

**Convenio entre la UdelaR- Facultad de Ciencias
Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales
Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del
Territorio
y la Intendencia Departamental de San José**

**Análisis geoambiental de la cuenca del río San José para diagnosticar
las causas que han generado inundaciones en la ciudad de San José de
Mayo**

MsC Gabriela Fernández, M.A. Feline Schön, Lic. Bernardo Zabaleta

Julio, 2019

Contenido

Resumen	3
Introducción y métodos	3
Área de estudio	5
Caracterización de la cuenca del Río San José.....	5
Resultados.....	7
Caracterización de las subcuencas	7
Cambios de usos del Suelo (periodo 1987 al 2017).....	11
Análisis de relación entre precipitaciones en la cuenca y nivel del R° San José....	14
Subcuencas urbanas	15
Fotointerpretación	17
Arroyo Mallada.....	17
Discusión de resultados	20
Recomendaciones.....	22
Riesgos potenciales	22
Áreas de prioridad de conservación	27
Bibliografía	29
Anexo	30
Morfometría las subcuencas	30
Áreas prioritarias para la conservación	31

FIGURAS

Figura 1: Subcuencas del R° San José y su importancia hídrica.....	7
Figura 2:Subcuenca A°Chamizo.....	8
Figura 3:A° Carreta Quemada	9
Figura 4: cuenca Alta de San José	10
Figura 5: Cuenca del A° San Gregorio.....	10
Figura 6: Clasificación de Usos del Suelo 1987.....	11
Figura 7 : Clasificación de usos del suelo 2017	13
Figura 8: Localización de las subcuencas urbanas	16
Figura 9: Puentes y bañados del A° Mallada	17
Figura 10: Humedales del A°Carreta Quemada	19
Figura 11: Áreas de riesgos frente a eventos de inundaciones.....	20
Figura 12: Usos de suelo	21
Figura 13: Punto del afloramiento	22
Figura 14: Concentración de residuos.....	23
Figura 15: Río aguas abajo de la ciudad de San José	23
Figura 16: Corte del Canal	24
Figura 17: Puente del proyecto By Pass de ruta 11	25
Figura 18: Perfil del bañado	26
Figura 19: Rellenos en el área urbana.....	27
Figura 20: Áreas prioritarias para la conservación	28

TABLAS

Tabla 1: Características paisajísticas	5
Tabla 2: Características de la cuenca R° San José 1987	122
Tabla 3 Características de la cuenca Río San José 2017.....	122
Tabla 4: Tipologías de formas de las subcuencas.....	300
Tabla 5: Clasificación de las formas de los cursos.....	30

Resumen

Este informe presenta los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto “Análisis geoambiental de la cuenca del río San José para diagnosticar las causas que han generado inundaciones en la ciudad de San José de Mayo”. Este proyecto se realizó en marco del Convenio entre la Intendencia de San José (ISJ) y el Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio - Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (LDSGAT- IECA- FC/UdelaR).

El referido proyecto fue ejecutado durante el periodo diciembre 2018 a junio 2019, para lo cual se recopiló información generada por la Intendencia, organismos gubernamentales (INUMET, DINAGUA, INE, SGM) y se utilizaron los bancos de datos de imágenes satelitales (NASA, ESA). El ingreso de la información y procesamiento de datos se realizó desde un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica).

El análisis geoambiental se efectuó a dos escalas, la primera permitió la evaluación del sistema hídrico que incluyó la cuenca del R° San José y una segunda escala donde se analizó a detalle la ciudad San José de Mayo.

De dichos análisis se desprende que las transformaciones territoriales de los últimos años, afectan significativamente la dinámica hidrológica, modificando los tiempos de escurrimiento.

Introducción y métodos

El proyecto tiene como objetivo efectuar el análisis geoambiental de la cuenca del R° San José, que permita establecer los principales factores que intervienen y favorecen los eventos de inundación en la ciudad de San José de Mayo.

La estrategia metodológica se basó en el análisis espacial a través de un Sistema de Información Geográfico (SIG), que permitió analizar la cuenca del R° San José desde el punto de vista hidrológico e identificar los factores que favorecen los eventos de inundación en la ciudad de San José de Mayo. Para ello, se hizo hincapié en las transformaciones de uso del suelo en el periodo 1987-2017.

Como fuente primaria de datos se recopiló el registro de inundaciones del Sistema Nacional de Emergencia (SINAE), el registro del Inventario Nacional de Humedales (DINAMA, 2016), la información del Censo de Población y Vivienda del 2011 (INE, 2011), la serie pluviométrica diaria (1987-2018) de cuatro estaciones meteorológicas (INUMET) y la serie de datos de altura del nivel del R° San José para el

periodo 1987-2018 (DINAGUA). Para el ingreso de la información espacial al SIG se utilizó el sistema de referencia WGS84 UTM 21S. A partir del cual se georeferenciaron las cartas topográficas 1:50.000 del Servicio Geográfico Militar (SGM) y las fotografías aéreas a escala 1:20.000 de la ciudad San José de Mayo (SGM, 1966-1967). Además se ingresaron al SIG la imagen satelital Landsat-5 TM tomada el 25.06.1987 (NASA) y la imagen Sentinel-2 capturada el 10.06.2017 (ESA).

Con el objetivo de analizar las transformaciones en los usos del suelo del área rural de toda la cuenca, durante el periodo 1987-2017, se aplicaron técnicas de percepción remota a partir de imágenes satelitales. Para seleccionar las imágenes, se tomó como criterio la ausencia de precipitaciones en los 15 días previos a la captura satelital y la época de menor productividad vegetal (invierno). La clasificación supervisada de usos del suelo se realizó mediante el método de distancias mínimas, donde se consideraron 5 clases (bosque nativo y forestación, suelos desnudos, cultivos, pastizales e infraestructura) que fueron verificadas en campo. Posteriormente se compararon las variaciones en las superficies de cada clase.

Con el fin de comprender la relación infiltración/escorrentía en la cuenca del R° San José se trabajó a tres niveles. En primer lugar, se verificó el aumento en la frecuencia de eventos de crecidas del R° San José. En segundo lugar, se analizaron las series pluviométricas con el objetivo de identificar posibles tendencias crecientes de precipitaciones durante el periodo 1987-2018. Por último, se correlacionaron ambas variables en tres cortes temporales (1987-1996, 1996-2005, 2005-2018) que permitió establecer el tiempo de respuesta del río respecto a las precipitaciones en la cuenca.

Por su parte, el área urbana fue analizada mediante fotointerpretación de un mosaico de 12 fotografías aéreas a escala 1/20.000 (SGM, 1966). Estas imágenes son las más antiguas accesibles, que cubren el área urbana y suburbana de la ciudad de San José de Mayo. Dicho análisis permitió identificar las formas de relieve de cuatro redes hídricas que cruzan la ciudad de San José y del R° San José, zonas urbanas con distintos riesgos de inundación y las principales intervenciones urbanísticas. Para la comparación de la información territorial urbana se utilizó Google Earth.

La fotointerpretación permitió reconocer terrazas, planicies de inundación, albardones, así como definir zonas bajas y altas de la ciudad para generar categorías de riesgo frente a eventos de inundaciones. Esta información se verificó en campo.

El presente trabajo pretende aportar información para la toma de decisiones en la planificación del uso del territorio. En este sentido, se identificaron riesgos potenciales

que podrían incrementar los efectos de las crecidas en el área urbana, para lo cual se realizó el análisis de los posibles impactos de los nuevos proyectos de infraestructura a instalarse próximamente en el entorno urbano. Asimismo, se plantean recomendaciones que apuntan a disminuir los eventos de crecidas que generan inundaciones.

Área de estudio

La cuenca del R° San José nace en el departamento de Flores, está situada principalmente en el departamento de San José, integra la macrocuenca del R° Santa Lucía, abarca una extensión aproximada de 3567 km², el curso principal alcanza una longitud aproximada de 180 km, su altura máxima (200 m) se ubica al oeste de la cuenca en la Sierra de Mahoma y la mínima (3 m) en la confluencia con el R° Santa Lucía. En su cuenca se encuentran 11 localidades, San José de Mayo, Ismael Cortinas, Rodríguez, Puntas de Valdez, Mal Abrigo, Raigón, Juan Soler, Villa María, Cañada Grande, San Gregorio, Carreta Quemada. En el año 2011 su conjunto concentraba más del 50% de la población departamental (INE, 2011).

Caracterización de la cuenca del Río San José

Tabla 1: Características paisajísticas

Unidad de paisaje	%
Colinas y lomadas cristalinas	64,5
Colinas y lomadas sedimentarias	1,5
Llanuras y planicies fluviales	8
Lomadas sedimentarias	23
Sierra Mahoma	3
Total	100

Fuente: Achkar et al. 2013

De acuerdo a las características físicas de la cuenca, se pueden identificar a nivel general distintas unidades paisajísticas: el 64,5% de la cuenca se caracteriza por colinas y las lomadas cristalinas, el 1% corresponde a colinas y lomadas sedimentarias, mientras que las lomadas

sedimentarias únicamente ocupan el 23%, por su parte las llanuras y planicies fluviales ocupan un 8% y la Sierra de Mahoma un 3% del territorio (Tabla I). Cada una de ellas presenta determinadas geoformas, así como diferentes tipos de suelos y ecosistemas asociados.

