir un cuadrado de 2 píxeles por 2 píxeles, donde todos los píxeles toman el valor

más común en este cuadrado. Por lo tanto, filtra los píxeles aislados y así suaviza el raster.

22. De nuevo, deshacerse de los pequeños grupos de píxeles de cultivo. Se establece el mínimo a 50 píxeles para que el grupo este conservado, sin considerar las conexiones diagonales.
23. Convertir la imagen filtrada en formato shapefile, exportar y abrir en QGIS.
24. Seleccionar los polígonos que corresponden efectivamente con tierras cultivadas.
25. Exportar en una nueva capa y pasar por la herramienta "*remove polygon holes*" de White Tool Box.
26. Importar en GEE y convertir a raster.

Localidades 1980s.

27. Importar a GEE los polígonos de ciudades previamente hechas y convertir a rasters.

Recombinar y filtrar:

28. Importar en GEE las clasificaciones reclasificadas de los sectores interfluviales, valles, depresión.
29. Combinar aquellas en una sola imagen, sumando por último las imágenes binarias de los cultivos y de las arroceras. Al ser últimas en el listado de imágenes, tienen prioridad sobre las otras.
30. Pasar el resultado en un filtro de tipo "*majority*", al igual que al paso 21.
31. Añadir por encima la imagen de localidad creada al paso 27
32. Exportar a QGIS y pasar por la herramienta "*majority filter*" de WBT. Seleccionar un radio de 11 píxeles por 11 píxeles.
33. Recortar la imagen por el polígono de la cuenca del Guayquiraró.

Clasificaciones 2019:

34. Repetir las etapas de 6 a 32 con las imágenes de 2019.

Identificación manual de los campos de arroz:

1. Identificar firmas espectrales a partir del trabajo del INTA (imagen del 26 feb 2020)
2. Identificar a partir del aspecto y la firma espectral zonas de cultivo de arroz en la imagen de 2019. Digitalizar manualmente a escala 1:60 000
3. Importar a GEE, pasar a raster, establecer valor 10
4. Pegar en las clasificaciones.

Luego, los mapeos de coberturas terrestres en los años 1987 y 2019 fueron comparados usando el plugin SCP en QGIS y analizadas en Microsoft Excel.

La imagen de coberturas de 2019 fue separada en archivos *shapefile* propios para cada clase, para así seleccionar precisamente el número de muestras para cada una de ellas. Para no inducir un sesgo en la ubicación de las muestras, se distribuyeron de forma aleatoria en QGIS. Según la superficie y la importancia para los objetivos, se tomaron 40 o 60 muestras por clase. La cobertura terrestre bajo cada punto fue verificada en Google Earth o en Sentinel, estableciendo así la cobertura real.

Validación

Para evaluar la fiabilidad de los mapeos, se procedió a un muestreo de validación de tipo aleatorio estratificado, de 400 puntos sobre la imagen de coberturas terrestres del año 2019, con la cual se formó una matriz de error (Chuvieco, 1991).

Tabla A-IV.2. Matriz de confusión sobre la imagen de coberturas de tierra del año 2019

Clasificación	VH	BC	SS	PS	VE	AS	Ar	OCYB	Total
VH	45	2	7	1	1	3	0	0	59
BC	3	32	2	1	2	0	0	1	41
SS	10	4	43	7	9	0	0	0	73
PS	1	1	5	51	2	3	0	2	65
VE	0	0	0	0	22	1	2	1	26
AS	0	1	0	0	0	32	0	0	33
Ar	0	0	0	0	0	0	37	2	39
OCYB	1	0	3	0	4	1	1	54	64
Total	60	40	60	60	40	40	40	60	400
Exactitud general = 316/400 = 79 %									
Superficie (%)	33,7	5,7	21,6	30,3	1,4	0,8	1	5,3	100
Exactitud ponderada = 78 %									
Exactitud del productor (%)	Error de omisión (%)			Exactitud del usuario (%)			Error de comisión (%)		
VH	75	25	VH	76	24				
BC	80	20	BC	78	22				
SS	72	28	SS	59	41				
PS	85	15	PS	78	22				
VE	55	45	VE	85	15				
AS	80	20	AS	97	3				
Ar	93	8	Ar	95	5				
OCYB	90	10	OCYB	84	16				
Indice kappa = 76 %									

La exactitud general de la imagen de cobertura es de 79 %, la exactitud ponderada de 78 % (el porcentaje de muestreo corroborado ponderado por el porcentaje de superficie de cada clase), el Índice Kappa de 76 %, y a partir del método de Chuvieco (1991), se afirma con un 95 % de certeza que la exactitud general de la clasificación se encuentra entre 77 % y 81 %.

Al comparar las cifras de superficie por clase con el MNC del INTA, se comprobó una cobertura similar de cultivos arroceros: 10.865 ha en el MNC y 9.062 ha en el mapa propio. Sin embargo, existe una diferencia notable comparando la superficie cultivada de soja, maíz y barbecho (38.408 ha) con la superficie de OCyB (50.037 ha).

Espacialmente, las diferencias entre MNC y el mapa propio ocurren principalmente en Corrientes. Esta diferencia se explica por factores metodológicos y elecciones conceptuales.

Primero, el MNC se basa sobre índices verdes que son sensibles a los cambios espectrales, entre septiembre 2019 y mayo 2020, así para detectar los cultivos, superficies con cambios anuales importantes. Sin embargo, los lotes de cultivo en barbecho son tierras que no presentan un cambio espectral importante y de este modo, pueden haber sido subestimadas en el MNC. En efecto, solamente 1187 ha han sido clasificadas como barbecho en el MNC de verano 2020. Esta situación está dada también por diferencias de definiciones sobre el concepto de barbecho. En el cultivo de arroz, es común la rotación de los lotes con ganadería. Esas tierras se encuentran periódicamente en descanso agrícola pero, a largo plazo, son dedicadas a la agricultura. En el análisis propio, fueron clasificadas OCyB, mientras que fueron clasificadas "No agrícola" en el MNC. Tomando en cuenta los objetivos del análisis, incluir las tierras agrícolas temporalmente sin cultivo es lo adecuado.

