



Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud
Departamento de Geología.

Ruta Provincial N°1, S/N, Km. 4, Ciudad Universitaria, (9005)
Comodoro Rivadavia, Chubut - Argentina



Informe Técnico FCNyCS RDFCNyCS N° 384/17

SISTEMAS FLUVIALES EFÍMEROS E INUNDACIONES REPENTINAS DE LA CIUDAD DE COMODORO RIVADAVIA: CAUSAS, PROCESOS Y MITIGACIONES

AUTORES Y COLABORADORES

Sedimentología y Estratigrafía

Dr. José Matildo Paredes (COORDINADOR)
Dr. José Oscar Allard
Geól. María Anelén Fernandez
Dr. Nicolás Foix (UNPSJB-CONICET)
Geól. Sabrina Ximena Olazábal
Al. Mauro Nicolás Valle

Geomorfología

Dr. Alejandro Montes (UNPSJB-CONICET)
Geól. Silvana Rodriguez
Geól. Alejandro Simeoni
Geól. Cristina San Martín

Teledetección - SIG

Geól. Silvina Mariela Ocampo
Al. Juan Manuel Turra
Al. Juan Maino
Al. Federico Sanchez

Suelos

Geól. Isabel Castro
Lic. Gabriela Mendos
Dr. J.A. Quagliano

Meteorología y Climatología

Walter Maza

Junio de 2017



Como citar el Informe Técnico: Paredes, J.M., Ocampo, S.M., Foix, N., Olazábal, S.X., Fernández, M.A., Montes, A., Castro, I., Maza, W., Allard, J.O., Rodríguez, S., San Martín, C., Simeoni, A., Mendos, G., Quagliano, J.A., Turra, J.M., Maino, J., Sánchez, F., Valle, M.N., 2017. Sistemas fluviales efímeros e inundaciones repentinas de la ciudad de Comodoro Rivadavia: causas, procesos y mitigaciones. Informe Técnico FCNyCS. UNPSJB, p. 1-44. Comodoro Rivadavia.

ÍNDICE

1. MOTIVACIONES Y OBJETIVOS.....	3
2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	4
3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS.....	9
4. PRECIPITACIONES HISTÓRICAS Y EVOLUCIÓN DE LA TORMENTA.....	13
5. SISTEMAS FLUVIALES EFÍMEROS DE COMODORO RIVADAVIA.....	18
a) Definición y principales características.....	18
b) Inundaciones repentinas (<i>flash floods</i>).....	20
c) Análisis morfométrico y caudales obtenidos	21
6. PROCESOS DE EROSIÓN, TRANSPORTE Y DEPOSITACIÓN.....	26
a) Formación y profundización de cárcavas en el casco urbano y en las cabeceras.....	26
b) Removilización de sedimento durante la tormenta	31
c) Granulometría del material transportado	33
d) Inundaciones repentinas de las partes bajas de la ciudad	34
e) Ensanchamiento y profundización de cauces.....	38
7. CONCLUSIONES – RECOMENDACIONES.....	40
8. AGRADECIMIENTOS.....	42
9. BIBLIOGRAFÍA.....	43

1. MOTIVACIONES Y OBJETIVOS

Las precipitaciones extremas acontecidas en la ciudad de Comodoro Rivadavia entre el 29 de marzo y el 08 de abril de 2017 han producido cuantiosas pérdidas materiales y económicas, y han generado una fuerte sensación de vulnerabilidad en la sociedad ante la incertidumbre de que sea un proceso recurrente. Este tipo de manifestación climática con lluvias intensas que en pocos días superan la media anual ha ocurrido en numerosas localidades de Chubut desde fines del siglo pasado, destacándose Trelew (Abril de 1998), Arroyo Verde (2011), Comodoro Rivadavia (2011, 2017), y es el resultado de una alteración en los patrones de circulación atmosférica. La planificación urbana y el desarrollo económico de la ciudad han demostrado ser altamente vulnerable al efecto negativo producido por estas modificaciones climáticas reflejadas en cambios en la distribución de las temperaturas del agua de mar y del continente, y en la variabilidad de las precipitaciones, con incremento en la frecuencia de eventos de precipitación extrema, menor cantidad de días de lluvia y períodos secos mas prolongados (IPCC, 2007; Rind et al., 1989).

Por ese motivo, un grupo *ad-hoc* de investigadores, docentes y alumnos del departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud ha trabajado desde el cese de la tormenta en la recopilación de datos y el análisis de las causas, procesos erosionales y depósitos sedimentarios asociados con el temporal, evaluando posibles mitigaciones ante futuras precipitaciones extremas dentro del ejido urbano y en las áreas de cabecera de las redes de drenaje. En tiempo record, y al sólo efecto de generar un documento de acceso libre disponible para toda la comunidad, se ha completado una revisión preliminar de las siete cuencas de drenaje (arroyo La Mata, arroyo de la Quinta, cuenca de Saavedra-Km.3, arroyo Belgrano y arroyo de km8-Restinga Alí, cuenca de Caleta Córdova y cuenca del Cañadón Biggs), y se ha recopilado información de procesos erosionales y depositacionales a lo largo de las mismas.

El objetivo de este estudio multidisciplinario es (1) entender los motivos por los cuales la tormenta derivó en una inundación sin precedentes sobre grandes sectores de la ciudad, (2) establecer el grado de vulnerabilidad de sectores específicos de las diferentes redes de drenaje, y (3) presentar información morfométrica de las redes de drenaje y cálculos de caudales de las redes de drenaje, y (4) efectuar recomendaciones para mitigar el impacto que futuras lluvias ocasionen en la ciudad.

Considerando que las tareas de recuperación de la ciudad están iniciadas desde el cese de la tormenta, este estudio se propone brindar una perspectiva a mediano plazo que evalúe la necesidad de gestionar obras que (1) drenen eficientemente el agua derivada de las precipitaciones que ingresan a la ciudad, y (2) reduzcan la cantidad de sedimento que accede a la ciudad durante las misma. La adecuada comprensión de los procesos y mecanismos por los cuales llega el sedimento y el agua a la ciudad durante los eventos extraordinarios permitirá mitigar el impacto de las precipitaciones, con una adecuada planificación urbana y un rediseño de sectores específicos que constitúan antiguos cañadones o arroyos, sobre los que la ciudad ha crecido en las últimas décadas.

2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La zona analizada en este estudio (**Fig. 1**) se encuentra en el Sector Oriental de la cuenca del Golfo San Jorge ([Figari et al., 1999](#); [Rodríguez y Littke, 2000](#)) y está caracterizada por la alternancia de unidades marinas y continentales del Cenozoico con disposición horizontal, cubriendo unidades continentales del Cretácico. La sucesión cenozoica se inicia con depósitos de areniscas y arcillitas de ambiente marino de la *Formación Salamanca* cubiertos por sucesiones continentales del *Grupo Río Chico*; ambas unidades no afloran en la zona de interés a este estudio por lo que no serán analizadas en detalle. Se remite al lector interesado a [Foix \(2009\)](#), [Foix et al. \(2013\)](#) y [Raigemborn et al. \(2010\)](#).

Durante el Eoceno y Oligoceno se depositan las tobas de la *Formación Sarmiento* ([Ameghino, 1906](#); [Windhausen, 1924](#); [Feruglio, 1938](#)), que representan depósitos distales de la actividad del Arco Magmático Andino y alcanzan un espesor máximo de 130 metros. La Formación Sarmiento aflora en la Zona Norte de Comodoro Rivadavia, y se caracteriza por depósitos de ceniza volcánica fina, en niveles tabulares de color blanco-amarillento y granulometría muy fina. Debido a su granulometría fina sus depósitos son impermeables y con cobertura vegetativa pobre o ausente, lo que favorece el escurrimiento superficial del agua y el desarrollo de drenajes de tipo dendrítico (*rills*) constituyendo en algunos sectores paisajes de *badlands*, con desarrollo de cavernas o conductos afectados por erosión y transporte subterráneo de partículas sólidas (*piping*). Sobre la *Formación Sarmiento* se deposita la *Formación Chenque* ([Bellosi, 1990](#)), antes referida como “Patagoniano” o “Patagoniense” ([Windhausen, 1924](#); [Frenguelli, 1929](#), [Feruglio, 1949](#)), con un espesor máximo de 350 metros en la zona de estudio ([Paredes, 2002](#)). La unidad se caracteriza por la alternancia de areniscas y arcillitas friables, con niveles bioclásticos intercalados en diferentes partes de la unidad. Dentro de la unidad, presentan cinco ciclos con tendencia granocreciente, los dos superiores evidenciando un marcado incremento en el contenido de areniscas. Esta unidad es en parte contemporánea con tobas de la Formación Sarmiento (Miembro Colhuehuapense), depositadas al occidente ([Bellosi et al., 2002](#)). Son sedimentos marinos poco profundos depositados en condiciones marinas abiertas a estuarinas y con edades que varían entre Mioceno inferior y Mioceno medio ([Barreda y Palamarczuk, 2000](#)).

La Formación Chenque sucede en transición a la *Formación Santa Cruz* o “Santacruciano” ([Ameghino, 1889](#); [Feruglio, 1949](#); [Legarreta et al., 1990](#)), que consiste de areniscas y conglomerados con troncos y desarrollo de paleosuelos, con tobas cineríticas intercaladas, interpretadas como correspondientes a depósitos fluviales, con presencia además de registros eólicos. Su edad ha sido asignada al intervalo Burdingaliense-Llanghiense a partir de dataciones radimétricas de tobas que se intercalan en la misma ([Feagle et al., 1995](#); [Marshall et al., 1986](#)). Estudios recientes ([Cuitiño et al., 2015](#)) indican que la sedimentación continental de la Formación Santa Cruz se inició en la cuenca del Golfo San Jorge aproximadamente a los 15 m.a. Desde el Mioceno medio a la actualidad la cuenca del Golfo San Jorge ha estado sometida a un régimen erosivo neto, combinando la elevación de la Cordillera Andina y el aumento de aporte sedimentario consecuente con una caída del nivel del mar post-mioceno medio. Terrazas glacifluviales, fluviales y pedimentos con gran distribución en la Patagonia extraandina se desarrollaron desde el Mioceno superior al Pleistoceno. A los depósitos gravoarenosos que los constituyen se los denomina “*Rodados Tehuelches*” ([Caldenius 1932](#); [Martínez y Kutschker, 2011](#); [Martinez et al., 2014](#)). El espesor de la unidad varía desde pocos metros hasta más de 20 metros en los sectores de mayor potencia. Las

principales “pampas” o mesetas de la zona de estudio están cubiertas por depósitos asociados a extensos sistemas de ríos entrelazados de alta energía generados principalmente por la fusión de glaciares en la cordillera de los Andes durante el Plioceno y Pleistoceno. Su disposición actual está relacionada al proceso de erosión diferencial, hídrica y eólica, que dejó expuestos sobre las mesetas a los sedimentos depositados en el fondo de amplios valles (Simeoni, 2008). Los pedimentos que se desarrollaron hacia los márgenes de las mesetas también adquieren actualmente morfología mesetiforme y sobre una superficie erosiva presentan gravas en matriz areno-limosa y una menor consolidación que los depósitos glaciares. Su potencia es variable y ronda entre 1 y 5 m.