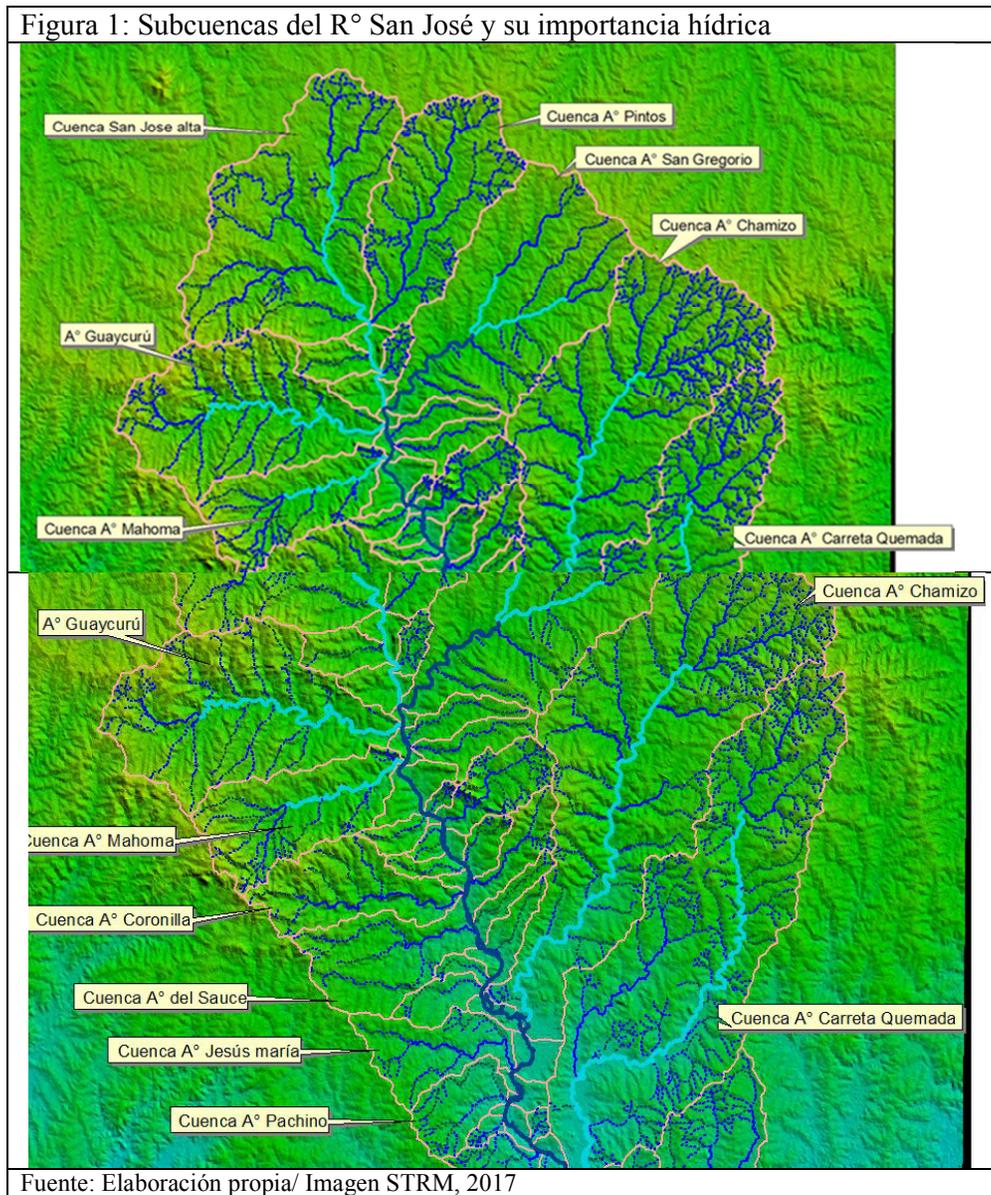
En la cuenca se desarrollan diversas actividades productivas. Donde se destacan principalmente los rubros de lechería y agricultura de secano, favorecidos por la

presencia de suelos de profundidad media a alta de buena fertilidad. Así mismo en los últimos años se incrementó el número de agroindustrias, como establecimientos de engorde de ganado a corral, frigoríficos e infraestructuras vinculadas a la producción cerealera (silos), ubicados en zonas urbanas y sub-urbanas. Se destaca también la presencia de proyectos mineros en distinta fase de desarrollo, principalmente asociados a la extracción de áridos.

Resultados

Caracterización de las subcuencas

La Cuenca del Río San José ocupa una superficie de 3564,74 Km² cuyo curso principal se extiende aproximadamente 180 km; el relieve de la cuenca se caracteriza por colinas de pendientes fuertes al norte, lomadas redondeadas de pendientes moderadas a suaves en el centro sur, cuenta con importantes planicies fluviales asociadas a bañados permanentes y estacionales.



Para este trabajo se conforma por más de cuarenta subcuencas, para el informe se analizaron veintidós subcuencas cuyas superficies cubren entre 30 a 500 km² aproximadamente.

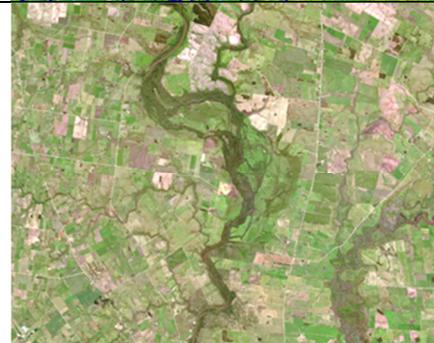
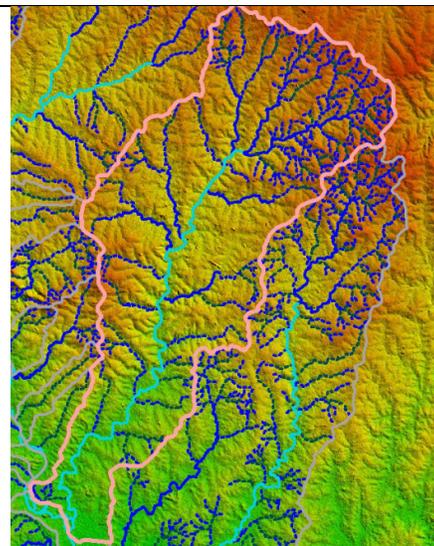
A las subcuencas seleccionadas se le aplicaron índices de formas de las subcuencas e índices de canal. A partir de lo cual se obtuvo que 18 de las subcuencas analizadas, presentan formas alargadas a ligeramente alargadas (Fig. 1). De la bibliografía consultada, se desprende que las cuencas más alargadas tienden a una respuesta más difusa, en comparación a las respuestas de tormentas con altos caudales en las cuencas compactas (redondeadas).

En la cuenca se distingue dos subcuencas de aproximadamente 500 km², la subcuenca de A° Chamizo y la subcuenca del A° Carreta Quemada.

La primera subcuenca del A° Chamizo (Fig 2), abarca una superficie de 490 km² con un curso principal abarca aproximadamente 55 km, cuya cota máxima supera los 160 m y la cota mínima es de 30 m, con una pendiente media de 2.36 m/m. En el extremo norte de la cuenca, se originan tres subcuencas de orden 4 que forman el curso principal del A° Chamizo (cañada del Infierno, cañada de la Hoja y el A° Chamizo). Desde las nacientes a 160 m hasta la cota 90 m, los tres cursos recorren aproximadamente 15 km, con pendientes medias de 5 m/m.

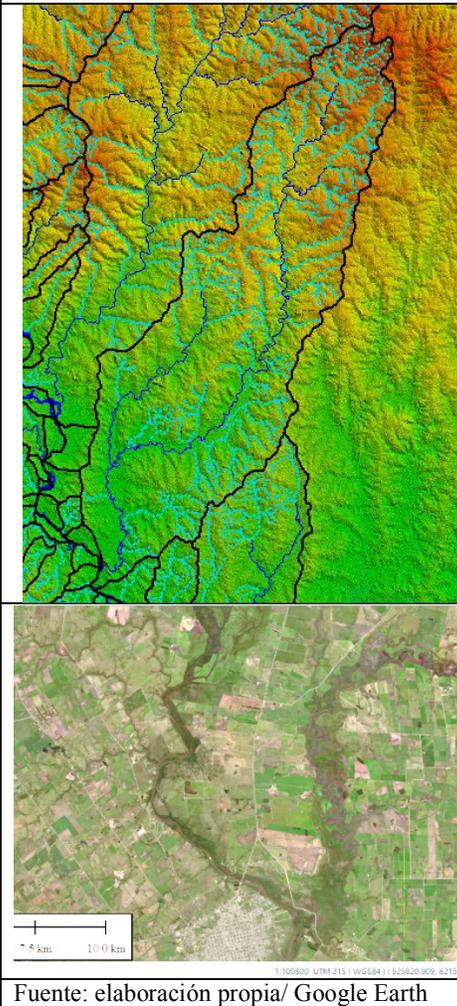
En la confluencia de los tres cursos, el A° Chamizo pasa a orden 5 y recorre hacia el sur 45 km hasta la unirse con el R° San José) pendiente de 1.2 m/m. En la desembocadura se forma un importante humedal que cubre aproximadamente 12 km², el cual en este informe se le denomina “Chamizo”, regula el caudal del arroyo aguas abajo.

Figura 2: Subcuenca A° Chamizo



Fuente: elaboración propia/ Google Earth

Figura 3: A° Carreta Quemada



Fuente: elaboración propia/ Google Earth

La Subcuenca del A° Carreta Quemada abarca una superficie de aproximadamente 469 km², mientras que el curso principal recorre aproximadamente 80 km. La cuenca se caracteriza por su forma alargada, cuya cota máxima alcanza los 170 mts, mientras que la mínima es de 30m. Desde las nacientes hasta la cota 80m, se entallan dos subcuencas de orden 4, que aportan al curso principal, el relieve presenta pendientes de 5% (Fig. 3).