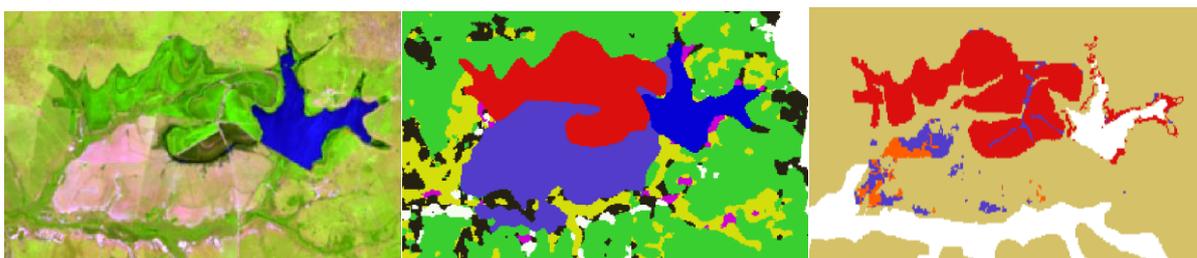


Figura A-IV.2. Diferencias metodológicas sobre el concepto de barbecho. Las tierras en rotación (izquierda, imagen Landsat 8 del 24/12/2019 con combinación B6,B5,B2) fueron clasificadas OCyB en el mapeo propio (centro) y No agrícola en el MNC (derecha)

Segundo, las tierras en barbecho durante el verano no fueron clasificadas en Entre Ríos, lo cual podría explicar en parte las diferencias en superficie.

Tercero, el MNC no considera en la zona del Guayquiraró algunos cultivos que sabemos que están presentes, como el sorgo (Ligier et al., 2001; MAGyP, 2021).

Sondeo de infraestructuras agropecuarias

A través de Google Earth, se consultaron las imágenes satelitales desde 1985 hasta 2019 para coleccionar las posiciones y los años de instalación y desinstalación de los embalses arroceros. En base a imágenes Landsat (Landsat 8, 226/81, 18 de agosto 2019; Landsat 5, 226/81, 8 de agosto 1998; Landsat 7, 226/81, 27 de agosto 2002) se definieron y se aproximaron datos métricos de los embalses¹⁸. Se usaron herramientas de teledetección basados en la banda SWIR2 para definir la superficie del embalse.

Para medir la profundidad máxima del embalse, se sobrepuso el polígono del embalse sobre el MDE. La profundidad máxima se calculó como la diferencia entre la cota máxima de elevación del polígono y la cota mínima de elevación directamente aguas abajo del embalse, es decir, por debajo de la represa. Este método fue confirmado gracias a datos coleccionados en el campo (embalse 7; profundidad máxima real de 7 m, estimado en gabinete de 6 m, embalse 8; profundidad máxima real de 4,5 m, estimado en gabinete de 4 m, embalse 11; profundidad máxima real de 4,5 m, estimado en gabinete de 4 m).

Para aproximar el volumen retenido por embalse, se aplicó el método de aproximación de Irigoyen (2007) según el cual el volumen del embalse es igual a la superficie multiplicada por la profundidad máxima del lago multiplicada por 0,4. No se contaba con datos batimétricos.

Para estimar la superficie de tajamares en la cuenca, se dibujaron en pantalla en GEE usando imágenes Landsat (Landsat 8 del 18 de agosto 2019 y Landsat 5 del 26 de agosto de 1987), en una zona muestra de 46 700 ha representativa de la presencia de tajamares en el RVCE. Se extrapolaron la cantidad y la superficie de tajamar en esta zona a la superficie total del RVCE en la cuenca. Para aproximar el volumen de agua, se utilizó la misma fórmula que las represas arroceras (Irigoyen, 2007). Para la profundidad máxima, se usó para todos los tajamares el valor de 1,5 m estimado a partir de las consultas realizadas con expertos locales como una profundidad máxima representativa.

¹⁸ Se utilizaron imágenes de varios años, ya que algunos de los embalses fueron desinstalados a lo largo del tiempo. Los embalses se encontraban con niveles de agua altos en estas fechas. Los años 2018 y 2019 fueron años normales en términos de precipitaciones.

Detalles metodológicos para los mapeos de coberturas terrestres y los sondeos de infraestructuras agropecuarias.

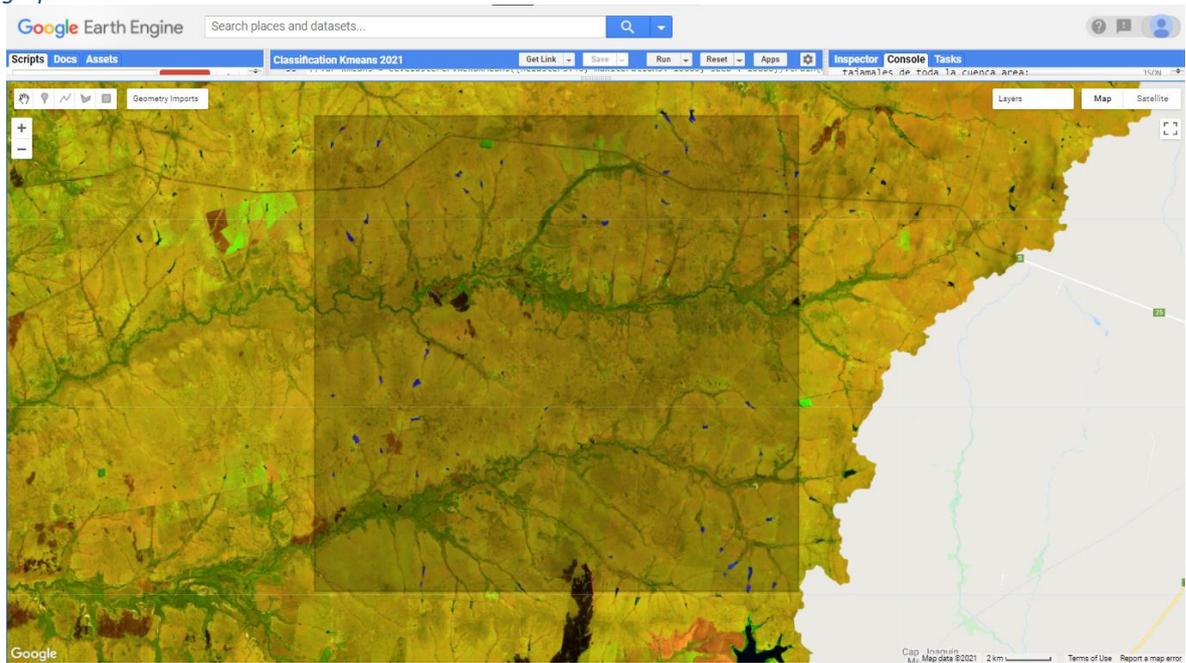


Figura A-IV.3. Zona muestra de la cuenca donde los tajamares fueron dibujados con imágenes Landsat de los años 2019 y 1987.

La información sobre las canalizaciones y los terraplenes fue recolectada y vectorizada a partir de observaciones en imágenes de alta resolución.

ANEXO V

Parámetros suplementarios y calibrados para el modelo SWATParámetros de los manejos agropecuarios

Se estableció la ganadería vacuna extensiva en el modelo en las coberturas de SS, VH y PS. Para el PS, se usó como referencia la carga animal del departamento de Sauce en 2015 (0,8 eq. Vaca / ha) con un consumo de 3.500 kg de biomasa seca para una vaca de 400 kg, ambas referencias específicas de los pastizales de Corrientes (Pizzio et al., 2021). Para la SS y la VH, se optó por la mitad de la carga, es decir, 0,4 eq. Vaca / ha.