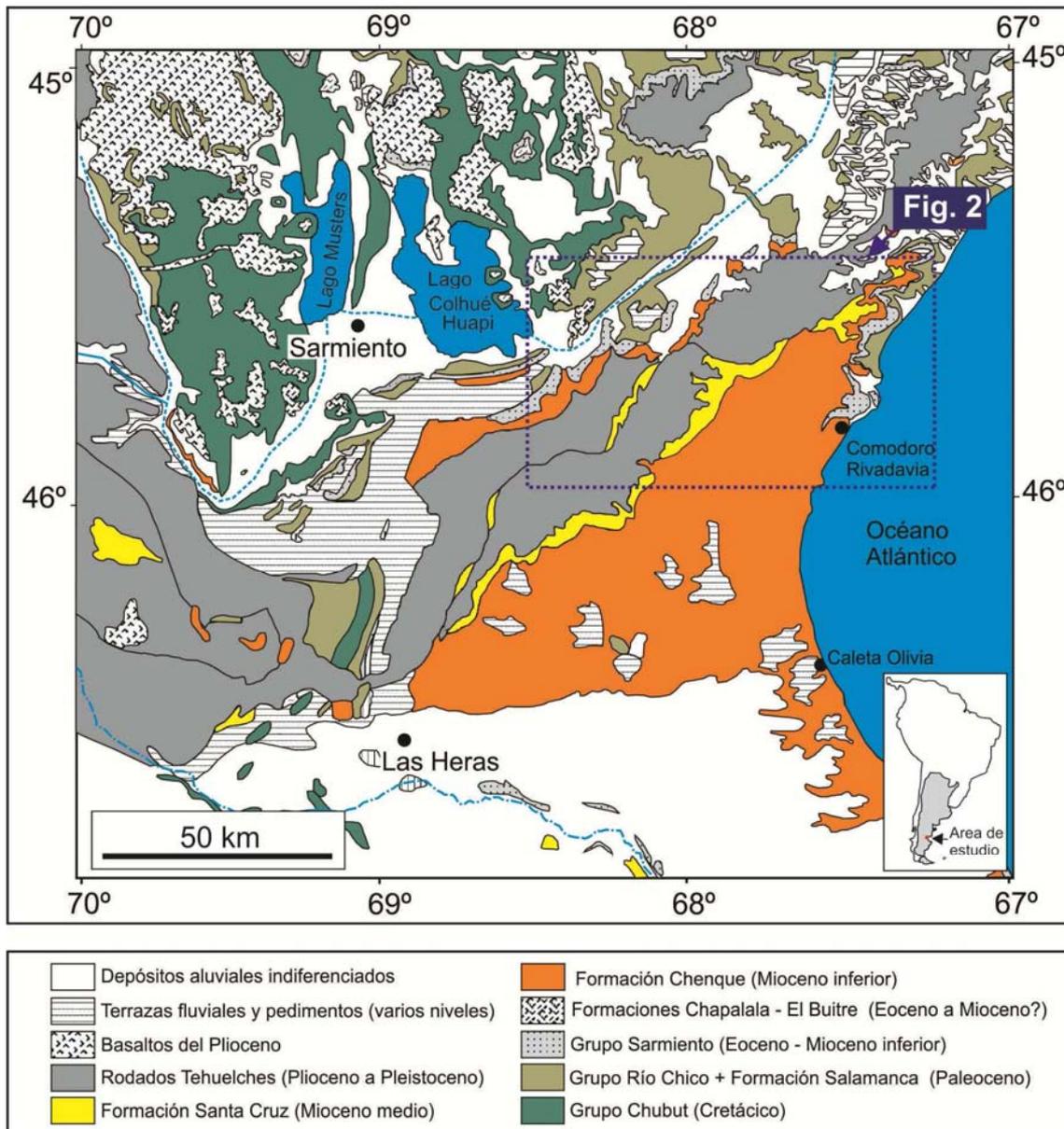


Figura 1. Geología simplificada de la cuenca del Golfo San Jorge (modificado de Paredes et al., 2015). La zona de estudio se encuentra mayormente conformada por rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Sarmiento, Formación Chenque y Santa Cruz, y en el ámbito de la Pampa de Castillo por los Rodados Tehuelches.

El rasgo topográfico dominante de la zona de estudio lo constituye la Pampa del Castillo, que es una meseta de gravas que supera los 712 m de altura, con orientación suroeste-noreste y pendiente general al noreste (**Fig. 2**). Este elemento conforma una extensa divisoria de drenaje regional, separando la cuenca del río Chico al oeste, tributario del río Chubut, y numerosos cañadones con pendiente hacia el Golfo San Jorge en su sector oriental. Estos cañadones, son valles estrechos y largos, que pueden superar los 200 m de profundidad y están orientados oeste-noroeste a este-sureste, en coincidencia con la dirección de fallas directas vinculadas al desarrollo de la cuenca del Golfo San Jorge (Sciutto *et al.*, 2008). Si bien el relieve entre la Pampa del Castillo y la costa está dominado principalmente por los cañadones de origen fluvial, muestra claras evidencias de erosión eólica sobreimpuesta. En esta zona se desarrollan mesetas estructurales coronadas por niveles bioclásticos bien cementados que en ocasiones se muestran como colinas alargadas según la dirección del viento dominante (Montes *et al.*, 2015).

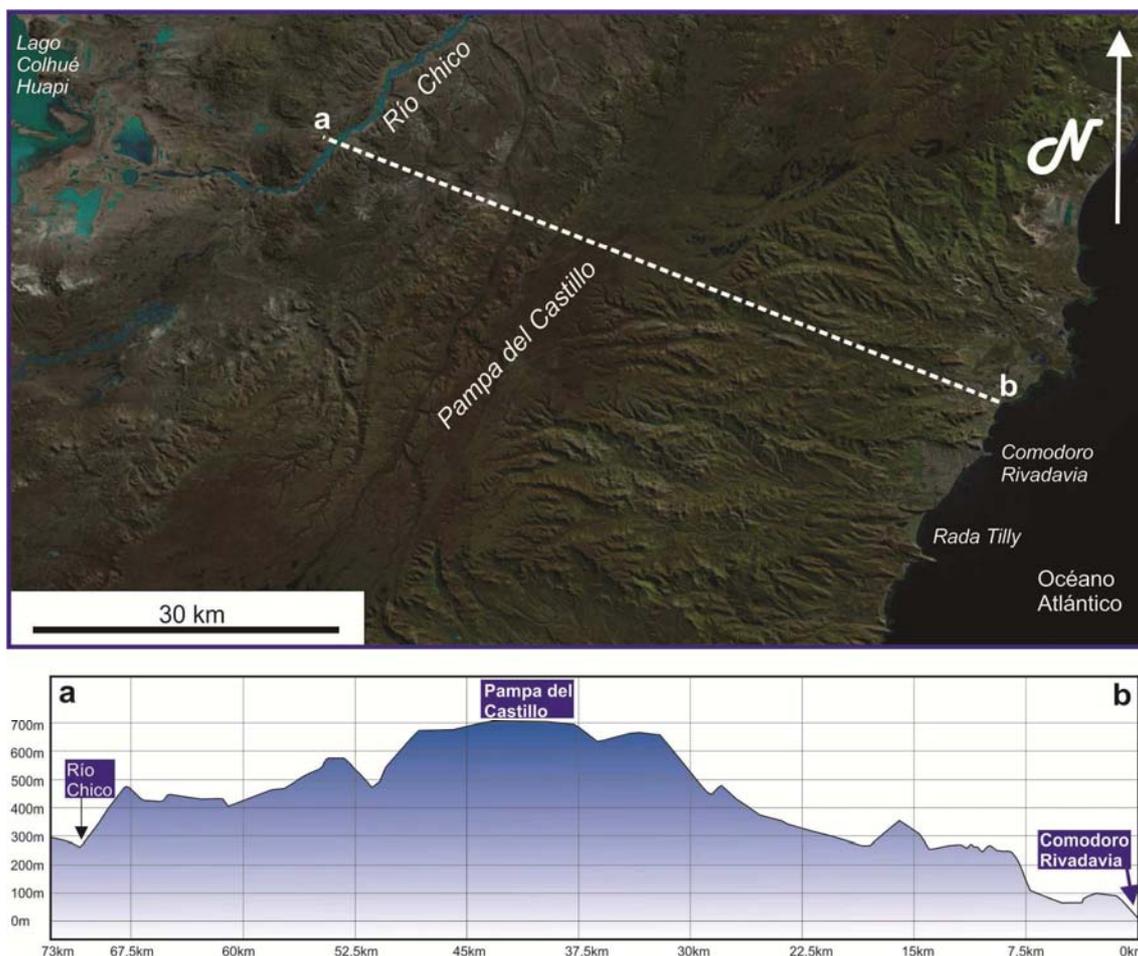


Figura 2. Imagen satelital obtenida el 09 de abril de 2017 y corte topográfico entre el río Chico y la ciudad de Comodoro Rivadavia. El valle del río Chico se encuentra inundado por el abundante aporte de agua de las precipitaciones. Se destaca la diferencia de relieve de más de 700 metros entre las cabeceras de los sistemas fluviales en el margen oriental de la Pampa del Castillo y la desembocadura de los mismos en la costa Atlántica.

Los bordes de las mesetas y de los cerros conformados por estratos de areniscas y arcillitas de las formaciones Chenque y Santa Cruz suelen presentar pendientes abruptas, excediendo en ocasiones los 55°. A estas pendientes abruptas y a la presencia de arcillitas expansivas en los sedimentos de la Formación Chenque se adjudica gran

importancia para el desarrollo de deslizamientos. A su vez, en etapas iniciales de los movimientos gravitacionales la infiltración de agua a través de grietas y fisuras puede conducir a la superación de su límite líquido y al consecuente desarrollo de una fase de flujo distal. [González Díaz \(2004\)](#) propone como inductor de los deslizamientos ubicados en la zona de bahía Solano (al norte de Caleta Córdova) a la incidencia de intensas precipitaciones y saturación de los terrenos por agua, reduciendo la resistencia y estabilidad de las pendientes. El socavamiento basal (*undercutting*), causado por la acción erosiva fluvial en la base de los cañadones también es un causal involucrado en la ocurrencia de estos procesos ([Feruglio, 1947](#)).

Otro proceso de remoción en masa identificado en mesetas estructurales y cerros constituidos por sedimentos de la Formación Chenque es la caída de bloques. La erosión hídrica y eólica, que actúa en los afloramientos que coronan las laderas, favorece la caída de bloques de coquinas y areniscas fosilíferas suprayacentes por acción gravitatoria. Estos bloques a su vez son retransportados durante las precipitaciones por flujos acuosos; dos ejemplos relacionados con esta dinámica ocurrieron en la ladera norte del Cerro Viteau en relación con la tormenta.

Las laderas comúnmente se encuentran cubiertas por materiales arenosos y gravosos acarreados por flujos acuosos o flujos de detritos removilizados durante precipitaciones intensas, intercalados con materiales arenosos y limosos transportados por el viento, con cobertura vegetativa variable en función de su ubicación en la ladera y el tipo de sustrato sobre el que ocurren. Estos depósitos conforman una cobertura friable para las sedimentitas cenozoicas, con espesores que varían entre pocos centímetros y más de 3 m de espesor en las laderas, pero que pueden superar los 15 metros en los fondos de los cañadones. Su composición es variada entre gravas, arenas y limos, debido a que se desarrollan a partir de la meteorización de las rocas circundantes que son retransportadas constituyendo los depósitos aluviales y coluviales que cubren las laderas y los fondos de cañadones. Suelen presentar clastos subredondeados a subangulosos constituidos por andesitas y basaltos provenientes de los Rodados Tehuelches o de los depósitos sobre pedimentos, así como fragmentos de coquinas y otros restos fósiles marinos (principalmente *Ostrea* sp.) provenientes de la erosión de la Formación Chenque. A su vez, los sectores en estudio cuentan con un importante aporte de arena y limo debido a la acción de los fuertes vientos del oeste. En los fondos de cañadones es común el desarrollo de campos de dunas, estabilizadas por vegetación o móviles, con velocidades de avance de hasta 70 metros por año ([Montes et al., 2015](#)). También son frecuentes en las zonas circundantes a la ciudad las acumulaciones de arena eólica a sotavento de la vegetación (nebkas) generando un microrelieve. Complementariamente, sobre la superficie de las mesetas y en sus laderas se reconocen pavimentos del desierto, los cuales evidencian la degradación del suelo a partir de la erosión eólica.