El curso principal alcanza orden 5 a lo largo de aproximadamente 60 km, donde la pendiente del canal es de 0.83 m/m.

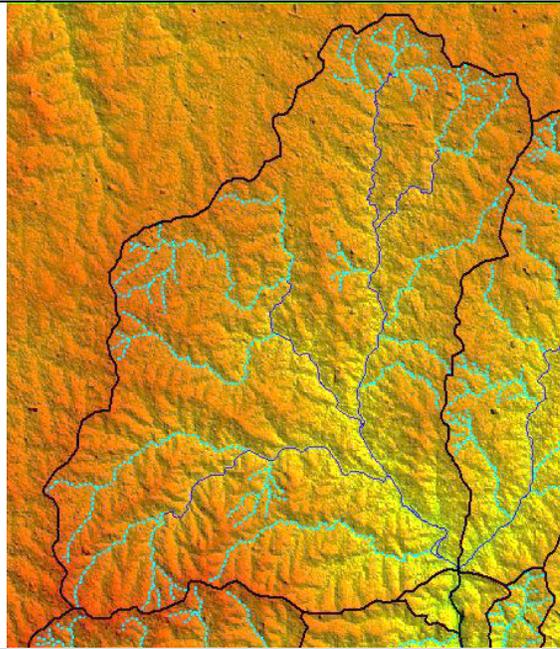
El canal principal forma desde la cota 50m a la confluencia con el R° San José desarrolla una planicie alargada de 25 km de largo, cuyo ancho promedio es de 100 m.

La desembocadura del A° Carreta Quemada, se ubica a la misma latitud de la ciudad de San José de Mayo, afectando directamente la descarga fluvial a la ciudad, que

da origen al humedal que se ubica al este, que se ensancha al sur de la Ruta N° 11.

Otras dos subcuencas de menor extensión superficial, aportan los mayores volúmenes de caudal desde el extremo norte de la Cuenca del R° San José, que corresponden a la Cuenca Alta del R° San José y la Cuenca A° San Gregorio. En ambos casos las superficies abarcan aproximadamente los 300 Km² y en ellas se localizan las mayores altimetrías.

Figura 4: cuenca Alta de San José



La cuenca Alta del San José abarca una extensión de 343 Km², con un cauce principal de 42 km, que desagua hacia el sur. Por su forma, es la cuenca de mayor circularidad (Fig. 4). Desde sus nacientes se entallan cuatro subcuencas de orden 4, con pendientes fuertes. La cota máxima es de 170 m y la mínima es de 60 m.

La pendiente del curso principal desde la cota de 170 m a la cota 110m, es de 1.45m/m. Mientras que la pendiente promedio de la cuenca es de 1.8 m/m.

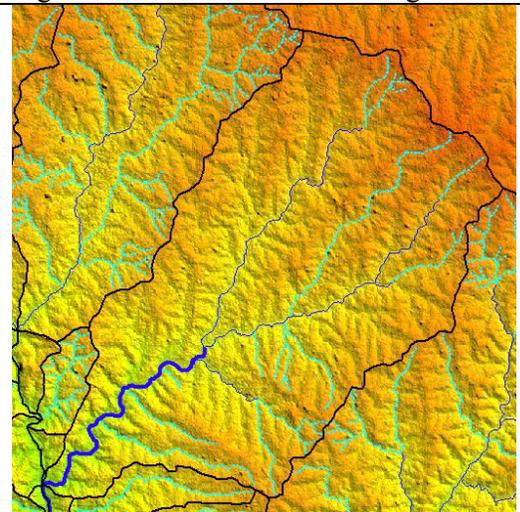
Esta cuenca no presenta humedales como las dos anteriores, pero sí presenta menor tiempo de concentración, Esto se relaciona con la forma casi circular, que favorece la escorrentía en eventos de lluvias intensas. En el punto de confluencia con el A° Pintos el curso se transforman a orden 6.

La cuenca del A° San Gregorio es la de mayor orden jerárquico, alcanzando el orden 6 a menos de 20 km de las nacientes. En la cuenca alta que se localiza entre las cotas 160 y 100, los cursos se extienden por 10 km, conformando pendientes de 6m/m (Fig. 5).

A partir de la cota 80 m, la red hídrica concentra dos redes hídricas, se forma un curso de orden 6.

Entre las subcuencas San Gregorio, A° Pintos y la cuenca Alta de San José, concentran cursos hídricos de alto caudal.

Figura 5: Cuenca del A° San Gregorio



Cambios de usos del Suelo (periodo 1987 al 2017)

Los resultados obtenidos sugieren que hubo una transformación en el uso del suelo, principalmente asociada a la expansión de monocultivos cerealeros y a la disminución de áreas destinadas a pastizales mejorados y praderas para la actividad ganadera-lechera. Esta transformación viene acompañada de cambios en el paquete tecnológico aplicado, donde se destaca la incorporación de la técnica de siembra directa.

Figura 6: Clasificación de Usos del Suelo 1987

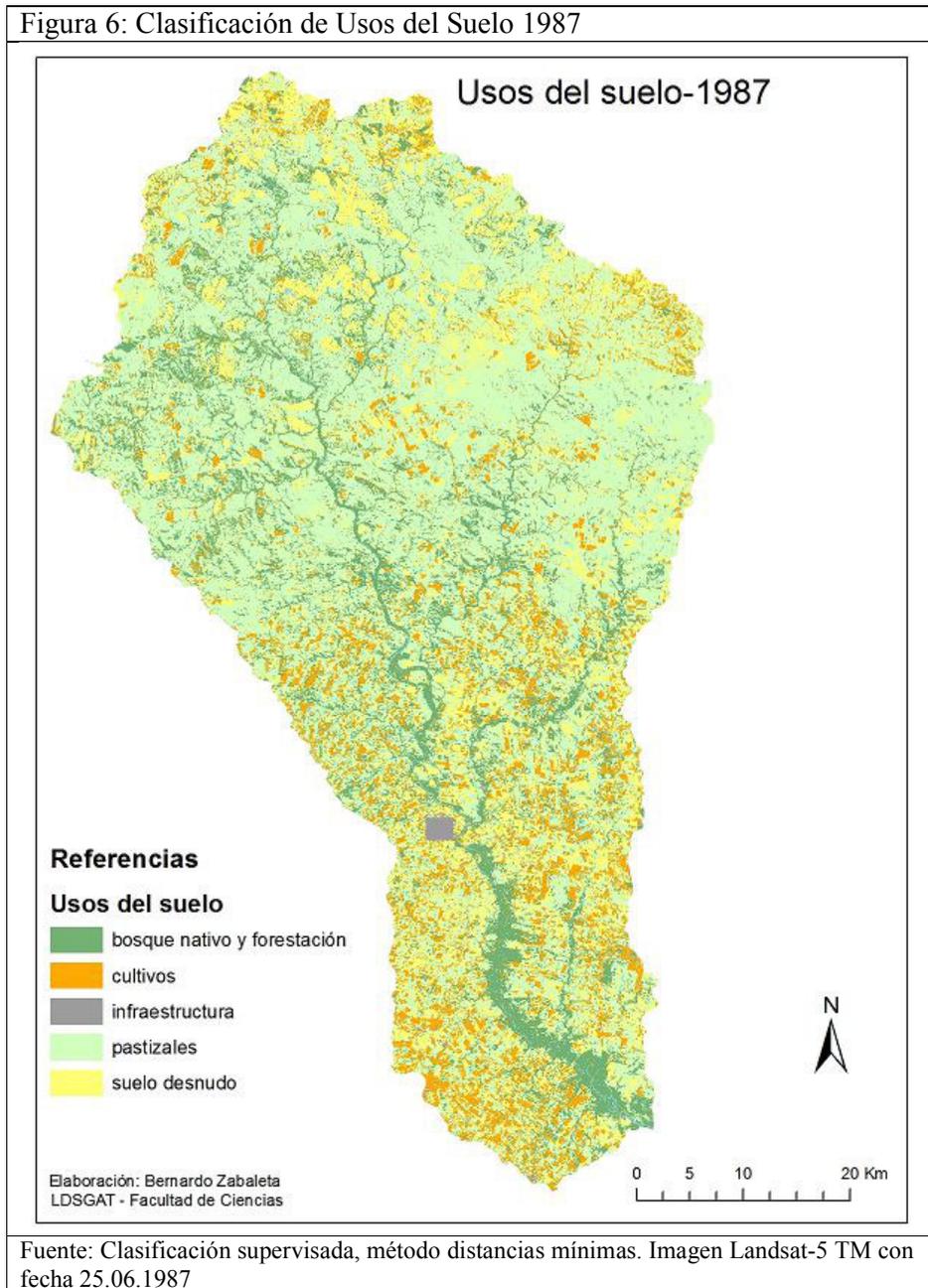


Tabla 2: Características de la cuenca R° San José 1987

Característica	%
Forestación y bosque nativo	14
Cultivo	2
Suelo desnudo	12
Rastrojo	11
Cuerpos de agua	1
Pastizales y praderas	59
Infraestructura	1
	100

Fuente: elaboración propia en base: Landsat 5, nivel 1, 25.06.1987

En el año 1987 (imagen Landsat con fecha 25/06/1987) los pastizales y praderas predominaban en el uso del suelo de la cuenca del R° San José, cubrían aproximadamente el 59% de la superficie total (356.724 ha), asociados a la producción forrajera. Por su parte, el área destinada a cultivos cubría un 25%, se distinguen tres estadios, donde el 2% fue clasificado como cultivos, el 12% como

suelos desnudos y el 11 % como rastrojo (Tabla 2). Por otro lado, los bosques nativos, chilcales y forestación ocupaban un 14% de la cuenca. Mientras que los cuerpos de agua (ríos, arroyos, embalses, tajamares) representaban el 1% al igual que la infraestructura (1%), esta última incluye áreas urbanas consolidadas y dispersas, así como también la caminería (Fig. 6).