Con el fin de simplificar la modelización, se optó por usar un solo patrón de manejo agrícola para toda la superficie de OCyB. Considerando la información proveniente del Mapa Nacional de Cultivos del INTA de 2019 (Abelleyra et al., 2020), según la cual la superficie agrícola en invierno en la cuenca del río Guayquiraró se encuentra predominantemente sin cultivo (37.000 ha sin cultivo contra 12.000 ha con cereal de invierno), se optó por el manejo de campaña de verano de doble cosecha, con siembra directa, sin cultivo de cobertura en invierno (ver Capítulo 4). Las dosis de fertilizantes son de 1 vez por temporada, de 200 kg/ha de nitrógeno y 90 kg/ha de fósforo (información recolectada de agricultores locales). Según este patrón, los campos de cultivo quedan sin cultivo desde junio hasta agosto inclusive.

El manejo de las arroceras se estableció a partir de consultas con productores de Curuzú Cuatiá. Se optó por modelar una rotación de un año de siembra de arroz seguido de dos años de ganadería vacuna con 0,8 vaca/ha. El primer año después de la cosecha de arroz la ganadería aprovecha los rastrojos del arroz y los rebrotes espontáneos de arroz, por lo cual no se siembra pastura. El segundo año después de la cosecha se siembra una pastura. El arroz se fertiliza con 120 kg/ha de un fertilizante NPK 5-30-20 y 200 kg/ha de urea, y la pastura con la mitad de aquellas dosis.

En cuanto a las represas arroceras, se usaron los parámetros establecidos previamente (Capítulo 4). Para los valores de volúmenes promedio diario de agua utilizada en el mes, se usó la relación proporcionada por la arrocera visitada: 12.000 m³/ha de cultivo para toda la temporada (noviembre-diciembre-enero + 5 días de febrero). Se consideró la superficie cultivada como la superficie de arroz cercana al embalse en la clasificación de coberturas terrestres del Capítulo 4.

Los datos precisos utilizados para las represas arroceras se presentan en la siguiente tabla.

Tabla A-V.1. Datos utilizados para las represas arroceras

ID	RES SUB	MORES	IYRES	RES ESA (HA)	RES EVOL (10^4 m^3)	RES PSA (HA)	RES PVOL (10^4 m^3)	RES VOL	RES SED	RES NSED	RES K	WURESN	IRESKO	RES RR	
1		1	1992	198	554	10	10	0	1000		12.5	0.1	7.2	0	0
2		1	1992	84	302	10	10	0	1000		12.5	0.1	2.8	0	0
3		1	1992	111	222	10	10	0	1000		12.5	0.1	2.7	0	0
4		1	1992	192	460	10	10	0	1000		12.5	0.1	4.5	0	0
5		1	1993	25	20	10	10	0	1000		12.5	0.1	0.8	0	0
6		1	1994	82	131	10	10	0	1000		12.5	0.1	1.0	0	0
7		1	1996	208	499	10	10	0	1000		12.5	0.1	6.8	0	0
8		1	1997	97	155	10	10	0	1000		12.5	0.1	1.0	0	0
9		1	1997	280	448	10	10	0	1000		12.5	0.1	3.5	0	0
10		1	1998	168	336	10	10	0	1000		12.5	0.1	6.3	0	0
11		1	1998	372	595	10	10	0	1000		12.5	0.1	7.8	0	0
12		1	1999	115	276	10	10	0	1000		12.5	0.1	0.0	0	0
13		1	1999	225	450	10	10	0	1000		12.5	0.1	7.1	0	0
14		1	2003	158	190	10	10	0	1000		12.5	0.1	3.7	0	0
5		1	2007	107	214	10	10	0	1000		12.5	0.1	2.1	0	0
16		1	2007	90	108	10	10	0	1000		12.5	0.1	1.0	0	0
17		1	2011	141	282	10	10	0	1000		12.5	0.1	3.8	0	0
18		1	2011	363	726	10	10	0	1000		12.5	0.1	8.2	0	0
19		1	2012	297	356	10	10	0	1000		12.5	0.1	10.6	0	0
	SUBBASIN DEL RESERVORIO														
		MES DE PRIMERA INTALACION													
			AÑO DE LA INSTALACION												
				SUPERFICIE CUANDO ESTA LLENO HASTA LOS VERTEDEROS LATERALES											
					volumen necesario para llenar hasta vertederos										
						SUPERFICIE CUANDO ESTA LLENO HASTA EL VERTEDERO PRINCIPAL (usemos un ha más que los vertederos laterales)									
							VOLUMEN NECESARIO PARA LLENAR HASTA EL VERTEDERO PRINCIPAL								
								VOLUMEN INICIAL							
									CONCENTRACION EN SEDIMENTO INICIAL						
										CONCENTRACION EN SEDIMENTOS EN EQUILIBRIO (SOSPENDIDO EN EL AGUA) (mg/L)					
											CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DEL SUELO BAJO EL EMBALSE				
												VOLUMEN DE AGUA PROMEDIO DIARIO UTILIZADO EN EL MES PARA RIEGO (para nov, dec, jan)			
													TIPO DE SIMULACIÓN O MODELACIÓN DE LA REPRESA		
														CAUDAL DE SALIDA PROMEDIO DIARIO	

Parámetros fluviales

Se ajustó el valor de CN para cada cobertura usando de referencia el manual de usuario del HEC-HMS (Feldman, 2000) e Im et al. para las arroceras (2007), además del conocimiento sobre la vegetación de la zona adquirido en las salidas de campo. También, se debe indicar cómo el CN se ve cambiado cuando los manejos agropecuarios modifican la cobertura, por ejemplo, lo que ocurre con las cosechas y rotaciones en las tierras agrícolas.

El “n” de Manning para los cursos de agua representa la resistencia al escurrimiento (Ward y Trimble, 2003). Se ajustaron los valores de n de Manning usando el manual de usuario de SWAT (Arnold et al., 2013).

Para los cauces considerados tributarios por SWAT, es decir, de orden 2, el n de Manning fue aumentado hasta 0.08, el máximo valor para cauces de tipo g (sluggish reaches, weedy, deep pools) según Chow (1959), considerando que los cauces de las cabeceras son particularmente irregulares, discontinuos y frecuentemente bloqueados por amontonamientos de vegetación, derrumbes de las márgenes y tajamares, y además en base a los buenos resultados obtenidos en SWAT al aumentar su valor.

Tujchneider y Fili (s.f. a) y Tuchjneider y Fili (s.f. b) destacaron la presencia cercana a la superficie de dos tipos de acuíferos en la cuenca del río Guayquiraró. El primero, presente en la mayoría de la cuenca, es acuitardo o acuícludo, es decir que tiene una percolación muy lenta o nula. El segundo tiene una permeabilidad vertical en general muy alta y se ubica en los fondos de valles del río Guayquiraró y de algunos tributarios importantes, como por ejemplo el arroyo Mulas. Al este de aproximadamente los 59 W de longitud, se encuentra cercano a la superficie solamente el primer acuífero.