Los cañadones no presentan cursos de agua permanente, y en su lecho se desarrollan cauces temporales o efímeros. Los cauces temporales transportan agua de manera estacional debido a las fluctuaciones del nivel freático y a la concentración de las precipitaciones durante los meses de otoño e invierno, en tanto que los cauces efímeros pueden mantener su lecho seco durante períodos de muchos años, activándose únicamente durante eventos de precipitaciones muy intensas y extremas.

En virtud del interés de este estudio en el análisis y organización de las redes de drenaje efímeras que desembocan en o dentro de la ciudad de Comodoro Rivadavia, no se hará un análisis exhaustivo de los rasgos geomorfológicos de la Pampa del Castillo y de la cuenca de drenaje del río Chico, remitiendo al lector interesado a la Hoja Geológica 4569-IV ([Sciutto et al., 2008](#)).

En sectores costeros de la zona de estudio durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno se desarrollaron paleo-acantilados y cordones litorales depositados por la acción del oleaje y asociados con períodos interglaciales, en los que el nivel del mar se encontraba por encima del nivel actual. Tanto los depósitos litorales pleistocénicos como los holocénicos están representados en las inmediaciones de la ruta Nacional n°3 entre Comodoro Rivadavia y Caleta Olivia. El substrato sobre el que se encuentra desarrollada gran parte de la localidad de Rada Tilly, está constituido por arenas y gravas poco consolidadas correspondientes a una planicie de cordones litorales desarrollada durante el Holoceno y que contienen gran cantidad de especies de moluscos (Feruglio, 1949). Los acantilados desarrollados a lo largo de la costa en estudio presentan extensión y alturas variables, y abarcan tanto sectores urbanos como sus adyacencias. Están labrados sobre sedimentitas del Grupo Sarmiento, de la Formación Chenque y sobre una gran diversidad de depósitos del Cuaternario (aluviales, coluviales, litorales y depósitos sobre pedimentos). Estos acantilados suelen presentar pendientes muy abruptas que se acercan a 90° y poseen alturas variables que van desde 2 metros hasta 124 metros en punta del Marqués. Al pie de los mismos se desarrollan extensas plataformas de abrasión que quedan expuestas durante los períodos de baja marea. Los acantilados en la zona de estudio se encuentran activos, lo cual se evidencia principalmente por el desarrollo de grietas y cárcavas en su parte superior, por la morfología de su perfil y por la presencia de bloques caídos al pie. Es común el desarrollo de cuevas y en gran parte de los acantilados labrados en sedimentos del Grupo Sarmiento se identifica una morfología en media caña (*notch*), ambos rasgos asociados a la erosión generada por la incidencia del oleaje en la parte baja del mismo (*undercutting*). El conjunto de los procesos de meteorización producidos en la parte superior de los acantilados, asociado a carcavamiento, escurrimiento superficial, *piping* y agrietamiento, en combinación con la erosión en media caña o en forma de cuevas generada por el oleaje, provocan la desestabilización de los acantilados y desencadenan deslizamientos costeros, desplomes y caídas de bloques. El retroceso promedio de acantilados activos desarrollados en rocas sedimentarias cenozoicas como la que presenta la zona de estudio es entre 10 cm y 1 m por año (Sunamura, 1992) y dicho retroceso no suele ocurrir en forma continua, sino que generalmente se produce de manera episódica y localizada (Bird, 2008). En la zona costera de Comodoro Rivadavia y alrededores el oleaje se incrementa cuando los vientos provienen desde el este, generando las denominadas marejadas. Los procesos erosivos vinculados a estas marejadas provocaron importantes daños durante las pleamares de fines de Marzo y principios de Abril, directamente vinculados a las causas climáticas que generaron las intensas lluvias.

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

Una parte significativa de los materiales movilizados durante la tormenta deriva de la pérdida de suelo ¿Qué es el suelo? De acuerdo a FAO (2015) “El suelo es la capa superficial de la tierra, delgada y vulnerable. Está compuesto por partículas minerales, materia orgánica, microorganismos, agua y aire. Los procesos formadores del suelo son muy lentos y requieren largos períodos de tiempo. En las praderas de climas templados, se necesitan 100 años para formar 1 a 2 cm de suelo. Como su (re)generación es muy lenta, el suelo debe considerarse como un recurso no renovable”. Se caracteriza por estar conformado por diferentes horizontes, cada uno con características particulares. Un perfil de suelo ideal (**Fig. 3**) presentaría una secuencia conformada de la siguiente manera: O-A-E-B-C-R (El horizonte O orgánico; el horizonte A mineral con contenido de materia orgánica; el E eluvial, de pérdida de materia orgánica, sales u otros minerales; B iluvial, horizonte de ganancia o enriquecido en sales, materia orgánica, otros minerales; C que corresponde al material originario o parental del suelo o sustrato meteorizado y finalmente el R, que algunos llaman D, que son las rocas o sedimentos a partir del que se formaron los suelos). La secuencia descrita de horizontes no siempre aparece completa, y es un rasgo común de los suelos de la región adyacente a Comodoro Rivadavia.



Figura 3. Horizontes de un perfil tipo de suelos. Perfiles de suelo característicos de Comodoro Rivadavia.

En el informe “La erosión del suelo en la República Argentina”, que forma parte de un informe más amplio de FAO del año 2015, la Patagonia árida aparece siempre relacionada a intensa erosión eólica. Sin embargo, no se cuenta actualmente con un mapa de erosión de Comodoro Rivadavia (muy pocas ciudades argentinas lo tienen), y tampoco existe un mapa de suelos, aunque los suelos son más variados de lo que

pensamos, no son solamente “tierra volada”. En nuestra ciudad y sus alrededores dominan Aridisoles (suelos de zonas áridas, con régimen de humedad arídico) y Entisoles (suelos jóvenes, poco evolucionados, con nula a poca diferenciación de horizontes). En algunas cabeceras de mallines y valles no degradados, con abundante pastura, encontramos Molisoles (suelos con alto contenido de materia orgánica y alta saturación de bases), que también se encuentran en algunas mesetas o pampas cercanas a la ciudad con diferentes características florísticas y se mencionan en suelos desarrollados sobre la Formación Santa Cruz. Se ha referido en algunos estudios ambientales la presencia dudosa de Inceptisoles (suelos con poca meteorización). En zonas modificadas por el hombre, sus obras civiles, actividades industriales o extractivas se han definido Antrosiles (suelos formados o profundamente modificados por cultivo, ciertos tipos de irrigación, adición de materia orgánica u otros materiales) y Tecnosoles (suelos originados o modificados por actividades tecnológicas o mineras). Todos esos suelos corresponden a la jerarquía de Orden dentro de las taxonomías de suelos. En la ciudad aparecen diferentes subórdenes que son niveles de más detalle dentro de los órdenes de suelos arriba comentados. En la **Tabla I** se resumen los tipos de suelos en relación a la geomorfología y algunas de las zonas más afectadas por el temporal en la ciudad.

Geomorfología	Tipos de suelo dominante	Texturas dominantes	Algunos sitios de referencia	Algunas características particulares
Suelos costeros y de acantilados	Entisoles (Ortentes) y Argides	Areno franca a franco arenosa gravosa con alta participación de finos en algunos horizontes	Caminos costeros	Suelos con alto contenido de sales, algunos con importante desarrollo de concentraciones carbonáticas
Cerros Formación Sarmiento	Entisoles (Ortentes)	Franco arcillosa, franco arcillo limosa, franca	Camino al aeropuerto, zonas de Diadema Argentina, Manantial Rosales, Astra, Caleta Córdova.	Suelos muy incipientes en sitios con vegetación escasa, algunos los definen como “no suelos”. Su particularidad es la muy baja permeabilidad.
Planicies aluviales de cursos efímeros y antiguas planicies aluviales	Entisoles (Ortentes) y Psammentses, ¿Fluventes?) con Argides asociados	Franco arcillosa, franco limosa y franco arcillosa	Arroyo La Mata, Arroyo Belgrano, Cancha de Golf	Sustrato gravas fluviales y en algunos sitios sedimentos fluviales más finos. Áreas con desarrollo importante de montículos eólicos. Permeabilidad media a baja superficialmente
Pendientes bajas expuestas al Norte y Oeste	Entisoles (Ortentes)	Arenosas, arenosa francas, franco arenosas en horizontes A y con mayor participación de finos en profundidad	Camino a Manantial Rosales, Cañadón Brooks, Laprida, El Trébol, Diadema Argentina	Sustrato Formación Chenque o depósitos eólicos y coluviales. En zonas cercanas a planicies aluviales horizontes con mayor proporción de limo-arcilla. Presencia de restos fragmentados de fósiles marinos.
Pendientes pronunciadas y medias expuestas al Norte y Oeste	Argides y Calcides con Entisoles asociados	Arenosas en horizontes A de poco espesor. Francas, franco arcillosas, arcillosas en profundidad	Camino a Manantial Rosales y Laprida, Cañadón Brooks, Arroyo La Mata.	Sustrato Formación Chenque o depósitos eólicos y coluviales. Baja cobertura vegetal La presencia de horizontes Bt y calcáreos endurecidos los hace menos permeables
Pendientes bajas expuestas al Sur y al Este	Entisoles (Argides o Calcides asociados, no siempre)	Franco arenosas, francas, franco arcillosas en horizontes A	El Trébol, Diadema Argentina, Cañadón Brooks, Laprida.	Sustrato Formación Chenque y Rodados patagónicos o depósitos gravosos fluviales en cañadones y valles. Entisoles originados a partir de depósitos eólicos y coluviales.
Pendientes pronunciadas a medias expuestas al Sur y al Este	Argides, Calcides con Entisoles (Psammentses y Ortentes) asociados. En las de exposición Este a veces dominan	Areno francas, franco arenosas o francas en hztes A. Franco arcillosa, arcillo arenosa y arcillo limosa en profundidad. Horizontes Bt y cálcicos (Bk, Ck) bien	El Trébol, Laprida. Cañadón Brooks, Manantial Rosales, Diadema Argentina	Sustrato Formación Chenque. Entisoles con micro relieve de montículos medios a elevados y entremontículos Vegetación abundante, arbustos y subarbustos predominantes.

	Entisoles con horizontes A espesos.	desarrollados		
Mallines y fondos de valle degradados	Argides con Ortentes asociados. Suelen presentar salinidad y/o basicidad, algunos sódicos.	Areno franca, franca, franca arcillosa en horizontes A, muchas veces delgados (salvo montículos). Horizontes Bt bien desarrollados	Arroyo La Mata, zonas medias a bajas de Cañadón Brooks, El Trébol. Diadema Argentina, Cordón Forestal	Sustrato gravoso, generalmente carbonático. En algunos sitios se desarrolló un micro relieve superficial de montículos y entremontículos de texturas arenosas medias a finas
Cabeceras de mallines y valles no degradados. También pampas cercanas a la ciudad.	Molisoles (Xeroles)	Franca, franco arcillo arenosas	Cabeceras de Manantiales Bher, Cañadón Brooks, estribaciones de Pampa Salamanca o Castillo	Sustrato gravoso, algunos carbonáticos. Abundancia de gramíneas o pasturas en mallines y valles. Ganadería en algunos casos
Planicies fluviales, valles o cañadones con suelos hidromórficos con actividad agrícola o ganadera artesanal o familiar y emprendimientos recreativos	Antrosoles	Arenosas y franco arenosas en superficie. Arcillosas/arcillo arenosas y limosas en profundidad	Zonas de quintas y chacras, Km 14 y 17, Cañadón El Trébol, Laprida	Sustrato gravoso con carbonatos o Formación Chenque
Variadas	Antrosoles y Tecnoles	Arenosas, francoarenosas, arcillo-arenosas, arcillosas, mezclas de suelos y relleno antrópico, a veces con elementos industriales	Yacimientos petroleros y canteras principalmente. Cuencas de drenaje modificadas.	Sitios con alta compactación de suelos. Presencia de derrames de petróleo en algunos sitios. Acumulaciones de suelos finos.