Al año 2017, el uso del suelo predominante son monocultivos cerealeros (soja, maíz, sorgo) que cubren aproximadamente el 43% de la superficie, esta categoría está integrada por suelos cultivados (8%), suelos desnudos (35%) y no se detectó rastrojo. La categoría pastizales y praderas redujo su extensión en comparación al año 1987, ocupando un 33% de la cuenca (Tabla 3). Por su parte,

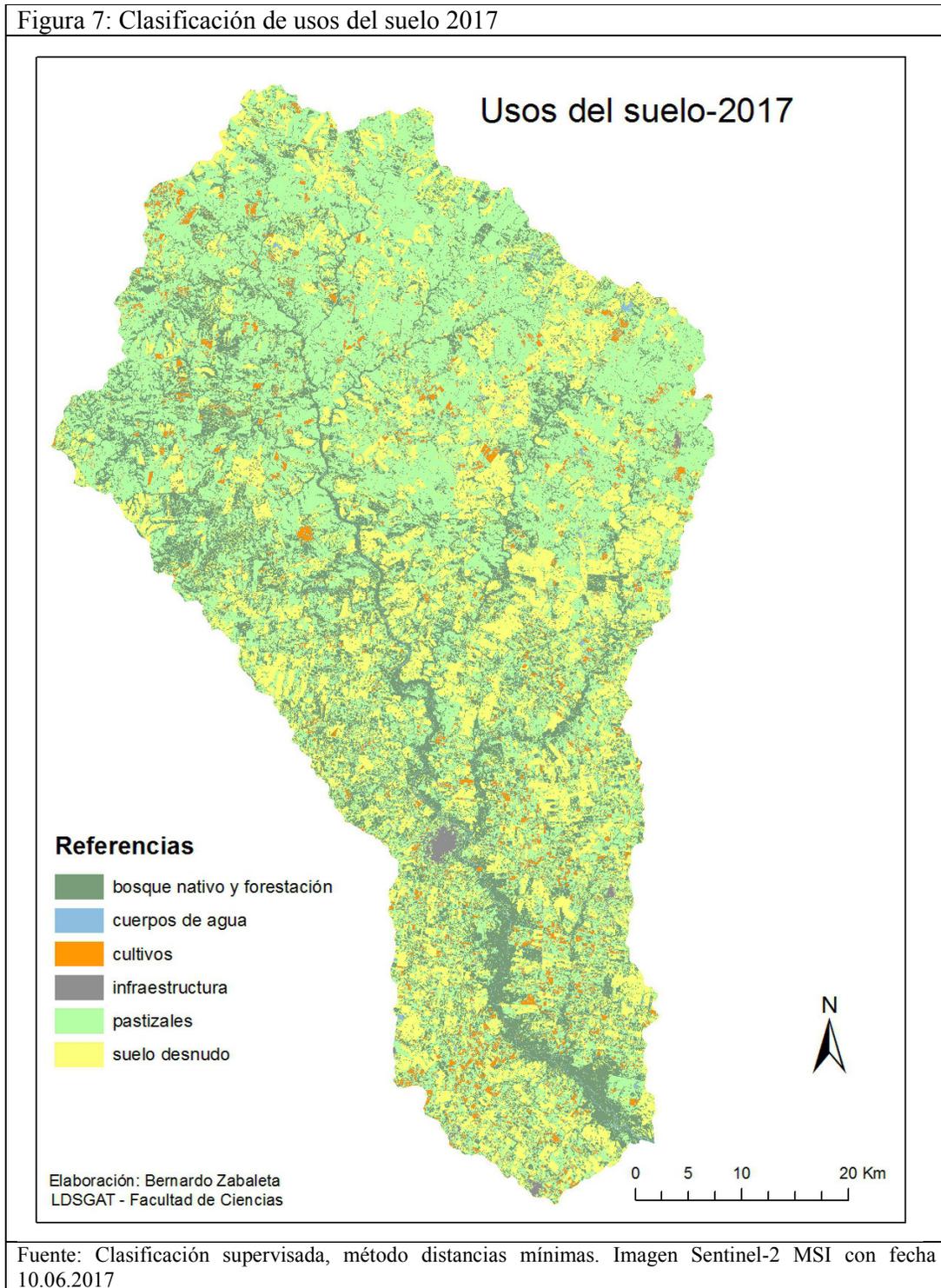
Tabla 3: Características de la cuenca Río San José 2017

Característica	%
Forestación y bosque nativo	14
Cultivo	8
Suelo desnudo	35
Chilcal	8
Cuerpos de agua	1
Pastizales y praderas	33
Infraestructura	1
	100

Fuente: elaboración propia en base: Landsat 5, nivel 1, 25.06.1987

los bosques nativos y la forestación cubren el 14%, mientras que los chilcales el 8%. Por lo tanto, se observa una disminución del bosque nativo, respecto al año 1987. Esto se explica porque en la clasificación de 1987 la categoría chilcal formaba parte del uso bosque nativo y forestación, debido a que la resolución espectral y espacial de la imagen no permitía su separación. Los bosques nativos son mayoritariamente ribereños y serranos (Fig. 7). Por su parte, los cuerpos de agua y la infraestructura no mostraron diferencias en su superficie (Tabla 2 y 3).

Figura 7: Clasificación de usos del suelo 2017



Análisis de relación entre precipitaciones en la cuenca y nivel del R° San José

A partir del análisis de los tres períodos de la serie de niveles del R° San José, se observa el incremento en la frecuencia de eventos con valores mayores a 5 m. Donde se constata que en el período 1987-1996 se produjeron 2 eventos >7 m y 17 5-7 m, en el período 1996-2005 fueron 6 eventos >7 m y 46 5-7 m, mientras que en el último período (2005-2018) se produjeron 30 eventos >7 m y 60 entre 5 y 7 m.

Una vez identificada la tendencia creciente de eventos extremos, se evaluó la posibilidad de que responda a un incremento en el régimen de precipitaciones. En este sentido, se calculó la precipitación acumulada mensual de la serie 1987-2018 y se realizó el test Mann-Kendall, el cual ha sido utilizado para evaluar tendencias en series de tiempo hidrometeorológicas (Hirsch y Slack 1984). Dicho análisis no detectó ninguna tendencia significativa, por lo tanto, se descarta la posibilidad de un aumento en las precipitaciones en los últimos treinta años.

Por otro lado, se realizó para los tres períodos separados el test de ANOVA no paramétrico Kruskal-Wallis (Legendre y Legendre 1998) el cual detecta diferencias significativas a partir de la mediana de la serie de datos. Si bien no se identificaron diferencias para los tres períodos, se observaron a partir del test Mann-Whitney diferencias significativas a nivel espacial en el período 1996-2005 entre las estaciones Juan Soler-25 de Agosto ($p < 0,05$; $U = 4916$) y Juan Soler-Trinidad ($p < 0,05$; $U = 4714$), lo cual se corresponde con las ubicadas a mayor distancia.

A partir de los análisis estadísticos mencionados se entiende que no existen cambios temporales ni tendencias en los regímenes de precipitación. Por lo tanto, para los datos utilizados se descarta que las variaciones climáticas expliquen el aumento en los niveles del río.

Con el fin de establecer la relación entre las precipitaciones y los niveles del río, se realizaron correlaciones no paramétricas de Spearman (Legendre y Legendre 1998). Donde se analizaron los niveles del río correspondientes a los 7 días posteriores a los eventos de precipitación.

En el período 1987-1996 no se observaron correlaciones significativas hasta el tercer día posterior a la precipitación, donde se destaca la asociación identificada con las precipitaciones registradas en Juan Soler ($p < 0,001$; $R_s = 0,71$). Cabe destacar que la correlación se mantuvo significativa durante 6 días, por lo tanto, se asume que la dinámica fluvial asociada a eventos de precipitación tiene una duración de 6 días.

En el período 1996-2005 se observaron asociaciones significativas al segundo día posterior a los eventos de precipitación. Se evidenció un incremento en la magnitud de la correlación en Juan Soler con respecto al primer período ($p < 0,001$; $R_s = 0,81$). En este período, todas las estaciones se correlacionaron significativamente ($p < 0,001$). Por otro lado, la dinámica fluvial asociada a eventos de precipitación tiene una duración de 4 días.

Por último, en el periodo 2005-2018 se intensifica la respuesta del nivel del río ante los eventos de precipitación. Donde se observa una reducción en el tiempo de respuesta, que pasa a 1 día después de producida la precipitación en todas las estaciones registradas. La mayor correlación entre niveles y precipitación, continuó siendo en Juan Soler ($p < 0,001$; $R_s = 0,83$), seguida por 25 de Agosto ($p < 0,001$; $R_s = 0,81$). En este período la dinámica fluvial asociada a eventos de precipitación también tiene una duración de 4 días.

Los resultados obtenidos del análisis de correlación sugieren que la respuesta del nivel del río ante las precipitaciones del periodo 2005-2018 es más inmediata y lineal que en los períodos 1987-1996 y 1996-2005. Lo cual se podría asociar a un aumento en la velocidad de escurrimiento superficial en toda la cuenca.