Para obtener mayores detalles sobre el funcionamiento de estos parámetros, se puede consultar la guía de SWAT (Arnold et al., 2013).

Tabla A-V.2. Ajustes de los parámetros de las coberturas terrestres relativos al escurrimiento.

	Base de datos SWAT	Rugosidad (n de Manning)	Número de curva II (CN) (Grupo hidrológico C)
VH	Wetland Forested (WETF)	0.35 (0.05)*	59 (79)
BC	Forest mixed (FRST)	0.30 (0.10)	58 (71)
SS	Forest Evergreen (FRSE)	0.25 (0.15)	61 (74)
PS	Pasture (PAST)	0.15 (0.15)	65 (79)
OCyB (Soja – Maíz – Sin cultivo)	Soybean (SOYB)	0.10 (0.14)	69 (85)
	Corn (CORN)	0.10 (0.14)	67 (83)
	Sin cultivo	0.01	74 (91)
		Promedio: 0.07	
AR (arroz – rastrajos de arroz – raigrás)	Rice (RICE)	0.14 (0.14)	65 (81)
	Rastrojos	0.07	68
	Pasture (PAST)	0.15 (0.15)	66 (79)
		Promedio:	
AS	Water (WATR)	0.01	92 (92)
Lo	Residential Med/Low density (URML)	0.10	60 (72)

*Los valores entre paréntesis son los valores default de SWAT, cuando existen.

Tabla A-V.3. Ajustes de parámetros para los cauces

Cauces	Subcuencas	Ancho (entre márgenes)	Profundidad	N de Manning (pre calibración automática)
Parámetro	-	CH_W2	CH_D	CH_N1 (tributarios) CH_N2 (cauce principal)
De orden 2 (tributarios)	Todas	-	-	0.08
De orden 3 y arroyo Ombucito	Todas las otras	8 m	3 m	0.042
De orden 4 (arroyo Mulas y río Guayquiraró en partes altas)	68-62-60-57-51-28-31-34-32-25-24-21-19-18-14-12-9	20 m	7 m	0.050
De orden 4 (Guayquiraró en partes bajas)	50-47-45-38-30	30 m	7 m	0.060
De orden 5 (Guayquiraró después del arroyo Mulas)	52-54-55	45 m	8 m	0.047

Parámetros calibrados

Tabla A-V.4. Parámetros ajustados manualmente.

Nombre del parámetro	Descripción	Ubicación	Valor default	Valor calibrado
SLSUBBSN	Longitud de la vertiente	.hru	Varios	x 1.2
EPCO		.hru	1	0.95
SFTMP	Temperatura a la cual cae nieve	.bsn	1	-5
PET method	Método para el cálculo de la evapotranspiración potencial	.bsn	Penman/Monteith	Priestley-Taylor
Channel routing	Ecuación de propagación en el canal.	.bsn	Variable Storage	Muskingum
GW_delay	Tiempo del agua en la zona no saturada (días)	.gw	31	150 30*
GW_revap	Coefficiente de movimiento del agua hacia arriba, desde la napa freática hacia el perfil de suelo, permitiendo la evapotranspiración subsecuente.	.gw	0.02	0.27
REVAP_min	Profundidad mínima del agua en la napa freática poco profunda, para que ocurra proceso de "re-evapotranspiración" (ver GW_revap)	.gw	750	200

* Los HRU con suelo Caiman en las siguientes subcuencas: 51, 50, 52, 53, 55, 54, 63, 47, 45, 48, 49, 38, 30

Tabla A-V.5. Parámetros calibrados utilizando SWAT-CUP

Parámetro	Descripción	Valor calibrado manualmente	Método	Rango inicial	Valor calibrado con SWAT CUP
CN2	Número de curva	VH: 59.0 BC: 58.0 SS: 61.0 PS: 65 SOYB: 68.0 Sin cultivo: 73.9 AS: 92 Lo: 76.8 Ar: 64.2	Multiplicar	0.7 – 1.1	VH: 53.5 BC: 52.6 SS: 55.3 PS: 58.9 SOYB: 61.6 Sin cultivo: 67.0 AS: 92.0 Lo: 74.9 Ar: 59.4
CH_N2	N de Manning para los cauces principales	0.057 0.064 0.068 0.082	Multiplicar	0.8 – 1.0	0.91 0.052 0.058 0.062 0.075
CH_N1	N de Manning para los tributarios	0.148	Reemplazar	0.09-0.150	0.112
SURLAG	Coefficiente de retraso del agua	3	Reemplazar	2 - 7	4.5
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible en el perfil de suelo (mm)	IGNACIO: 146,4 ANTONIO: 164,8 CAIMAN: 108,1	Multiplicar	0.75 – 1.25	IGNACIO: ANTONIO: CAIMAN:
SOL_K	Conductividad hidráulica a saturación.	Variable para cada suelo y cada horizonte.	Multiplicar	0.75 – 1.25	
GW_REVAP	Coefficiente de movimiento del agua hacia arriba, desde la napa freática hacia el perfil de suelo, permitiendo la evapotranspiración subsecuente.	0.14	Reemplazar	0.02 – 0.25	0.187
GW_DELAY	Tiempo del agua en la zona no saturada (días)	127.5 (acuitardo) 25.5 (acuifero)	Multiplicar	0.75 – 2	0.66 84.3 (acuitardo) 18.2 (acuifero)
ALPHA_BF	índice de respuesta del	0.048 (default)	Reemplazar	0.02 – 0.25	0.104

Parámetros suplementarios y calibrados para el modelo SWAT

	agua subterránea ante las recargas				
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0.95 (default)	Reemplazar	0.8 – 1.0	1.0