Referencias: Argides: Aridisoles con hzte Bt argílico o rico en arcilla iluvial; Calcides: Aridisoles con horizontes cálcicos o petrocálcicos; Ortentes; Entisol diferente a todos los demás subórdenes; Psammentes: Entisoles de textura areno franca fina o algo más gruesa; Xeroles: Molisoles de rég humedad xérico. (La información de la tabla deriva de la tesis de Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales de la Geol. Isabel P. Castro, enero 2017, en evaluación)

Tabla 1. Tipos de suelos en relación a la geomorfología de Comodoro Rivadavia

Algunos efectos de la erosión hídrica sobre el suelo

La energía de las lluvias se disipa sobre la superficie del suelo produciendo la ruptura de los terrones y agregados (Cisneros, et al., 2012) dando lugar a la desagregación de las partículas del suelo por salpicadura, se produce un sello en la superficie del suelo y se ponen en suspensión las partículas desprendidas. De esta forma se afecta directamente la estructura del suelo, se modifican sus propiedades físicas como porosidad y permeabilidad debido a la compactación por el impacto de las gotas de lluvia. Por tanto, los horizontes superficiales con mayores niveles de nutrientes y materia orgánica son los más vulnerados, lo que se agrava ante un evento de precipitaciones extremo. Complementariamente, la saturación con agua del suelo evita el desarrollo de numerosos procesos bióticos relacionados con los ciclos de nutrientes y genera condiciones reductoras en el suelo. Se pierde además la retención de agua dentro del suelo y el almacenamiento en micro-depresiones de su superficie.

La escorrentía superficial produce el desprendimiento de nuevo suelo y el transporte del suelo removido, en una magnitud proporcional al caudal escurrido y a la velocidad que adquiere el flujo de agua sobre la superficie. Con ello se produce reducción o pérdida total de la cobertura vegetal y fauna del suelo, con consiguientes efectos sobre la productividad, favoreciendo la erosión en surcos y la generación de cárcavas.

La falta o pérdida de vegetación reduce la intercepción de parte de la precipitación por impacto contra el follaje de las plantas. Este mecanismo protector modifica la dirección

de las gotas de lluvia, evita el salpicado, reduce la compactación y disminuye la intensidad con la que llega el agua a la superficie del suelo, mitigando la erosión.

El transporte de los componentes del suelo hacia otros sitios modifica la naturaleza de los suelos que reciben los materiales transportados o contaminantes acarreados por los mismos, pudiendo impactar sobre el ecosistema, obras civiles, de drenaje y defensa emplazados aguas abajo.

Una parte importante de los sedimentos transportados por los cauces y depositados dentro de la ciudad corresponden a tamaños de arena fina a muy fina, reflejando la existencia de un tamaño de partículas de máxima susceptibilidad al desprendimiento de alrededor de 200 micrones (arena muy fina y fina). Es decir, este es el rango de tamaños en la cual la velocidad del agua necesaria es mínima (Cisneros, et al., 2012) y coincide con que la mayoría de los horizontes superficiales de nuestros suelos están compuestos por fracciones arenosas en ese rango. Las partículas de mayor tamaño son más pesadas, y en el caso de Comodoro Rivadavia también ingresaron provenientes del coluvio, superficies gravosas y sustratos del suelo por la alta velocidad y caudal de agua escurrido. Las partículas de menor tamaño tienen mayores fuerzas de cohesión (electroquímicas) o se mueven por suspensión, siendo finalmente transportadas al mar con el agua que las sostiene.

En la **Figura 4** se pueden ver los efectos de la tormenta en un mallín ubicado al Norte de nuestra ciudad. El suelo fue totalmente erosionado en una gran extensión, en algunos sitios fue reemplazado por sedimentos coluviales y aluviales que con el tiempo podrán o no dar lugar a nuevos suelos, se produjeron surcos y cárcavas. El suelo erosionado, junto a sedimentos de cañadones y pendientes aledañas, llegó a la zona costera.



Figura 4. Mallín ubicado al Norte de la ciudad y efectos de la tormenta sobre su suelo. a) antes de la tormenta, b) después de la tormenta, c) detalles de efectos de la erosión hídrica en ese mallín (Las fotografías no se podrán reproducir sin permiso de los autores).

4. PRECIPITACIONES HISTÓRICAS Y EVOLUCIÓN DE LA TORMENTA

En relación al evento climático que se analiza, se solicitó información del registro de precipitaciones y temperaturas de la Estación del Servicio Meteorológico Nacional instalada en el Aeropuerto General Mosconi (Enero de 1956-2017), y datos complementarios de pluviómetros de la Facultad de Ingeniería de la UNPSJB (Enero a Abril de 2017) y de la empresa Termap (28-03-2017 al 10-04-2017).

Comodoro Rivadavia se encuentra en una zona árida, seca y algo fría, caracterizada por fuertes y frecuentes vientos provenientes del oeste y con precipitaciones escasas. Estos vientos, que forman un cinturón alrededor del mundo entre los 40° y 60° de latitud Sur, traen consigo humedad del océano Pacífico y generan precipitaciones principalmente en la cordillera de los Andes. Los vientos húmedos del oeste descargan las precipitaciones en la Cordillera de los Andes, siendo secantes en su trayecto hacia el mar y con precipitaciones esporádicas, lo que genera un déficit hídrico significativo. Sin embargo, la influencia de masas de aire desde el Atlántico es cada vez más frecuente, mediante el establecimiento de niebla en la zona costera y de lluvias asociadas; este último sistema de circulación es recurrente durante los eventos de precipitaciones intensas y extremas de la zona. La Pampa del Castillo representa un umbral topográfico para el desplazamiento hacia el oeste de las masas de aire húmedo del Atlántico, y al oeste de la misma, sobre el valle seco del río Chico, las precipitaciones oscilan los 120 mm/año (Coronato y Del Valle, 1988). En invierno se registran las mayores precipitaciones pluviales y nivales, en tanto que durante la primavera y el verano, las precipitaciones se reducen notablemente en coincidencia con el aumento de la temporada ventosa y de mayores temperaturas.

La temperatura media anual del registro analizado (1963-2017) es de 12.9 °C (StD 0.5 °C), observándose un incremento de 0.7°C en la temperatura media anual dentro del período considerado. Datos publicados por la NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201703#top>) indicaron que la temperatura media mundial (terrestre y oceánica) en marzo de 2017 se ubicó 1.05 °C por encima del promedio del siglo XX (12.7°C). El mes se convirtió en el segundo marzo más cálido desde que comenzaron los registros mundiales de temperatura -en el año 1880- y quedó detrás del 2016, año del récord anterior, destacándose que es la primera vez que se produce una anomalía de temperatura mayor a 1 °C en ausencia de un episodio de El Niño en el Océano Pacífico tropical.

Para este estudio, se define un evento de precipitación diario como *intenso* si se encuentra dentro del 5% de todos los eventos de precipitación del período analizado, *muy intenso* cuando se encuentra en el 1% superior y extremo cuando se encuentra en el 0,1% superior de todos los eventos de precipitación. El uso del percentil específico se usará para evitar ambigüedades.

Para el período considerado, las precipitaciones medias son de 239.6 mm/año, con un registro máximo anual de 488 mm el año 1998. La media mensual es de 20 mm, con máximos de precipitación promedio durante el mes de mayo (34,5 mm/mes). Los valores promedio, sin embargo, son poco representativos de los patrones de precipitaciones, ya que se registran anualmente uno o dos eventos de lluvia intensa que concentran porcentajes entre el 30-40% de las precipitaciones acumuladas anuales, siendo este último el elemento característico de la región (Fig. 5).

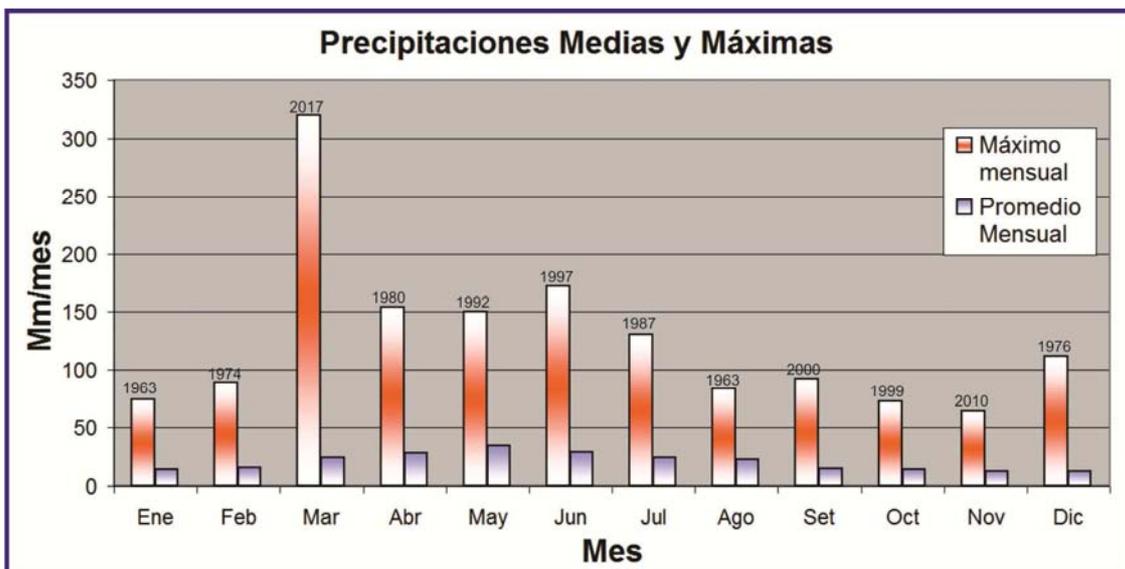


Figura 5. Promedio mensual y máximo de precipitaciones en Comodoro Rivadavia en el período 1963-2017. Las precipitaciones de marzo-abril 2017 han triplicado los registros mensuales máximos del período considerado (95,5 mm en el año 1976).

El análisis temporal de las precipitaciones máximas diarias revela que un evento de precipitación intenso es aquel que supera los 15 mm/día, en tanto que los eventos muy intensos exceden los 34,4 mm/día, y los extremos son aquellos en los que las precipitaciones diarias superan 59 milímetros. Del análisis de los datos se destaca un incremento en la recurrencia de eventos considerados muy intensos y extremos. Si se consideran las 12 (doce) precipitaciones más elevadas del período de 61 años analizado, entre el año 1956 y 1998 se registraron cuatro (4) días en los que se superaron los 50 mm diarios (7/5/1958, 2/1/1972, 8/4/1980 y 9/7/1991) en tanto que en los últimos 19 años se ha superado en ocho días este umbral (28/10/1999, 21/5/2003, 18/5/2008, 12/04/2011, 13/04/2011, 29/03/2017, 30/03/2017 y 07/04/2017). Se destaca que en los registros de precipitaciones de los años 2011 y 2017 el umbral diario de 50 mm se superó en días consecutivos o muy cercanos entre sí, favoreciendo la escorrentía superficial de los suelos y la tasa de erosión (ver mas adelante). Los valores de precipitaciones mensuales acumuladas durante el período 2000-2017 (**Fig. 6**) muestran máximos con recurrencia trianual, destacándose que los valores totales acumulados en los meses más lluviosos decrecen en el período indicado, con la notable excepción del evento socio-climático de 2017.