Subcuencas urbanas

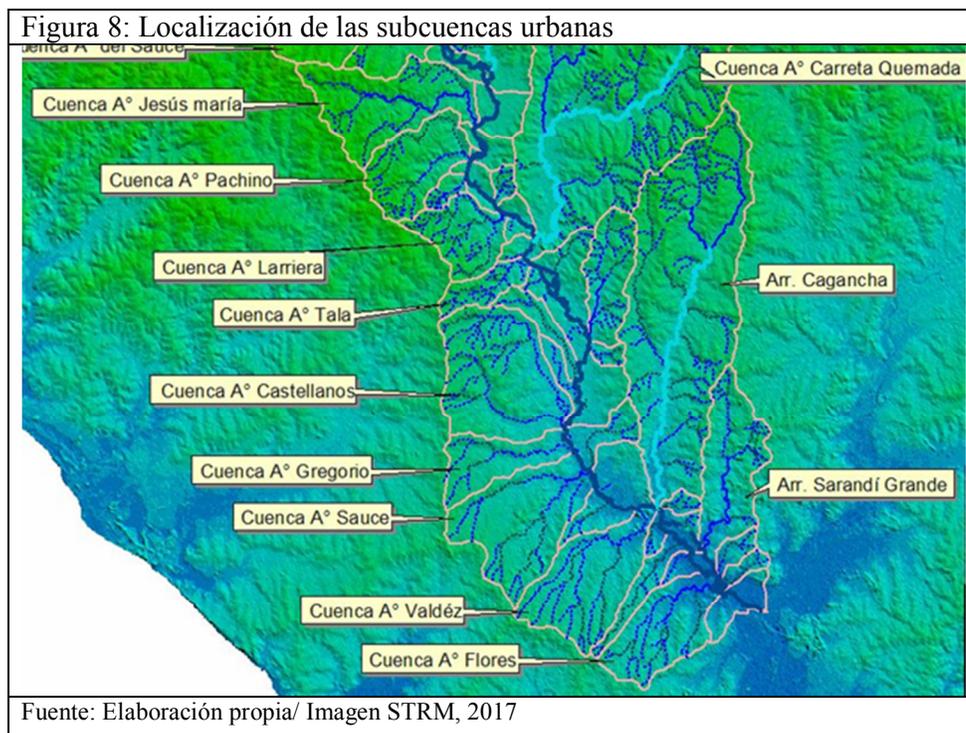
La estructura urbana de San José de Mayo se localiza entre dos cursos fluviales, el R° San José y el A° Mallada. Y se encuentra rodeada de áreas planas inundables. Según el registro nacional de humedales, el 46,8% de la superficie urbana se encuentra en áreas bajas (DINAMA, 2016). En 2011 se registraron 36.743 habitantes en la ciudad San José de Mayo (INE, 2011), de las cuales 4.018 se localizan en áreas inundables.

El área de las cuencas urbanas comprende una superficie de 5.442 ha, caracterizada por lomadas y llanuras de bajas pendientes, donde la mayor cota topográfica es de 80 m y la menor de 20 m. Se constituye por las microcuencas de los arroyos LARRIERA (superficie 1.266 ha; jerarquía 4), Rocho (superficie 577 ha; jerarquía 2), Mallada (superficie 999 ha; jerarquía 3) y del Tala (superficie 1.437 ha; jerarquía 3), como por redes de drenaje menores insertas en la trama urbana y suburbana, que desaguan directamente al R° San José.

Los suelos predominantes en las microcuencas urbanas son vertisoles y brunosoles pertenecientes al grupo CONEAT 10.8b. Ocupan aproximadamente el 46 % de la superficie y sobre él se ubica la mayor parte del área urbana. Son de fertilidad alta

y drenaje moderado, el material geológico corresponde a depósitos sedimentarios limo-arcillosos. Le siguen los vertisoles y brunsoles del grupo 10.8a (23%), asociados a depósitos sedimentarios limo-arcillosos, de fertilidad alta, drenaje moderado y pendientes entre 1 y 6%. Por otro lado, los brunsoles del grupo 5.02b con inceptisoles y gleysoles asociados, representan un 22% de la superficie, son de fertilidad media, buen drenaje, y se encuentran en zonas de colinas con las mayores pendientes del área urbana y sub-urbana.

Con el fin de identificar la presencia y extensión de humedales en las microcuencas asociadas al área urbana (Fig. 8), se realizó una clasificación supervisada de usos del suelo, a partir de una imagen Sentinel-2 con fecha 03/10/2018. Esta fecha fue seleccionada de acuerdo a las precipitaciones ocurridas los 15 días previos al pasaje del satélite. Los usos predominantes fueron pastizales y praderas (52%), seguidos por suelos desnudos (15%) asociados al manejo de áreas de cultivo y en su mayoría detectadas como inundables. Mientras que, los cultivos representaron un 13%, seguidos por humedales (8%), zonas urbanas (7%) y bosques (4%). La clasificación realizada permitió detectar amplias superficies de baja pendiente cubiertas por suelo desnudo destinadas a cultivos, que son momentáneamente inundables y conservan volúmenes importantes de agua durante varios días luego de eventos de precipitación.



La subcuenca del A° Mallada presentó el mayor grado de urbanización (13%), lo cual podría determinar una mayor velocidad de escurrimiento superficial y por lo tanto aumentos bruscos en su caudal. Mientras que la del A° Larriera presentó el mayor porcentaje de humedales (11%) principalmente conformado por el humedal ubicado en la desembocadura de los A° Rocho y Mallada. Dicho humedal funciona como regulador del caudal aportado al R° San José en la desembocadura del A° Larriera.

Fotointerpretación

A continuación, se describen las unidades geoambientales identificadas para cada subcuenca urbana.

Arroyo Mallada

Figura 9: Puentes y bañados del A° Mallada



Fuente: Relevamiento de campo, 12.12.2018

La subcuenca del A° Mallada comprende una superficie de 12,8 km², sus nacientes se ubican en cotas de 70 m sobre la cuchilla San José. La red hídrica fluye hacia el NE, donde el curso principal recorre aproximadamente 8 km para desembocar en el A° Larriera y luego en el R° San José. En esta zona se encuentra una planicie ancha inundable, cubierta de monte nativo y vegetación de bañado, que se localiza al norte de la ciudad y forma parte de la parquización lineal.

En las nacientes se encuentran lomadas y colinas redondeadas, con pendientes fuertes (5-7%) que se entallan formando valles tipo V. Las planicies son estrechas hasta el curso medio, y se ensanchan aguas abajo donde forman humedales ubicados en el área urbana, entre la ruta N° 3 y la confluencia del A° Larriera. En esta zona se ha instalado un parque lineal en la planicie de inundación, y el curso en este tramo ha sido modificado por la instalación de la planta urbana.

En el recorrido del A° Mallada se localizan puentes que unen el área urbana. El tipo de construcción de pilares de los puentes favorece la acumulación de sedimentos y residuos, favoreciendo el retardo del flujo del A° Mallada. De tal forma, que los puentes se comportan como diques de contención, lo que aumenta el nivel del agua hacia las nacientes (Fig. 9).

En la actualidad, se observan importantes obras de relleno y construcción de viviendas en la planicie de inundación del A° Mallada. Lo cual genera nuevas áreas inundables en la zona urbana.

Arroyo Larriera

La subcuenca del A° Larriera cubre una superficie de 13 km², sus nacientes presentan lomadas fuertes. La cota máxima es de 80 m, y aguas abajo de la cota 50 m se forman amplias planicies de inundación que llegan a su máxima superficie en la confluencia con el A° Rocho. Con 12 km de recorrido es el cauce fluvial más extenso de todas las subcuencas urbanas.

Arroyo Rocho

Es la subcuenca con menores pendientes en sus nacientes y menor superficie (6,8 km²), asimismo su curso tiene un recorrido de 5,5 km. En su desembocadura se encuentra la mayor planicie de inundación de la zona, asociada al A° Larriera donde cubre una superficie de 3,3 km².

Arroyo Tala

La subcuenca del A° Tala se ubica en el límite de influencia de la zona urbana, cubre una superficie de 14,7 km². El curso adquiere forma rectilínea y se extiende a lo largo del valle por 7 km. Presenta las menores pendientes en sus nacientes y las planicies de inundación más extensas con respecto a las restantes subcuencas urbanas, dichas planicies se encuentran por debajo de la cota 30 m. Entre la década de 1960 y la fecha, se observó que es la subcuenca con menor modificación en su planicie de inundación.