ANEXO VI
Hidrogramas modelados completos

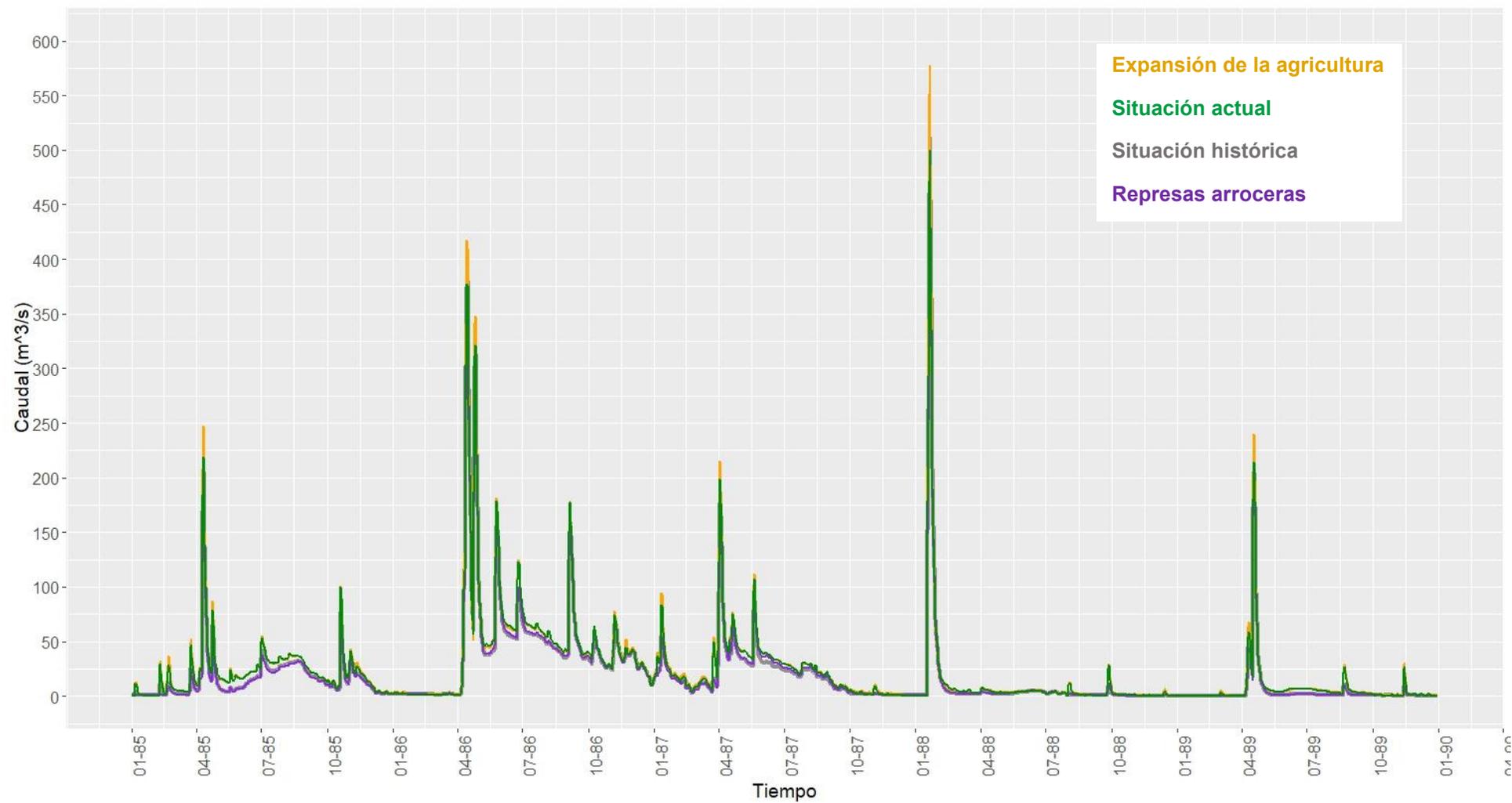


Figura A-VI.1. Hidrograma de caudales simulados, 01-01-1985 – 12-31-1989.

Hidrogramas modelados completos

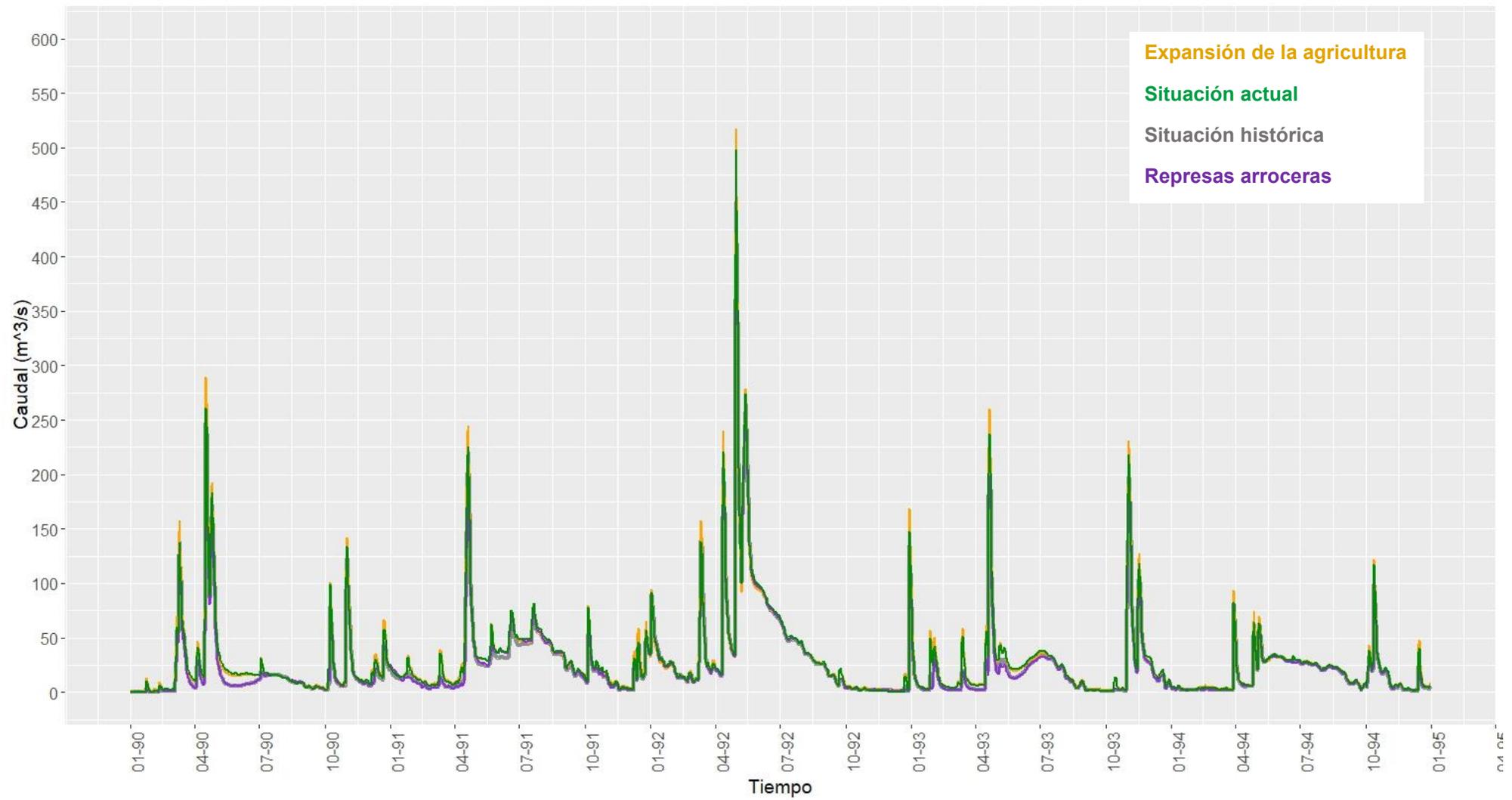


Figura A-VI.2. Hidrograma de caudales simulados, 01-01-1990 – 12-31-1994.