La tendencia decreciente en las cantidades totales de las precipitaciones en los últimos años se contrapone con un incremento aparente en los daños asociados a las lluvias dentro de la ciudad, identificados en una rápida revisión de los diarios locales. A partir de los datos de precipitaciones se reconoce que en todos los eventos trianuales de precipitaciones mensuales, al menos un (1) día ha registrado precipitaciones muy intensas.

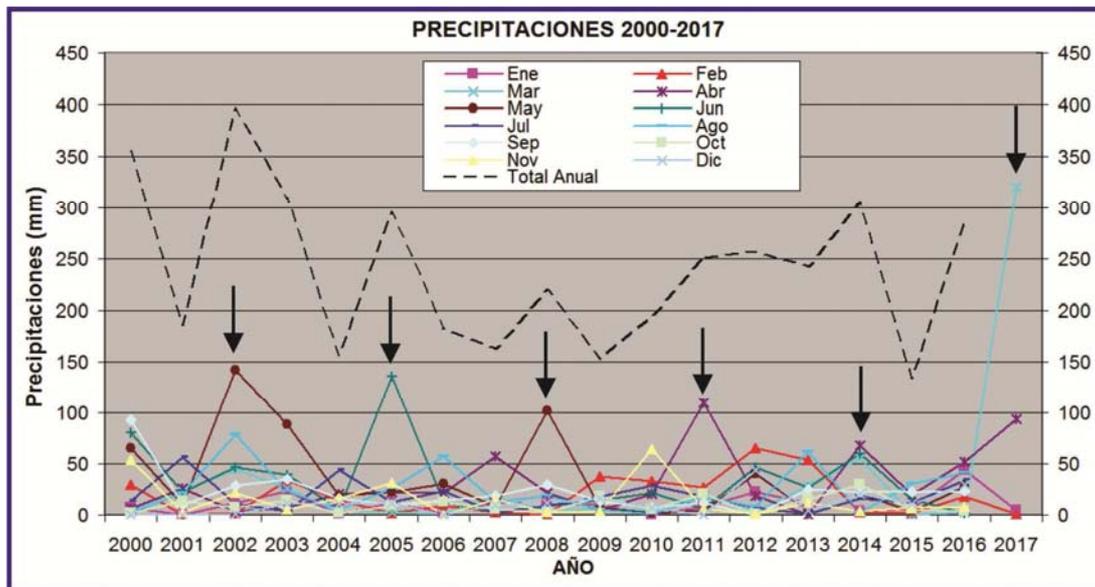


Figura 6. Registro de las precipitaciones mensuales del período 2000-2017. Se destaca la recurrencia trianual de máximos mensuales cercanos a los 100 mm entre los meses de marzo y junio, y los valores anormalmente bajos en las precipitaciones de los años 2004, 2007, 2009 y 2015.

Existe un número importante de estudios que han identificado un incremento en la recurrencia y en la intensidad de eventos muy intensos y extremos de precipitación, desde el primer trabajo de [Iwashima y Yamamoto \(1993\)](#). Los modelos climáticos indican además que los cambios en las precipitaciones intensas son mas probables si se incrementa la temperatura global ([Meehl et al., 2000](#), [Groisman et al., 2004](#)), en tanto que los Modelos de Circulación Global predicen mayor frecuencia de eventos de precipitación extrema, menor cantidad de días de lluvia y períodos de sequía mayores ([IPCC, 2007](#); [Rind et al., 1989](#)).

A través del modelo probabilístico de Gumbel (que corresponde a una distribución de valores extremos tipo I ó tipo exponencial) se analizó el período de retorno para las precipitaciones máximas diarias anuales de los datos del Aeropuerto de C. Rivadavia (**Fig. 7**). De la integración de la información analizada, se desprende que los 232 mm de precipitación máxima diaria, registrados en el Aeropuerto de C. Rivadavia (período considerado 1956-2017) resultan extremadamente inhabituales, inusitados e inusuales.

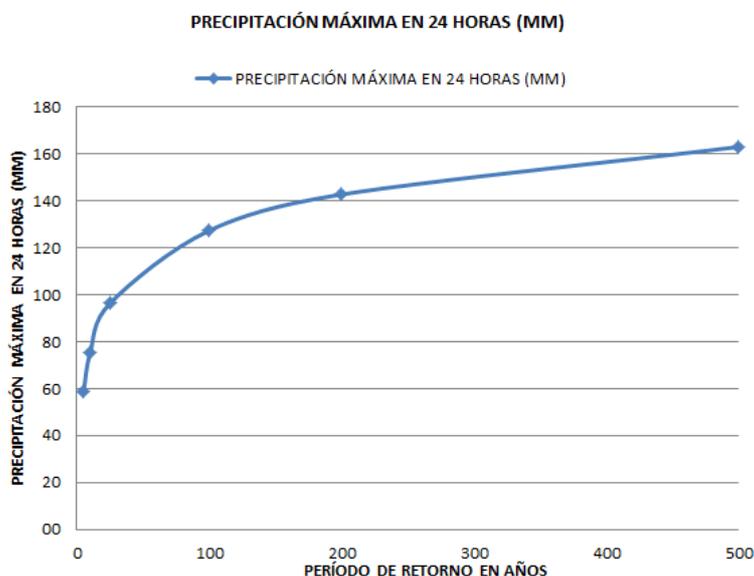


Figura 7: Curva teórica que relaciona la intensidad, duración y recurrencia de los eventos máximos de precipitación diaria, basado en datos de la estación del SMN en el Aeropuerto de Comodoro Rivadavia (1963-2017). Los datos reflejan que las precipitaciones del día 30 de marzo (232 mm) no se ajustan al patrón de precipitaciones local.

Evolución de la tormenta

El evento extremo de precipitación estuvo precedido por el establecimiento de niebla en los días previos sobre la costa atlántica, reflejando la aproximación de una masa de aire húmedo desde el Atlántico, con el establecimiento de un centro de alta presión a lo largo del margen Atlántico de Argentina y Uruguay. De forma simultánea, ocurrió el desplazamiento desde el oeste y hacia el Golfo San Jorge de un centro de baja presión que involucraba una masa de aire húmedo de buena estructura vertical y muy lento desplazamiento, que el día 29 de marzo alcanzaba una altura de nubes de 10 km (**Fig. 8**). El sistema de baja presión y desplazamiento hacia el este fue ralentizado por el frente de alta presión Atlántico, éste último estabilizado debido a una anomalía de temperatura positiva de la superficie del agua de mar. La temperatura superficial del agua de mar el día 30 de marzo fue de 15 °C, temperatura más alta de lo habitual para la época del año, con una anomalía de 1.5 °C. Una vez desencadenada la tormenta el frente de alta presión atlántico no se atenuó, por lo que la tormenta que se desplazaba de oeste a este no continuó su camino hacia el Atlántico y se estableció durante más de una semana sobre la cuenca del Golfo San Jorge.

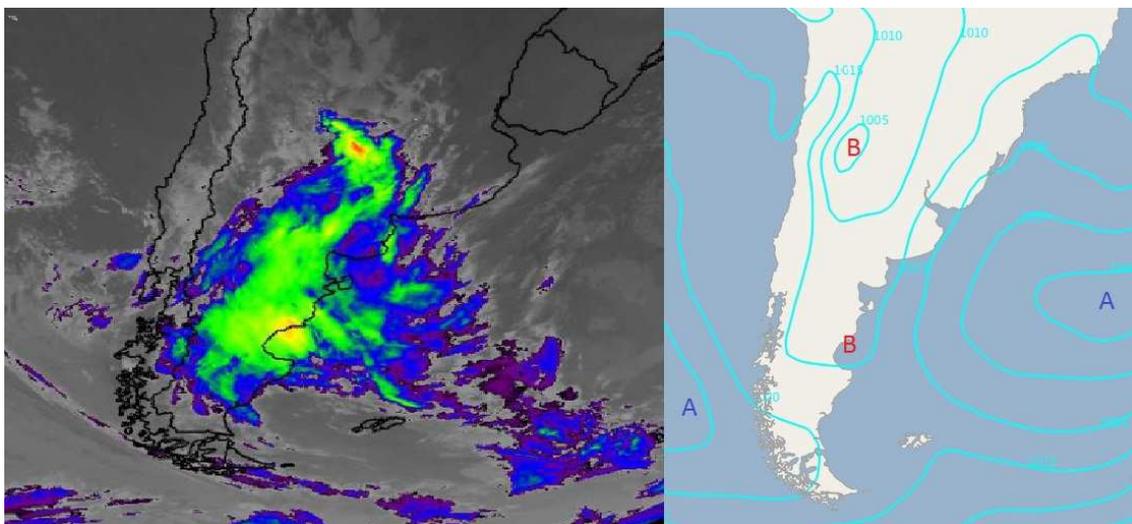


Figura 8. Imagen satelital de NASA en la que se visualiza el campo nuboso y de presión atmosférica sobre el nivel medio del mar para el 29 de marzo de 2017 (21 Hora Oficial Argentina). Clave: : Alta presión atmosférica; B: Baja presión atmosférica.

Los datos presentados en la **Figura 9** muestran la distribución horaria de las precipitaciones obtenidas con pluviómetros de la Facultad de Ingeniería (UNPSJB) y de la empresa Termap, que registraron un total de 361,2 y 343,4 mm de precipitaciones entre el 25 de marzo y el 09 de abril, respectivamente. Los registros del SMN indican 399,4 mm de lluvia acumulada en el período considerado. Los patrones de distribución de lluvia son comparables entre ambos pluviómetros, excepto por la presencia de un valor de 62 mm caídos entre las 6:00 y las 6:10 a.m. del día 30 de abril en Km 4, que no aparece identificado en Caleta Olivares. Este tipo de variabilidad es común en el registro de tormentas de diferente origen. Se presenta además una comparación de la distribución de precipitaciones cada seis (6) horas (**Fig. 10**) entre el 29 y el 31 de marzo, en la que se destacan las variaciones espaciales en la distribución de lluvia entre los tres registros disponibles.

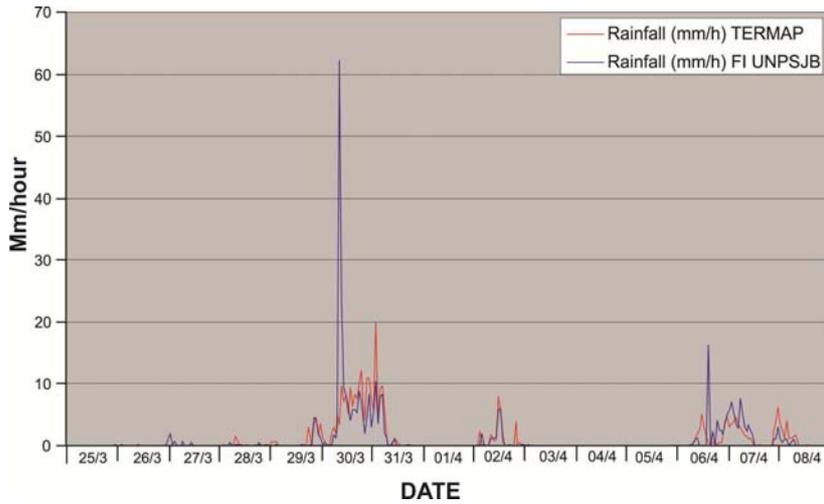


Figura 9. Registro comparado de los pluviómetros con los que se analizó el comportamiento y evolución de la tormenta. Notar el pico de precipitación de 62, 5 mm entre las 06:00 y 6:10 a.m. en el pluviómetro de Km. 4, no identificado en Caleta Olivares.