Cuenca baja del Arroyo Carreta Quemada

Figura 10: Humedales del A° Carreta Quemada



Fuente: Imagen Google Earth

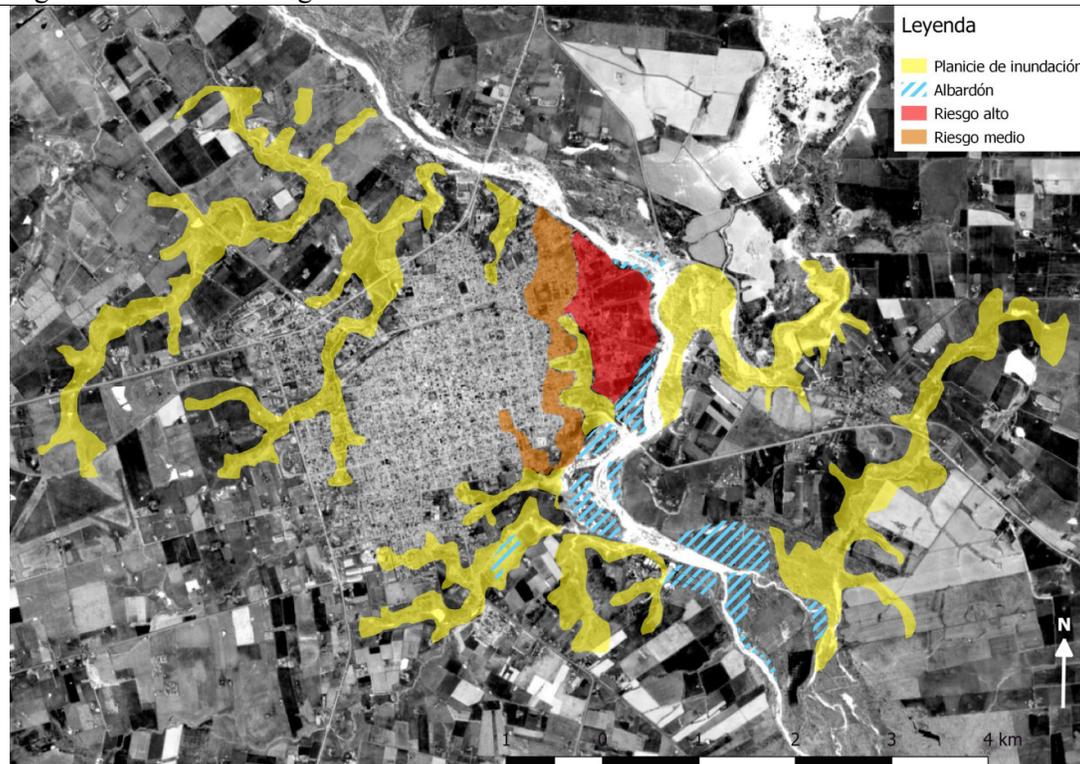
La fotointerpretación también permitió detectar que las planicies de inundación asociadas al A° Carreta Quemada son extensas y se localizan por debajo de la cota 30 m (Fig.10). Dando lugar a extensos bañados de gran importancia como reguladores ante rápidas crecidas. Dichos bañados son identificados como

áreas prioritarias para la conservación.

Río San José

El análisis fotogramétrico permitió detectar un proceso de densificación del área urbana ya consolidada entre los años 1966 y 2017, principalmente en la planicie de inundación del R° San José. La superposición de la imagen pancromática Sentinel-2 con fecha 25/06/2017 y las fotografías aéreas de 1966, permitió determinar que dicho proceso de densificación ha tenido lugar en áreas de riesgo medio y alto de inundación (Fig. 11). Durante las crecidas del R° San José, las zonas bajas asociadas a las subcuencas urbanas funcionan como planicies de inundación del R° San José.

Figura 11: Áreas de riesgos frente a eventos de inundaciones



Fuente: Fotografía aérea vuelo 1966/67 (SGM). Imagen Sentinel-2 25.06.2017.

Discusión de resultados

En toda la cuenca se pueden observar grandes cambios en los usos del suelo entre los años 1987-2017. Principalmente asociados a la transformación de la matriz productiva, donde de pastizales y praderas con fines forrajeros, el uso del suelo predominante pasó a ser de monocultivos cerealeros (Fig. 12). Además, a mediados de la década de 1990 se extendió la práctica de siembra directa, alcanzando en 2010 la mitad de los cultivos en el departamento de San José (Perrachon 2011).

Teóricamente la siembra directa debe ser acompañada de cultivos intermedios entre cosecha y siembra, que aporten materia orgánica al suelo, eviten la erosión y mantengan la infiltración en el suelo (Pinto y Piñeiro 2018). Sin embargo, en la clasificación de usos del suelo de julio de 2017 se observaron amplias superficies de suelo desnudo, dejando en evidencia la escasez de cultivos intermedios (Figura 12). Dicha pérdida de la cobertura vegetal y la actividad biológica asociada, expone al suelo a procesos erosivos, reduce la capacidad de infiltración y aumenta la compactación. Asimismo, los suelos arcillosos característicos de la zona, desprovistos de cobertura

vegetal reducen su capacidad de infiltración. Por lo tanto, estos fenómenos en conjunto podrían favorecer el aumento en volumen y velocidad de escurrimiento superficial.

Figura 12: Usos de suelo



Fuente: Relevamiento de campo, 29.03.2019

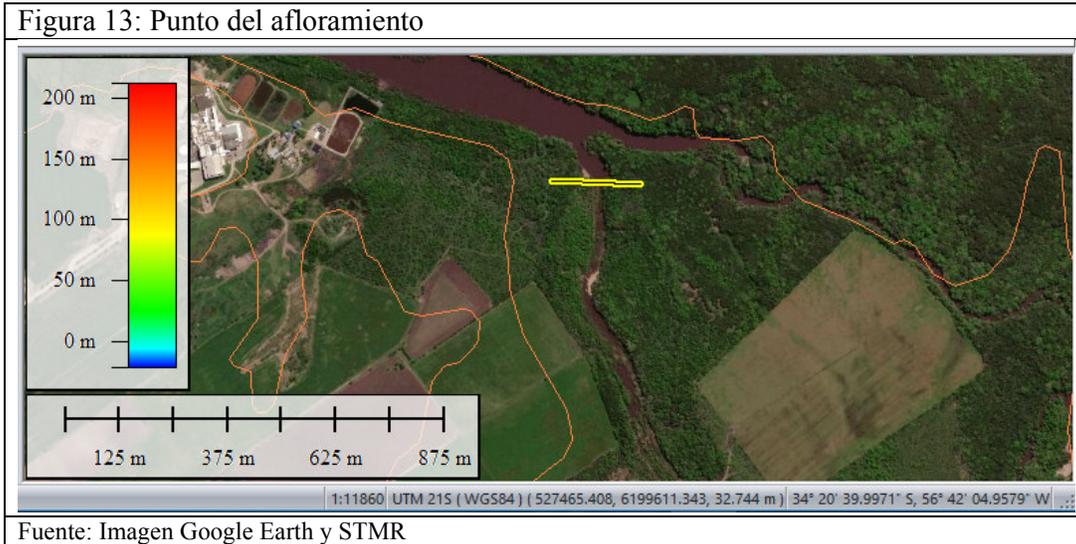
A partir del análisis estadístico de las bases de datos de niveles de caudal y precipitaciones, se comprobó que durante el período 1987-2018 ha disminuido significativamente el tiempo de respuesta entre la precipitación y el aumento del caudal. También se observó un incremento de eventos con niveles que sobrepasan los 5 m. Estos resultados sugieren que aumentó el volumen y la velocidad de escurrimiento superficial, por lo tanto, se podría decir que disminuyó la capacidad de infiltración del suelo.

Recomendaciones

Riesgos potenciales

El R° San José se entalla sobre el basamento cristalino, caracterizado por rocas ígneas fracturadas. Esta característica se observa en la forma del canal principal donde se reconocen tramos rectilíneos que responden al control estructural de la litología. En particular, el tramo ubicado 500 m al sur del puente de la ruta n° 11 se extiende por 1,5 km hasta bifurcarse debido a un afloramiento rocoso en el canal de aproximadamente 2 km de longitud, que funciona como dique natural en eventos de crecida (Fig. 13).

Figura 13: Punto del afloramiento



Fuente: Imagen Google Earth y STMR

Produciendo un aumento del nivel del agua, el cual genera un humedal que retiene el flujo a contracorriente. Asimismo, en la zona próxima al dique se observaron importantes volúmenes de residuos sólidos depositados luego de las crecidas con niveles superiores a 5 m (Fig.14).

Figura 14: Concentración de residuos



Fuente: Relevamiento de campo, 29.03.2019

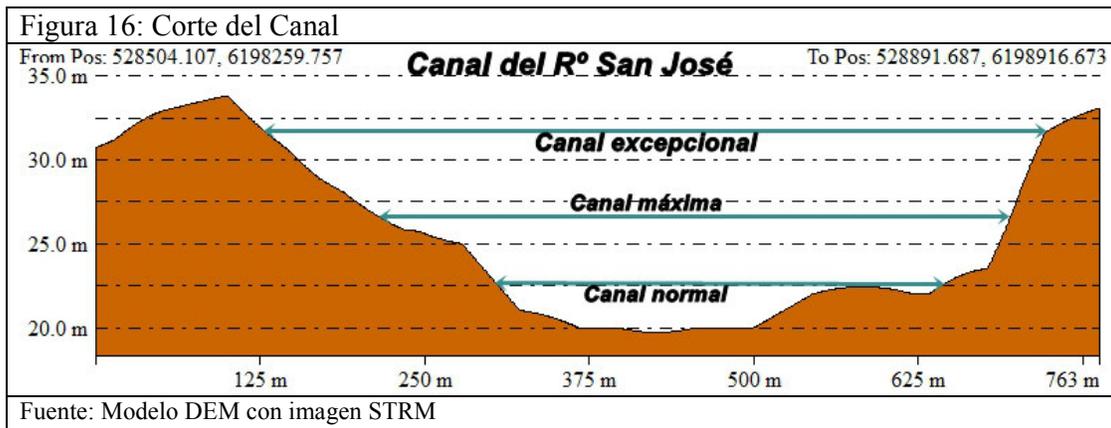
A partir de las observaciones realizadas en cuanto a la dinámica que genera el afloramiento rocoso (Fig. 15). Se sugiere un estudio hidráulico con el fin de evaluar posibles soluciones mecánicas sobre el canal, que eviten la contención y retroceso del flujo en eventos de niveles elevados.