Hidrogramas modelados completos

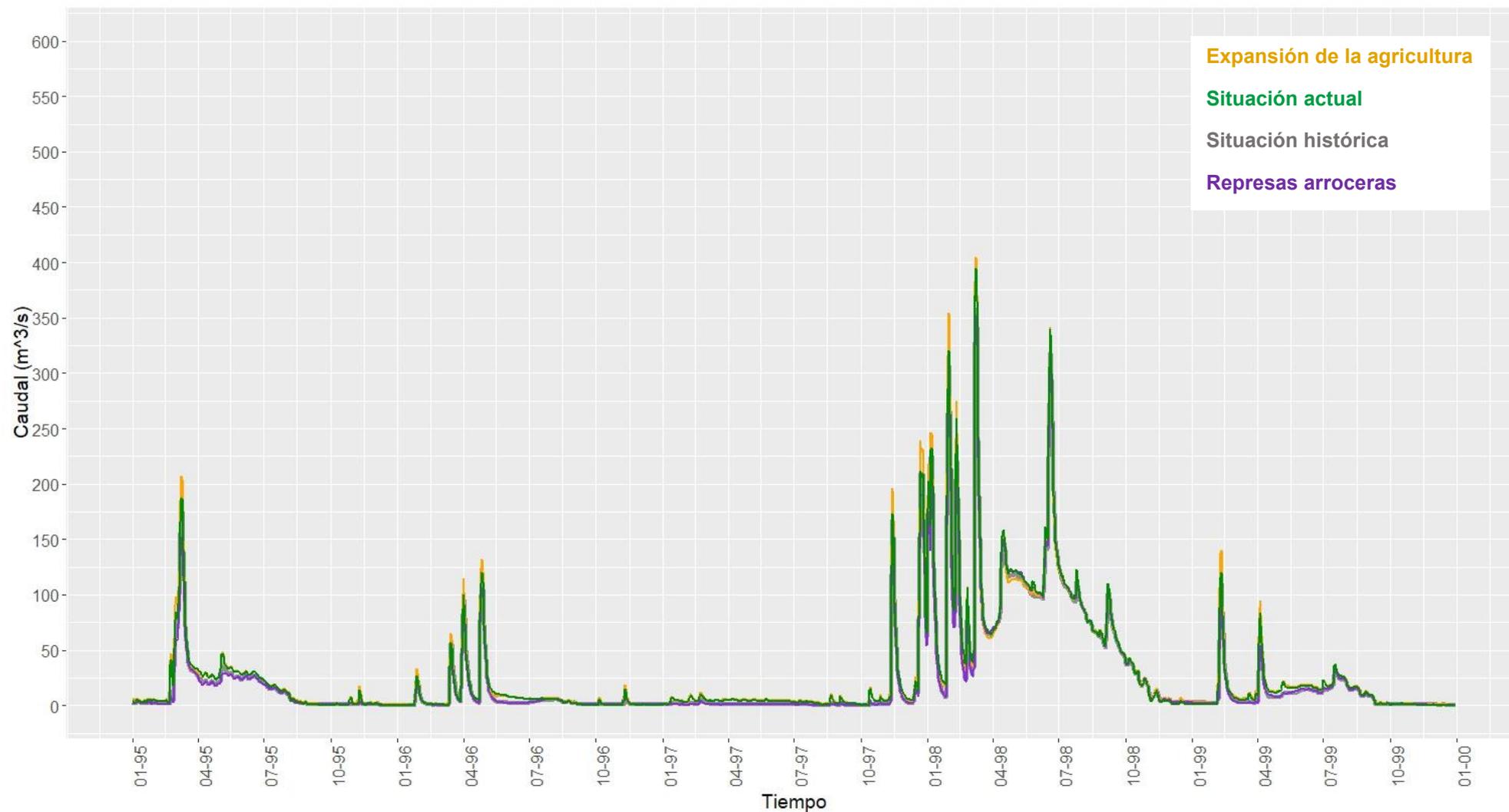


Figura A-VI.3. Hidrograma de caudales simulados, 01-01-1995 – 12-31-1999.