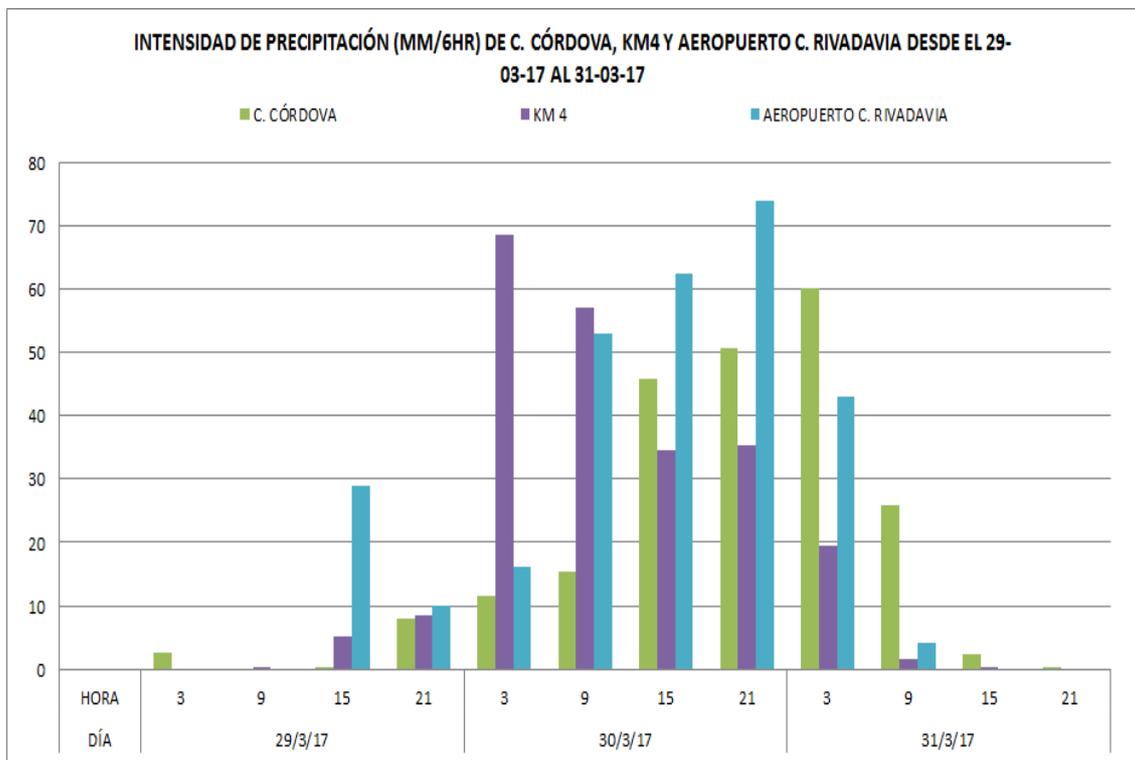


Figura 10. Intensidad de precipitación (mm/6 horas). Comparación del registro de los pluviómetros de las estaciones ubicadas en Caleta Córdova (Termap), UNPSJB (Facultad de Ingeniería) y la Estación del Aeropuerto de Comodoro Rivadavia (Servicio Meteorológico Nacional) para el período entre el 29 y el 31 de marzo de 2017.

5. SISTEMAS FLUVIALES EFÍMEROS DE COMODORO RIVADAVIA

a) Definición y principales características

Un sistema fluvial está conformado por un conjunto de canales conectados en ambiente continental, limitados por una divisoria de drenaje. La cuenca de drenaje es el área que aporta agua y sedimentos al sistema fluvial, y está limitada por la divisoria de drenaje. Todas las áreas que tienen drenaje superficial se dividen en exorreicas o endorreicas de acuerdo a si los sistemas de canales drenan hacia el mar o lo hacen hacia una cuenca de drenaje interior, respectivamente (**Fig. 11**).

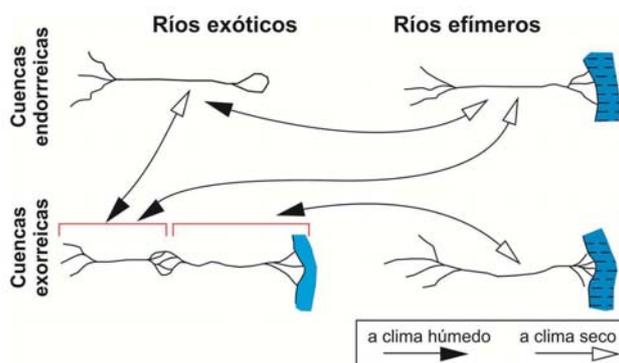


Figura 11. Modificaciones de los tipos de ríos de acuerdo al régimen climático. Los ríos exóticos pueden transformarse en efímeros en condiciones secas. Los sistemas exorreicos pueden también desconectarse del mar y formar cuencas endorreicas durante crisis hidrológicas. Modificado de Ori et al. (2007)

A su vez, dependiendo del balance entre descarga acuosa y pérdidas por evapotranspiración, los sistemas fluviales pueden ser perennes o efímeros. Los sistemas fluviales pueden gradar entre las categorías mencionadas de acuerdo a variaciones en las condiciones hidrológicas. Los *sistemas fluviales efímeros* son comunes en zonas áridas a hiper-áridas, y típicos de la Patagonia. Tienen cuencas de drenaje pequeñas (centenares de km²) y con pendientes empinadas, con canales rectos o entrelazados, y se desplazan sobre áreas en las que la cobertura vegetativa es escasa y los suelos son delgados y con poco desarrollo. Se caracterizan por períodos extensos en el que el sistema fluvial está seco, interrumpidos por grandes inundaciones con altos picos de descarga acuosa y condiciones de alto régimen de flujo; pueden preservar depósitos de areniscas eólicas en el lecho del cauce, acumuladas en los períodos secos, los que son removilizados durante las precipitaciones. La **Figura 12** ilustra la organización de las redes de drenaje efímeras que desembocan dentro y alrededor de la ciudad de Comodoro Rivadavia.

Desde el punto de vista hidrológico, el flujo acuoso dentro de los cauces es intermitente debido a que los canales están hidráulicamente desconectados de los acuíferos; el flujo solo es perenne cuando los canales intersectan acuíferos. Por tanto, el flujo dentro de los canales depende casi exclusivamente de los eventos de precipitaciones (Beven, 2002; Borga et al., 2014) y está muy controlado por las condiciones de humedad del sustrato que anteceden a las lluvias intensas (Longobardi et al., 2003).

El estudio de los sistemas fluviales efímeros se centra en los procesos y depósitos que ocurren en épocas de lluvias muy intensas o extremas (floods), en los que se transportan grandes volúmenes de agua y de sedimento durante cortos períodos de tiempo y que dan lugar a inundaciones líquidas, flujos de barro o flujos de detritos. El tipo de proceso desencadenado depende de características hidrológicas, geomorfológicas, y rasgos geotécnicos de las pendientes, de la naturaleza del sustrato rocoso y disponibilidad de sedimentos, y de la magnitud y frecuencia del evento de precipitación. Comúnmente

asociados a los eventos de precipitaciones intensas tienen lugar deslizamientos gravitacionales de diferente tipo.

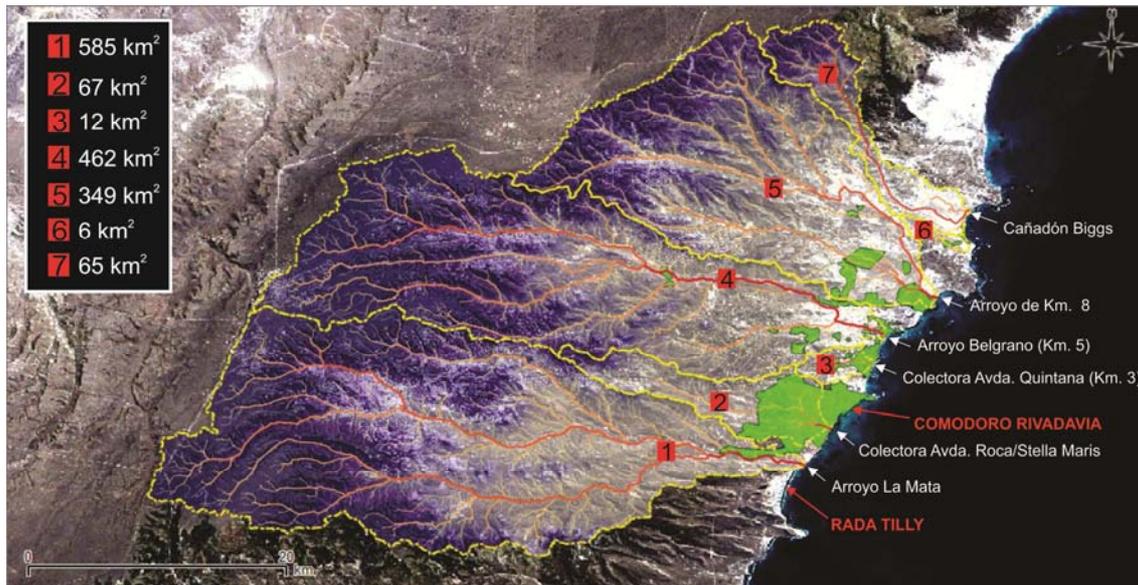


Figura 12. Cuencas de drenaje efímeras o estacionales de los alrededores de Comodoro Rivadavia. El recuadro indica el área de las cinco cuencas que drenan dentro y alrededor de la ciudad. Las cinco cuencas de drenaje se activaron durante el evento socio-climático de marzo-abril 2017.

Entre los factores dominantes que condicionan el comportamiento hidrológico de las cuencas de drenaje, la geología es comúnmente mencionada como una variable importante. A escala de cuenca de drenaje, la geología controla los procesos hidrológicos de varias formas, como ser (1) condiciona las direcciones de flujo del agua superficial y sub-superficial, con implicancias en el tiempo de tránsito del agua dentro de la cuenca de drenaje (Sayama et al., 2011, Sayama y McDonnel, 2009; Rinaldo et al., 2011), (2) indica la naturaleza del contacto entre los horizontes de suelo y el sustrato rocoso, determinando la formación de flujo preferencial que gobierna la respuesta rápida durante los eventos de alta intensidad (Weiler y McDonnel, 2007), y (3) controla la permeabilidad del sustrato, que impacta en el balance de agua a escala de cuenca de drenaje. Además, se considera que la geología está directamente relacionada con la capacidad de almacenaje de agua de la cuenca, que es de gran importancia en la dinámica del ciclo del agua (Sayama et al., 2011) y la que condiciona fuertemente las condiciones de humedad antecedente.

El entendimiento de los sistemas fluviales efímeros es en general limitado debido a que faltan registros de datos a escala detallada. En las cuencas efímeras que se encuentran alrededor y dentro de la ciudad de Comodoro Rivadavia no existe ninguna estación de aforo que mida caudales o volúmenes de transporte de sedimento durante los eventos de precipitaciones, por lo que los cálculos para el dimensionamiento de los sistemas de desagote son aproximados. La deficiencia de datos hidrológicos se debe a (1) dificultades técnicas para hacer mediciones de caudal en canales efímeros, (2) bajo interés económico de estos sistemas fluviales, y (3) baja frecuencia relativa en la que los canales llevan agua.