Figura 15: Río aguas abajo de la ciudad de San José



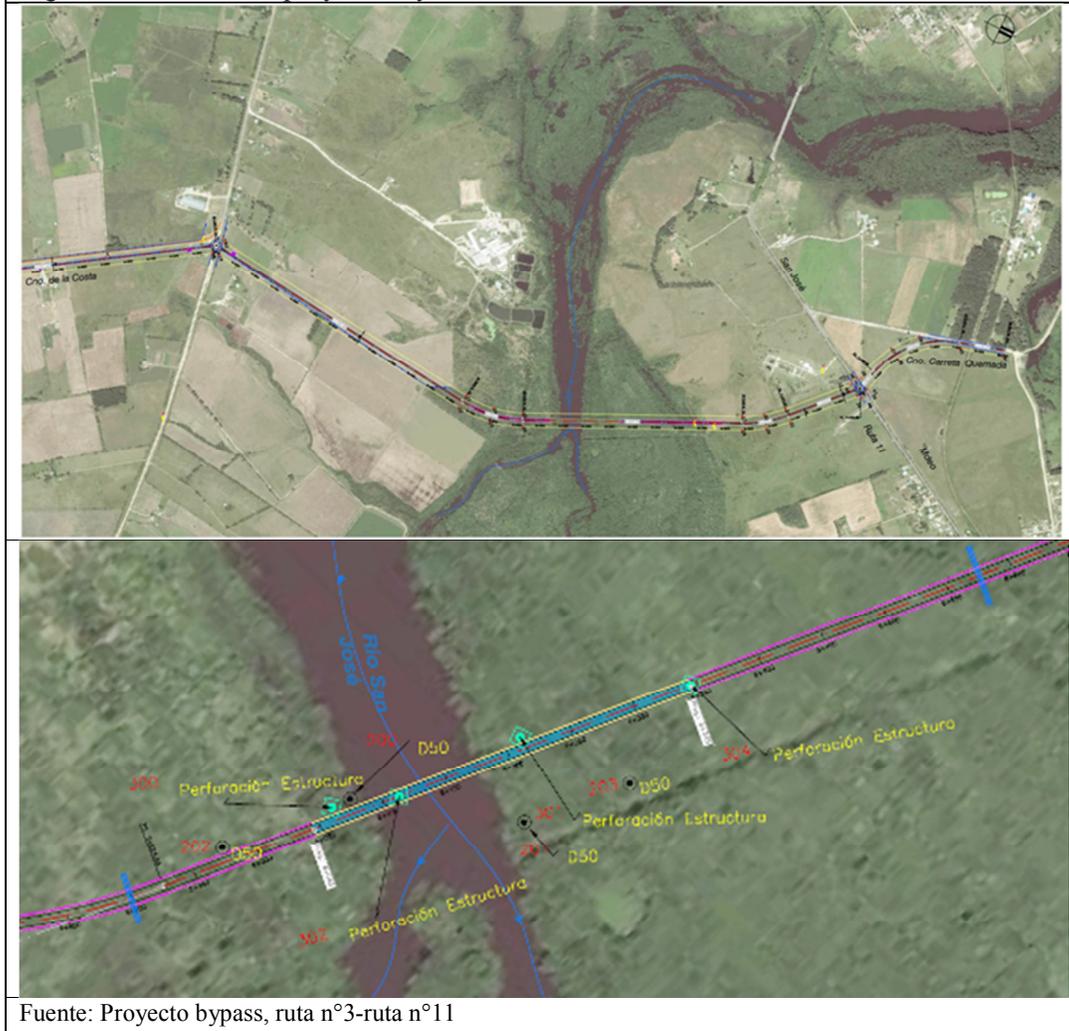
Fuente: Relevamiento de campo, 29.03.2019

Otro riesgo potencial identificado surge a partir de la futura construcción del puente bypass proyectado para la ruta n°11. Principalmente debido a la localización prevista para dicha obra que se encuentra próxima al afloramiento rocoso identificado como dique natural. En esta zona, el canal principal está dado por dos terrazas fluviales de aproximadamente 10 m de altura, a lo ancho se distingue el canal principal de caudal normal, y una zona de humedales que funciona como planicie de inundación en caudales altos (5-7m). En eventos de crecidas excepcionales (>7m) el nivel puede exceder la altura de las terrazas (Fig. 16).



La construcción prevista propone construir un puente de 300 ms sobre el curso del río que se ubicaría a cota de 29 m y dos taludes entre las terrazas y el canal principal (Fig. 17). Esto supone la disminución de la sección del canal durante caudales altos y excepcionales. Por lo tanto, el diseño constructivo del puente podría afectar sensiblemente el flujo hídrico, provocando un potencial incremento del nivel del agua, que podría generar nuevas áreas de inundación. La cota de inundación tomada para el proyecto es 28,30m, que corresponde a la cota de crecida máxima. Observando el nivel de las barrancas que fueron excavadas en crecidas excepcionales, existe la posibilidad que la nueva infraestructura generará obstrucción del flujo.

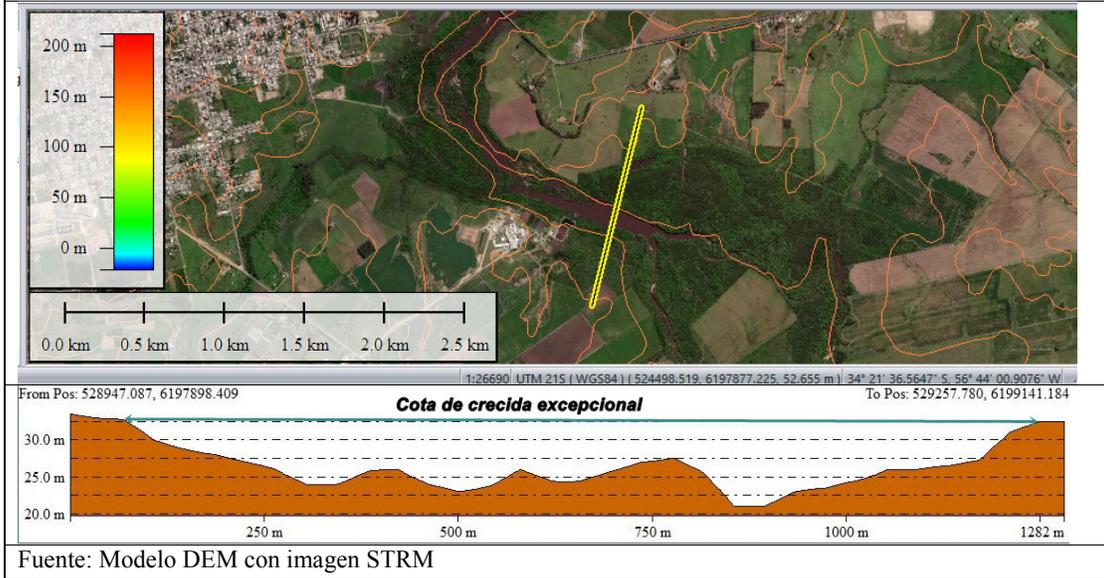
Figura 17: Puente del proyecto By Pass de ruta 11



Fuente: Proyecto bypass, ruta n°3-ruta n°11

La zona de bañado tiene aproximadamente 800 m, que corresponde a la planicie de inundación del R° San José con la formación de humedales longitudinales, por lo cual es el canal de crecida excepcional (Fig. 18).

Figura 18: Perfil del bañado



A nivel urbano, se identificó el aumento de infraestructuras sobre las subcuencas urbanas, que conllevan obras de relleno en áreas potencialmente inundables (Fig.19). Este tipo de intervenciones por un lado favorece los procesos de impermeabilización del suelo y por otro lado determinan la reducción de las áreas que funcionan como planicies de crecida de los arroyos urbanos.

La disminución de la capacidad de infiltración del suelo y la reducción de las planicies de crecida, podrían determinar un aumento en la velocidad de escorrentía superficial. Por lo tanto, se favorecerían eventos de crecidas repentinas, nuevas zonas inundables y el incremento del nivel de agua en la cuenca alta.

En cuanto a la capacidad de drenaje del área urbana se recomienda favorecer la circulación del flujo, evitando obstrucciones por acumulación de sedimentos o residuos especialmente en los puentes ubicados en el A° Mallada.

Figura 19: Rellenos en el área urbana



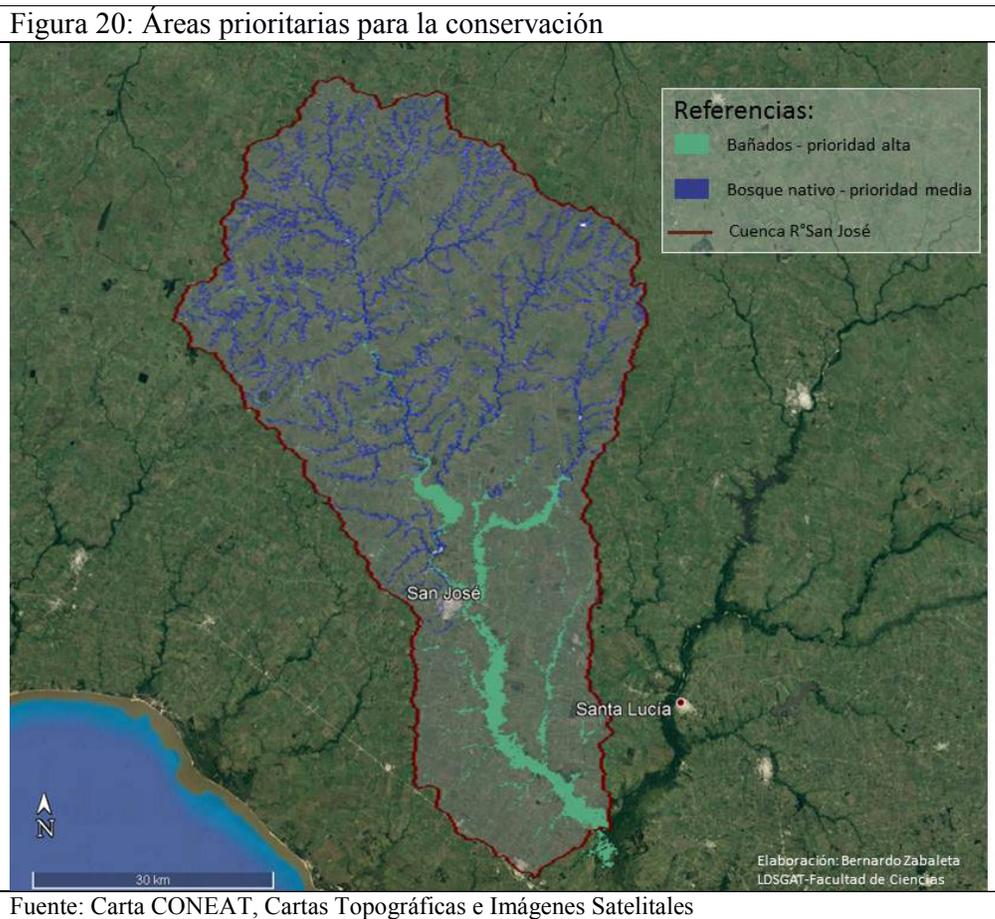
Fuente: Relevamiento de campo, 12.12.2018