Hidrogramas modelados completos

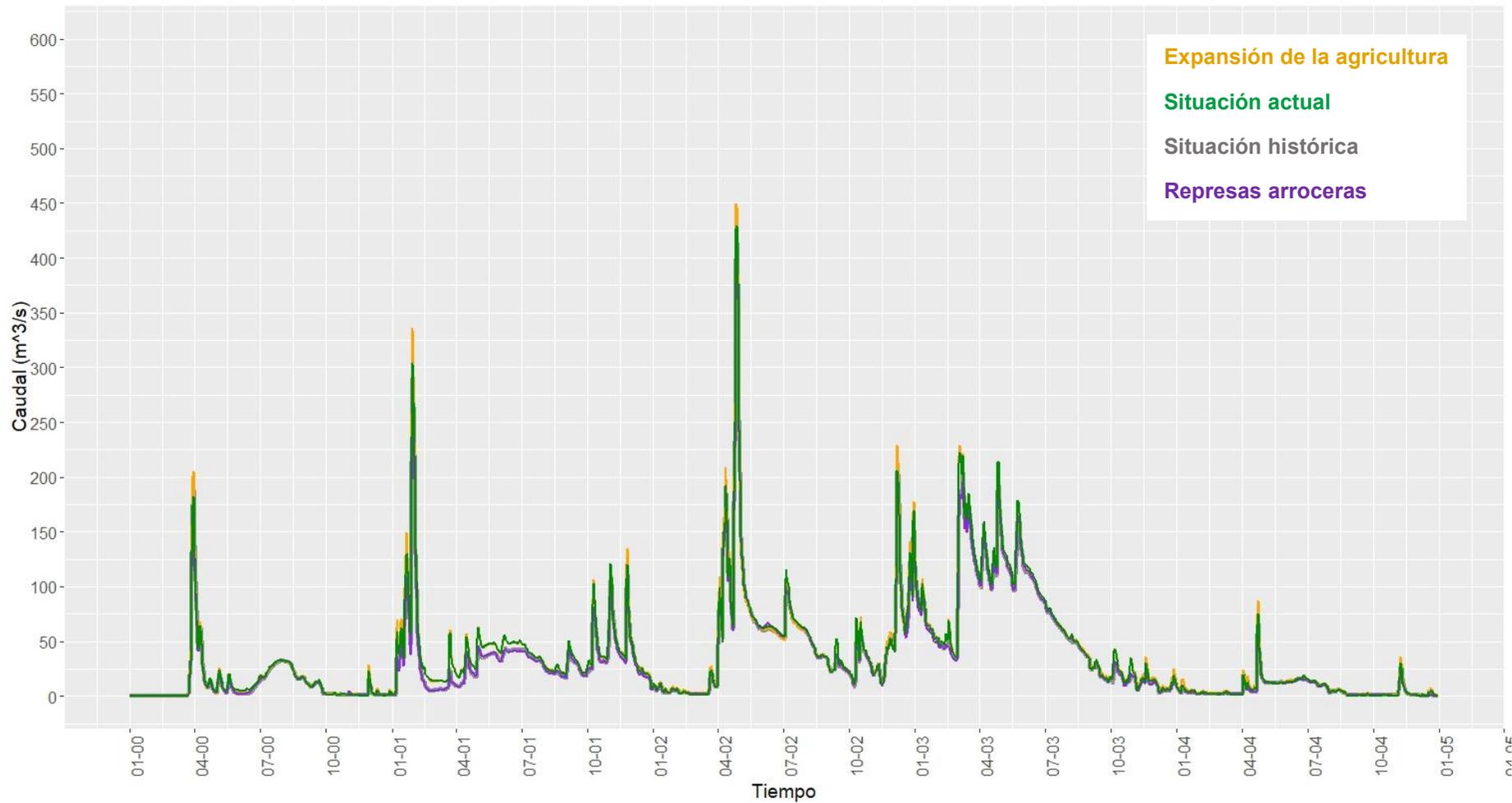


Figura A-VI.4. Hidrograma de caudales simulados, 01-01-2000 – 12-31-2004.

Hidrogramas modelados completos

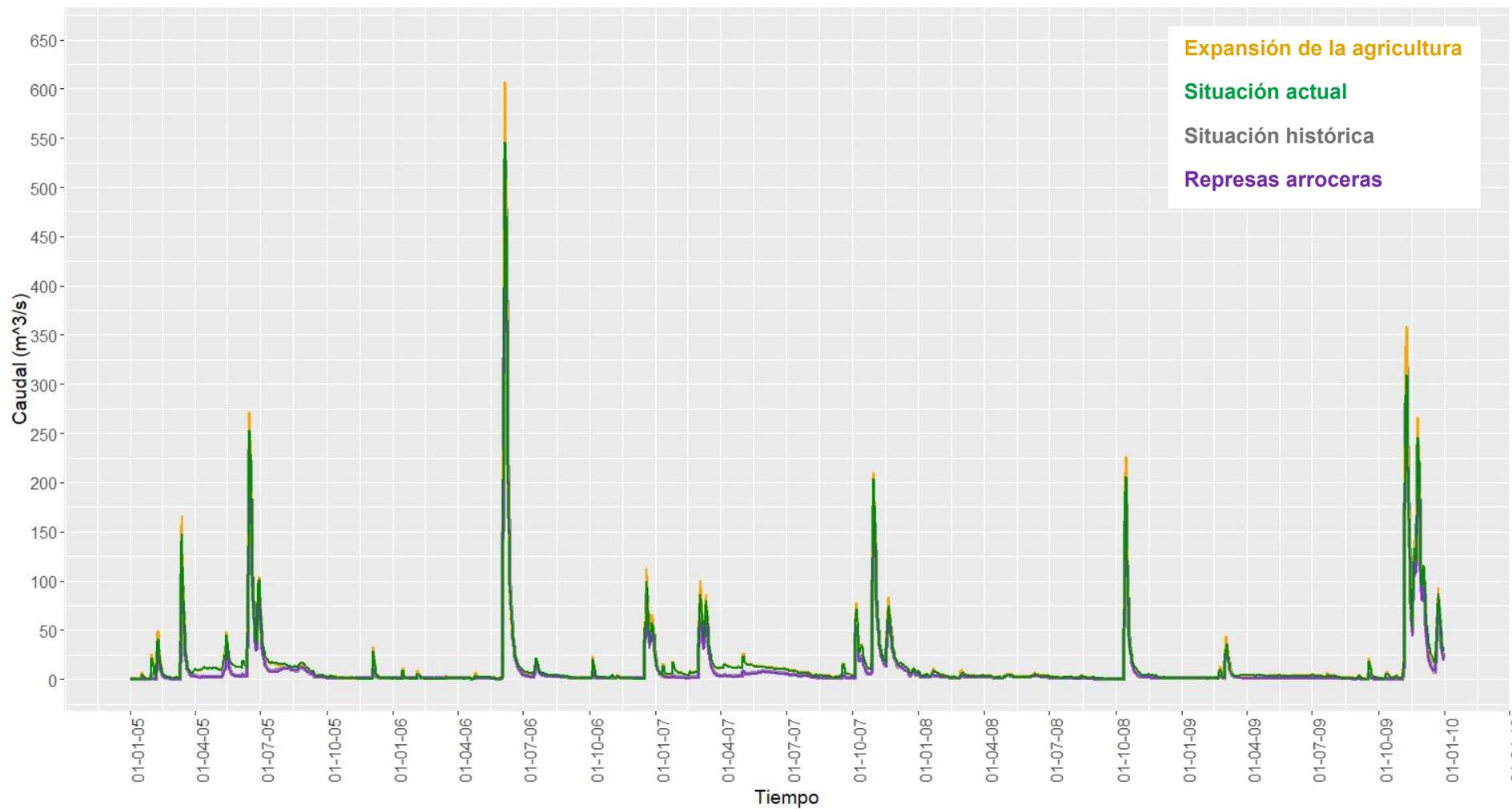


Figura A-VI.5. Hidrograma de caudales simulados, 01-01-2005 – 12-31-2009.