En la zona de estudio se reconocen múltiples sistemas fluviales inactivos, que han labrado el paisaje en eventos de magnitud mayor o similar al ocurrido en marzo-abril de 2017. Estos sistemas se han desarrollado y organizado durante precipitaciones torrenciales, siendo parcialmente modificados por procesos eólicos o asociados a deslizamientos gravitacionales. Las evidencias geológicas indican la presencia de

sistemas de canales entrelazados y meandrosos en el pasado reciente, que han sido fuertemente modificados por acción antrópica.

A modo de ejemplo, se presenta la imagen de Google TM correspondiente al arroyo que desagota al norte del Barrio Restinga Alí, inmediatamente aguas arriba del puente que une Km8 con Caleta Córdova (**Fig. 13**). En esa localidad existen evidencias preservadas de procesos de migración gradual y súbita de los canales, canales abandonados asociados a procesos avulsivos, y un canal activo de dimensiones pequeñas en relación al ancho de la faja en la que el cauce puede migrar. Durante las elevadas precipitaciones de marzo-abril 2017 se produjo el ensanchamiento del cauce, ocupando todo el ancho del valle y ensanchándolo en el margen occidental, lo que derivó en la destrucción total de numerosas viviendas emplazadas dentro del lecho y la destrucción parcial de viviendas que se encontraban emplazadas a pocos metros del antiguo margen del valle fluvial.

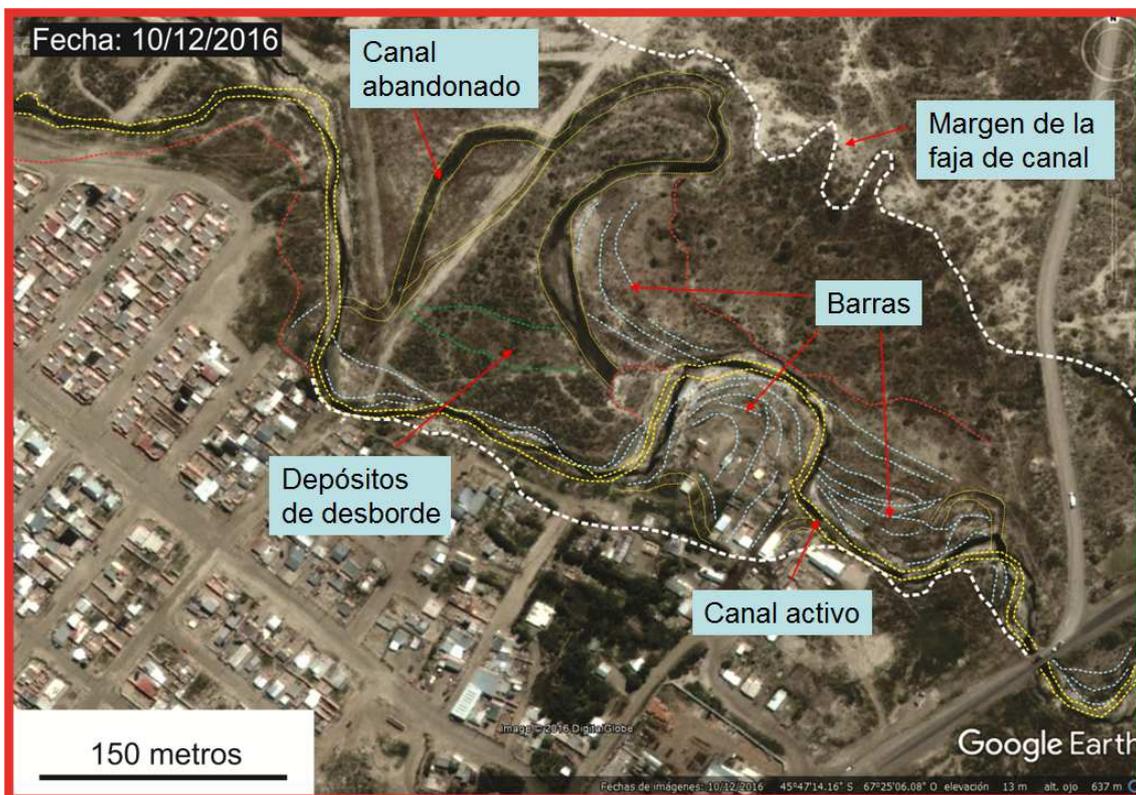


Figura 13. Características de los sistemas de canales asociados al arroyo de Restinga Alí. En el extremo inferior izquierdo se observa el puente que durante la tormenta cortó la ruta que conecta con Caleta Córdova.

b) Inundaciones repentinas (flash floods)

Las crecidas repentinas son fenómenos caracterizados por lluvias intensas de corta duración, con alta relación entre los máximos de descarga y la descarga media anual (Georgakakos, 1986). Se desencadenan generalmente por una combinación de precipitaciones intensas con alta producción de escorrentía, aunque también pueden generarse por una combinación de nieve derretida, o por precipitaciones moderadas que tienen lugar sobre un sustrato previamente saturado. El intervalo de tiempo entre el máximo de precipitación y los valores de máxima descarga (*lag time*) dentro del cauce son típicamente menores a 24 horas (Hill *et al.*, 2010). Durante los eventos de precipitación, el flujo superficial se puede producir tanto por saturación del suelo o por excedencia de la infiltración del suelo inicialmente seco debido a alta intensidad de las

precipitaciones y la escorrentía. La humedad del suelo puede variar desde cerca del punto de marchitez a encontrarse saturado, y se lo considera el factor del suelo más importante para el desarrollo de escorrentía rápida e inundación. Los suelos saturados impiden la infiltración del agua de lluvia y favorecen la escorrentía, por lo que es importante conocer en que momento el suelo alcanza su capacidad de retención de agua. Esta información cambia entre tormenta y tormenta, en contraste con otras características que no se modifican entre eventos de precipitación (pendientes, relieve, porcentaje de cobertura vegetativa, área de la cuenca de drenaje). Directamente relacionado con la capacidad de retención de agua de los suelos está el comportamiento de la tormenta, especialmente su intensidad y duración, y el momento en que se alcanza la capacidad de infiltrar agua del suelo; la respuesta del suelo y la inundación resultante será diferente si este límite se alcanza al inicio de la tormenta o en las últimas etapas de la misma. El evento de precipitación del 29 de marzo comenzó a las 17:35 con alta intensidad, registrando máximos de intensidad local de 62 mm/hora el día 30 de marzo y totalizando en el período de 12 días valores entre 345-400 mm totales de acuerdo a la localización del punto de medición.

La cuenca de drenaje de los barrios Saavedra y Km.3 es muy pequeña (6,2 km²); el curso principal y tiene un desnivel máximo de 234 metros, con una pendiente promedio de 3,71%. Basados en relaciones establecidas para cuencas de drenaje en los que operan procesos de inundación repentina (Creutin *et al.*, 2013) se obtiene un tiempo de retardo (*lag time*) de 23 minutos, y de acuerdo a los datos morfométricos de la cuenca el tiempo de concentración (el tiempo que una gota de lluvia se mueve desde las cabeceras hasta el punto de desembocadura) es de 18 minutos, por lo que cualquier intervención ingenieril que se realice en esta cuenca debe concentrarse en generar un sistema eficiente del agua, y producir un sistema de alertas tempranas que contemplen tiempos de resguardo de bienes y de personas que consideren estos plazos. La intensa erosión generada en la avenida Fray Luis Beltrán en el acceso al Barrio Médanos ha estado fuertemente condicionada por (1) la ubicación previa de un cañadón en la posición actual de la avenida, y 2) la falta de revestimiento de hormigón de los márgenes del asfalto, que inició un proceso de cárcavamiento en el margen de la avenida que provocó el colapso gravitacional de la misma durante el desarrollo de la tormenta. Aguas abajo, en la intersección de la masa de agua con la Ruta Nacional N°3, el soterramiento de la red pluvial favoreció el endicamiento y la inundación.

c) Análisis morfométrico y caudales obtenidos

c.1 Análisis morfométrico

Cada cuenca de drenaje define una unidad de análisis particular que permite la comprensión de los procesos hídricos ocurridos hasta el momento en función de parámetros básicos como área, pendiente, longitud de cursos, etc.

La delimitación de cada cuenca y redes de drenaje, se elaboró con softwares de tipo SIG (QGIS 2.18.4), mediante digitalización manual y automática a partir de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación (DEM).

La ciudad de Comodoro Rivadavia se encuentra sobre el faldeo oriental de la Pampa del Castillo y está ubicada sobre varias cuencas hídricas. Se evaluaron para este estudio las 7 cuencas que desembocan dentro de la ciudad (**Fig. 12**). A continuación se detallan los barrios de la ciudad que cada cuenca aloja.

1. Cuenca del Cañadón Biggs: Sector norte de Caleta Córdova
2. Cuenca de Caleta Córdova: Caleta Córdova

3. Cuenca de Km 8: Astra, Km 11, Km 14, Km 12, Km17, Km8, P. Palazzo, Restinga Alí.
4. Cuenca del Arroyo Belgrano: Diadema, Ciudadela, Laprida, Sarmiento, Güemes, Castelli, Rodríguez Peña y Km 5.
5. Cuenca de Km 3: Saavedra y Mosconi
6. Cuenca del Arroyo La Quinta: zona sur de la ciudad, entre ellos los barrios más afectados Juan XXIII, Tres Pinos, Moure, 30 de Octubre, Roca, Stella Maris.
7. Cuenca del Arroyo La Mata: Arenales y sector industrial.

Para este análisis se excluyeron las cuencas que alojan los siguientes sitios: sector céntrico, sector norte de Km 3 y Km 4, y la ciudad de Rada Tilly.

El trabajo principal consistió en digitalizar y parametrizar (cantidad, longitud y pendiente) todos los cursos que integran las mencionadas redes de drenajes efímeras y estacionales. Se calcularon los parámetros fundamentales de cada una de las cuencas (área, perímetro, longitud, ancho, desnivel, pendiente promedio, etc.) con el objeto de estimar los índices y coeficientes que permitan explicar y predecir su comportamiento en futuras tormentas.

Para una mejor visualización de los datos, se realizaron gráficos comparativos (**Fig. 14**) que se describen a continuación.