Áreas de prioridad de conservación

De acuerdo a los resultados obtenidos y antecedentes bibliográficos, se reconoce que los ecosistemas degradados y fragmentados se corresponden a pastizales, humedales y bosques nativos (Achkar et al., 2013). En la cuenca del R° San José se constató el aumento de las superficies con producción agrícola intensiva. En este sentido, se destaca la degradación y fragmentación de los ecosistemas mencionados. Asimismo se evidencia que la intensificación productiva favorece la impermeabilización del suelo y aumenta la escorrentía superficial. Este proceso se agrava en cuanto aumenta la fragmentación, disminuyen las superficies y la calidad de

los humedales, ya que retienen grandes volúmenes de agua y funcionan como reguladores hídricos.

En el área de estudio se identificaron grandes áreas de humedales que resultan de prioridad para la conservación (Fig. 20). La preservación de los mismos pretende aportar a la regulación del sistema hidrológico, ya que incrementan el tiempo de retención hídrica, favorecen la purificación de aguas, controlan la erosión y la exportación de nutrientes orgánicos, así como son hábitats de numerosas especies autóctonas. Se identificaron las áreas de bañado como prioridad alta, ya que son los principales reguladores del flujo hídrico, entre ellos se destacan los bañados sobre el A° Carreta Quemada y el R° San José. Por otro lado, en las nacientes se recomienda la conservación de los bosques nativos por su importancia en la preservación de la calidad de la red hidrológica.



Bibliografía

Achkar, M., Domínguez, A. y Pesce, F. (2013). Cuencas hidrográficas del Uruguay, Situación y perspectivas ambientales y territoriales. Programa Uruguay Sustentable. Montevideo: Redes – AT.

Hirsch, R. y Slack, J. (1984). Non- parametric trend test for seasonal data with serial dependence, *J. Water Resour. Res.*, 20, 6, pp. 727-732.

Legendre, P. y Legendre, L. (1998). Numerical ecology: developments in environmental modelling. *Elsevier, Amsterdam*, 63-75.

Perrachón, J. (2011). Siembra directa en Uruguay; algunos mitos muy arraigados en el ámbito agropecuario. *Revista del Plan Agropecuario*, (139), 42-45.

Pinto, P. y Piñeiro, G. (2018). Cultivos de servicios, una alternativa para el manejo de malezas.

Anexo - Morfometría las subcuencas

Tabla 4: Tipologías de formas de las subcuencas

	Área/ARSA Km ² /Km ²	Perímetro/PA KM/KM	Longitud Cuencas	Elongación	Compactad	Clase	Factor Horton		
Cuenca Total San José	3564,74	518,6	105,66	0,64	1,51	Clase III	0,32	Ligamente alargada	
Subcuencas									
5	Cuenca A° Charriño	493,56	122,2	45,32	0,56	1,65	Clase III	0,26	Alargada
6	Cuenca A° Cuareta Quareada	469,76	137,3	59,27	0,51	1,67	Clase III	0,28	Muy Alargada
1	Cuenca San José Alta	348,20	87,8	39,81	0,47	1,34	Clase I	0,37	Ligemente ensanchada
3	Cuenca A° San Gregorio	308,16	82,9	28,6	0,49	1,34	Clase II	0,37	Ligemente alargada
8	Cuenca A° Guayard	292,05	74,3	27,25	0,45	1,39	Clase II	0,31	Ligemente alargada
7	Cuenca A° Cuyandá	194,11	77,7	31,58	0,50	1,37	Clase III	0,29	Muy Alargada
2	Cuenca A° Píntos	194,37	65,6	24,49	0,41	1,33	Clase II	0,32	Ligemente alargada
9	Cuenca A° Melibazo	111,88	34,0	19,08	0,55	1,31	Clase II	0,34	Ligemente alargada
11	Cuenca A° del Sauce	85,89	47,0	14,5	0,72	1,38	Clase I	0,41	Ligemente ensada
10	Cuenca A° Coronilla	85,37	59,7	28,05	0,58	1,33	Clase III	0,23	Alargada
18	Cuenca A° Castellanos	79,70	36,6	12,02	0,34	1,16	Clase I	0,35	Ligemente ensanchada
19	Cuenca A° Sauce	68,82	34,0	11,39	0,32	1,32	Clase II	0,36	Ligemente ensanchada
12	Cuenca A° Jesús María	61,46	42,5	14,39	0,62	1,39	Clase III	0,39	Alargada
20	Cuenca A° Valdivia	50,33	25,3	11,07	0,79	1,29	Clase II	0,49	Ligemente ensanchada
14	Cuenca A° Sarandí Grande	32,13	43,4	16,01	0,49	1,61	Clase III	0,27	Alargada
22	Cuenca A° Píntos	44,10	31,2	20,32	0,73	1,33	Clase II	0,41	Ligemente alargada
16	Cuenca A° Pando	49,41	31,9	19,5	0,71	1,34	Clase II	0,39	Ligemente alargada
15	Cuenca A° Pando	40,23	37,9	7,59	0,30	1,31	Clase I	0,35	Enanchada
13	Cuenca A° Guayabos	31,29	34,9	19,69	0,59	1,71	Clase III	0,23	Alargada
14	Cuenca A° Larión	31,07	23,5	8,31	0,79	1,39	Clase I	0,45	Ligemente alargada
15	Cuenca A° Sauce Grande	30,44	27,6	19,22	0,61	1,41	Clase I	0,39	Alargada
4	Cuenca A° Gregorio	30,06	23,1	19,08	0,61	1,39	Clase I	0,39	Alargada

Tabla 5: Clasificación de las formas de los cursos

	Cuenca	AREA/K M2	Diametro CÍRCULO	Long Cuencas (Km)	Cota Max	Cota Min	Orden	Long Curso	Long Cuencas (Km)	ID Sinusoid ad	Tipo
	Río San José	3564,74	67,88	105,7	309	8	6	179,76	105,7	1,70	Sinuoso
Subcuencas											
4	A° Charriño	493,56	24,98	45,3	166	36	6	55,01	45,3	1,26	Rectilíneo
5	A° Cuareta Quareada	469,76	24,44	49,0	160	30	5	79,02	49,0	1,66	Sinuoso
1	San José Alta	348,20	20,91	32,0	160	60	5	42,17	32,0	1,32	Rectilíneo
3	A° San Gregorio	308,16	19,85	28,6	170	60	5	36,23	28,6	1,27	Rectilíneo
7	A° Guayard	292,05	17,19	25,3	180	65	5	37,42	25,3	1,48	Sinuoso
6	A° Cuyandá	194,11	15,81	31,7	60	9	5	41,31	31,7	1,31	Rectilíneo
2	A° Píntos	194,37	15,75	24,4	170	75	5	51,55	24,4	1,29	Rectilíneo
9	A° Melibazo	111,88	11,94	19,0	200	58	4	29,44	19,0	1,34	Rectilíneo
10	A° del Sauce	85,89	10,47	13,8	114	45	4	39,41	13,8	1,40	Rectilíneo
11	A° Coronilla	85,37	10,46	13,6	170	60	4	34,96	13,6	1,31	Rectilíneo
18	A° Castellanos	79,70	10,06	11,7	60	9	4	15,98	11,7	1,34	Rectilíneo
19	A° Sauce	68,82	8,36	11,3	40	5	4	14,95	11,3	1,27	Rectilíneo
12	A° Jesús María	61,46	4,86	14,3	35	25	4	29,96	14,3	1,47	Sinuoso
20	Cuenca A° Valdivia	50,33	8,71	11,3	50	5	4	17,76	11,3	1,57	Sinuoso
14	A° Sarandí Grande	32,13	8,13	13,9	30	4,5	4	18,39	13,9	1,39	Rectilíneo
22	A° Píntos	44,10	7,49	20,3	49	4,5	4	15,19	20,3	1,29	Rectilíneo
16	A° Pando	49,41	7,44	20,3	125	36	4	18,97	20,3	1,32	Rectilíneo
15	A° Pando	40,23	7,15	7,9	92	25	4	12,34	7,9	1,69	Sinuoso
17	A° Guayabos	31,29	6,54	20,5	150	46	4	19,25	20,5	1,25	Rectilíneo
13	A° Larión	31,07	6,29	8,3	60	24	5	12,18	8,3	1,47	Sinuoso
14	A° Sauce Grande	30,44	6,23	13,9	60	17	5	18,46	13,9	1,33	Rectilíneo
4	A° Gregorio	30,06	6,19	19,0	60	8	5	14,42	19,0	1,44	Rectilíneo

Fuente: Elaboración propia. Base cartas topográficas 1/50000

Áreas prioritarias para la conservación