Hidrogramas modelados completos

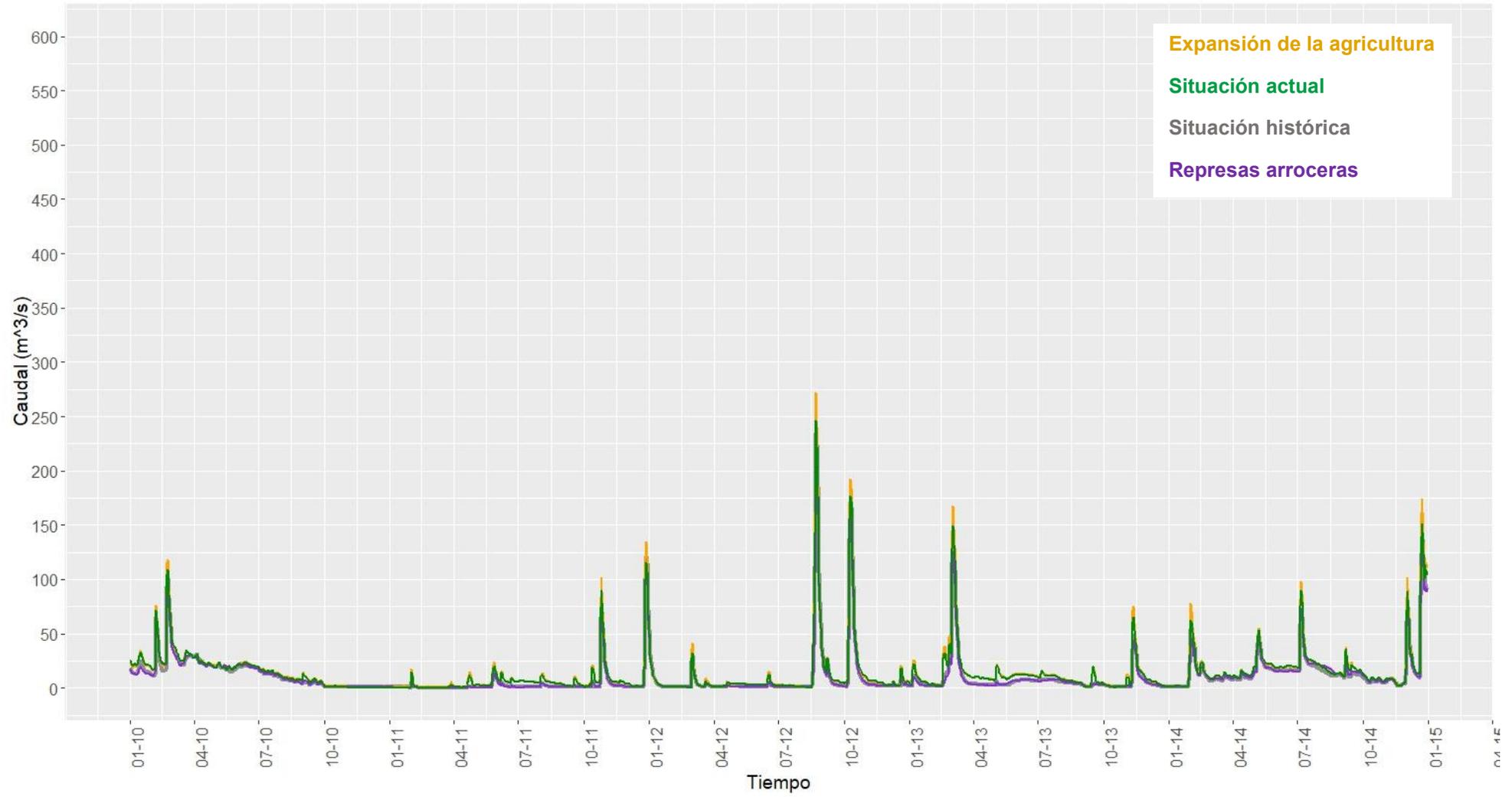


Figura A-VI.6. Hidrograma de caudales simulados, 01-01-2010 – 12-31-2014.

Hidrogramas modelados completos

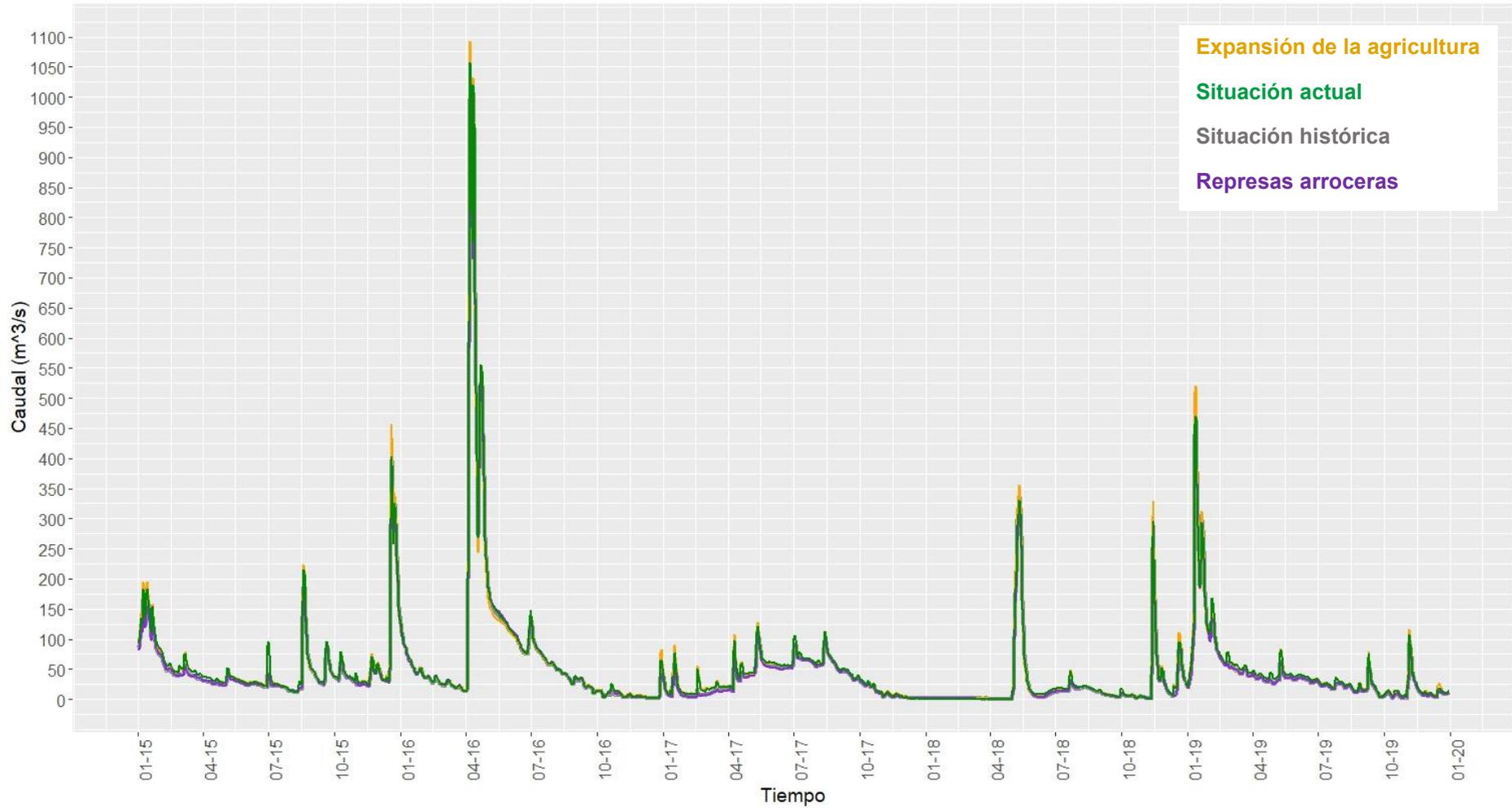


Figura A-VI.7. Hidrograma de caudales simulados, 01-01-2015 – 12-31-2019. *Atender el cambio en la escala vertical

ANEXO VII

Foto aérea del arroyo Capivara y del río Guayquiraró (naciente)

Año 1981, escala 1:50.000