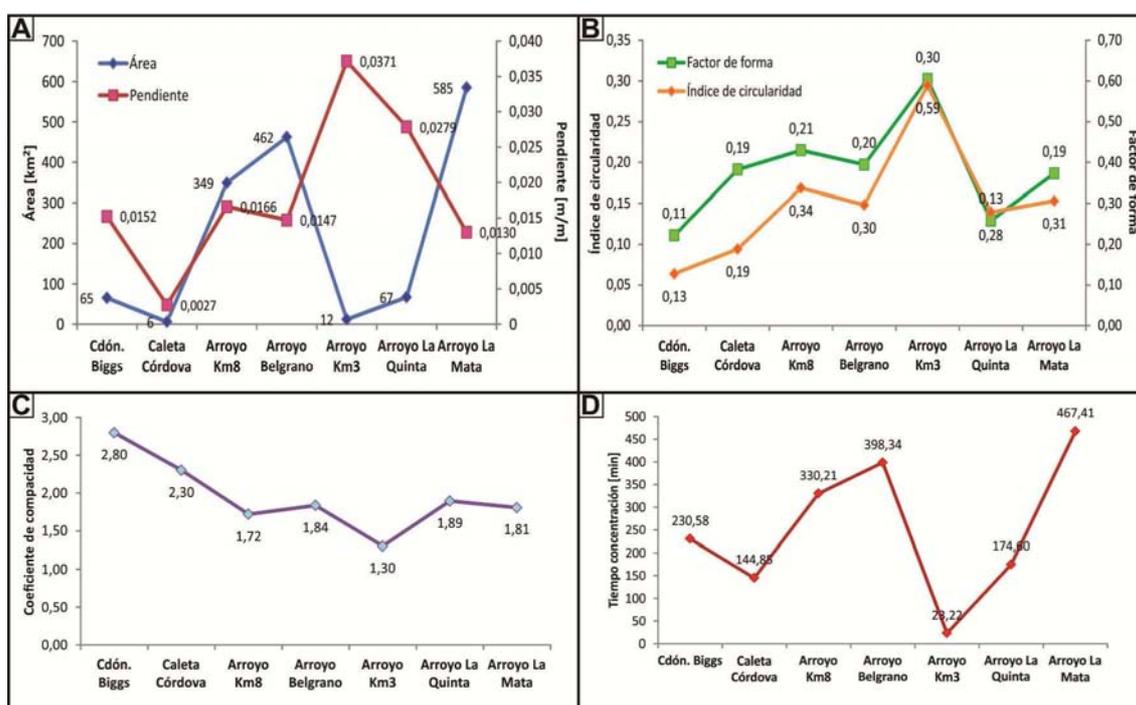


Figura 14. Relaciones principales de parámetros morfométricos de las cuencas analizadas. a) Área y pendiente. (b) Índice de circularidad y factor de forma. (c) Coeficiente de compacidad (Gravelius). (d) Tiempo de concentración en minutos.

El gráfico A de la figura 14 muestra que las pendientes de las cuencas, en la mayoría de los casos son elevadas. En particular la de Km 3 y La Quinta, 3,71% y 2,79% respectivamente. Las cuencas Cañadón Biggs, Km 8, Belgrano y La Mata se encuentran en un rango entre 1,30% y 1,66%. La de menor pendiente es Caleta Córdova, con 0,27%. Respecto a las áreas, es notable las dimensiones que presentan las cuencas con cabeceras en la Pampa del Castillo, ya que confluyen varios cañadones, exceptuando la

del cañadón Biggs (65 km²). Las cuencas con áreas más pequeñas son Caleta Córdova y Km 3.

Se calcularon un conjunto de parámetros que tienden a caracterizar la forma de las cuencas de drenaje (**Figs. 14 B y C**): índice de circularidad (relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo de igual perímetro), factor de forma (relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud del curso principal) y coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (relación entre el perímetro de la cuenca y el de un círculo de área equivalente). En términos generales, cuando la geometría de la cuenca se aproxima más a un círculo, la efectividad de la descarga del drenaje es mayor.

En relación al factor de forma, las cuencas alargadas tendrán valores más pequeños. El gráfico B muestra que las cuencas más alargadas, según este índice son Biggs (0.11) y La Quinta (0.13), luego las que tienen valores comparables entre sí son Caleta Córdova, Km 8, Belgrano y La Mata (entre 0.19 y 0.21) y la de mayor valor es Km 3 (0.30). El índice de circularidad muestra similar tendencia al parámetro anterior. Los valores que tiendan a la unidad, indicarán que la forma de la cuenca se asemeja más a la de un círculo. Ambos índices, tanto el de forma como el de circularidad, están en estrecha relación con la capacidad de atenuar las crecidas. El índice de circularidad de Km 3 es el más elevado ($I_c = 0.59$), lo que representa que es la cuenca con forma más circular de las analizadas y por ende con menor capacidad de atenuar las crecidas, por lo que el agua tiende a llegar a la colectora de la Avda. Quintana al mismo tiempo desde diferentes partes de la cuenca, generando un caudal máximo mayor. El gráfico de la **Figura 14.C** muestra la representación de los coeficientes de compacidad, donde las cuencas Biggs y Caleta Córdova son las que tienen valores más elevados, mientras que la de Km 3 es la más cercana a 1.

El tiempo de concentración de una cuenca representa el lapso de tiempo que le lleva a una gota de agua viajar desde las cabeceras hasta algún punto de la red de drenaje. Este parámetro T_c se calculó con el método de Kirpich, que tiene en cuenta la pendiente media del curso principal y su longitud máxima. La ecuación está diseñada para pendientes empinadas (3-10°) y los cursos de 1° orden medidos son en promedio de 4° (~7%). En todos los casos el tiempo de concentración hasta llegar al punto de salida de cada cuenca es menor a 8 horas (**Fig. 14D**). En particular, el caso más alarmante es el de la cuenca de Km. 3, donde el valor de T_c calculado fue de **23 minutos** (valor ajustado al escurrir sobre asfalto o concreto en su mayor parte), el cual que se aproxima a los valores reales observados el día 29/03/2017. Esta información se considera de gran importancia para la creación de protocolos de emergencia y evacuación según cada sector de la ciudad.

c.2 Estimación de caudales

En dinámica de fluidos, se denomina caudal a la cantidad de fluido que circula a través de determinada sección (conducto o canal) por unidad de tiempo. Los sistemas fluviales que surcan la ciudad de Comodoro Rivadavia son de tipo efímero, es decir que sólo presentan descarga acuosa de forma eventual y episódica. Sin embargo, las precipitaciones extremas de fines de Marzo de 2017 dejaron en evidencia que los caudales de diseño de las obras de evacuación deberían ser revisados, ya que la mayoría de ellas fueron superadas y destruidas.

El caudal se define matemáticamente como $Q = A \cdot V$ (A = área o sección, V = velocidad del flujo). Otra fuente opcional para el cálculo del caudal de máxima descarga surge de utilizar la ecuación de Manning para flujos uniformes $Q = (1/n) \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$ donde A es la sección del cauce en m², R es el radio hidráulico ($R = A/P$, donde A es la sección del cauce y P el perímetro mojado), S es la pendiente del canal y n es el factor de rugosidad

de Manning. Este último coeficiente es determinante en el cálculo de caudal con la ecuación de Manning, ya que es inversamente proporcional a éste; variaciones en 0,001 del valor de n representa aproximadamente cambios del 3% del caudal. El valor de n puede ser aproximado por tablas según el material por el cual escurra el agua, aunque supone una fuente de incertidumbre importante. A partir de la propuesta de Jarrett (1984) se ha aceptado que el grado de fricción con el fondo del lecho no sólo depende del material que lo constituye sino que también es función de la pendiente del curso, en particular a partir de valores superiores a 0,002 m/m de pendiente, donde $n = 0,032.S^{0,38}.R^{-0,16}$. Más tarde, Georgakakos *et al.* (1991) presentan una alternativa en el cálculo de n para canales naturales basada en Jarrett (1984), pero incorporando la profundidad (D), donde $n = 0,43S^{0,37}/D^{0,15}$. Por este motivo, se realizaron estimaciones de caudal tanto a partir de la fórmula de $Q = A.V$ como utilizando la ecuación de Manning, calculando valores de n para cada caso particular.

De las redes de drenaje analizadas en la zona urbana y peri-urbana de Comodoro Rivadavia, la mayoría de ellas sufrió algún tipo de endicamiento en sus zonas bajas durante la tormenta. Por este motivo, los cauces alcanzaron profundidades y anchos anormalmente elevados durante la tormenta. En el caso de la red de Km.8-Restinga Alí, la escorrentía durante el 30/03 superó ampliamente la capacidad evacuadora del pluvial bajo la ruta Prov. N°1 y el terraplén de la ruta generó endicamiento. Algo similar ocurrió en el pluvial de la calle Quintana al colapsar su capacidad evacuadora con la lluvia del Miércoles 29/03 a la tarde, en su paso bajo la ruta Nac. N°3. También el Arroyo la Mata aumentó su nivel de forma anormal a raíz de la contención que hizo el separador de carriles dispuestos sobre la ruta Nac. N°3, a pocos cientos de metros de la rotonda entre las rutas 3 y 26. Una de las pocas obras que soportó la energía y el caudal durante la tormenta fue el puente dispuesto sobre el arroyo Belgrano en la ruta Prov. N°1, en el ingreso sur del barrio Presidente Ortiz.

Arroyo Belgrano

Los restos de vegetación dejados en la parte más elevada del puente y las evidencias de desbordamiento pocos metros aguas arriba del puente, indican que la sección del puente estuvo ocupada completamente por el flujo en el pico de la tormenta. Se utilizó la sección rectangular del cauce bajo el puente para simplificar la medición de los parámetros geométricos. Las observaciones del flujo acuoso durante la crecida (ondas estacionarias y antidunas), las estructuras sedimentarias preservadas (alto régimen) y los videos que reportan el transporte por flotación de objetos, indican velocidades de flujo entre 2-4 m/s. Los valores de caudal que resultan de la ecuación $Q = A.V$ con distintos valores de velocidad están resumidos en la **Tabla 2**. Al mismo tiempo, se calcularon los caudales con diferentes modos de estimar los coeficientes de rugosidad n a partir de la ecuación de Manning (**Tabla 3**).

Arroyo La Mata

A partir de imágenes satelitales, modelos de elevación digital y material fotográfico y de video obtenido durante las inundaciones, se pudieron estimar valores de caudal para el Arroyo La Mata, en proximidades de la rotonda entre las rutas N°3 y 26. Los resultados están resumidos en las **Tablas 3** (Ec. $Q=A.V$) y **4** (Ec. De Manning).

Arroyo	Ecuación	A (m ²)	V (m/s)	Q (m ³ /s)
Belgrano	Q = A . V	60	2	120
Belgrano	Q = A . V	60	3	180
Belgrano	Q = A . V	60	4	240
La Mata	Q = A . V	382	2	764
La Mata	Q = A . V	382	3	1146
La Mata	Q = A . V	382	4	1528

Tabla 2. Cálculo de caudales para los Arroyos Belgrano y La Mata según la ecuación Q=A.V.

Arroyo	Ecuación	n		S (m/m)	A (m ²)	R (A/P)	Q (m ³ /s)
Belgrano	Manning	Jarrett (1984)	0,0494	0,0112	60	2,727	250
Belgrano	Manning	Georgakakos et al. (1991)	0,0641	0,0112	60	2,727	193
La Mata	Manning	Jarrett (1984)	0,0497	0,0109	382	2,465	1463
La Mata	Manning	Georgakakos et al. (1991)	0,0656	0,0109	382	2,465	1109

Tabla 3. Cálculo de caudales para los Arroyos Belgrano y La Mata según la ecuación de Manning.

De todos los valores obtenidos para el Arroyo Belgrano, se consideran más razonables: 1) los calculados a partir de Q=A.V con velocidades de flujo de 3m/s (180 m³/s), 2) los calculados con la ecuación de Manning utilizando el cálculo del coeficiente de rugosidad según [Georgakakos et al. \(1991\)](#) (193 m³/s). Los valores obtenidos para el Arroyo La Mata se consideran sobrestimados a causa del endicamiento y no deberían ser tenidos en cuenta como referencia.

6. PROCESOS DE EROSIÓN, TRANSPORTE Y DEPOSITACIÓN

La elevada intensidad y la duración del evento de precipitaciones que se inició el miércoles 29 de Marzo a las 17:35 hs produjeron modificaciones de tamaño considerable en todas las redes de drenaje que desembocan dentro de la ciudad de Comodoro Rivadavia. Estas modificaciones se reflejan en:

- (1) Desarrollo generalizado de cárcavas dentro de la ciudad y en la zona periurbana, alcanzando en numerosas ocasiones las zonas altas de las redes de drenaje.
- (2) procesos de removilización de sedimento alojado dentro de la red de drenaje y su traslado pendiente abajo, depositando parte de su carga dentro de la ciudad y en la desembocadura de los cauces.
- (3) Inundaciones repentinas de las partes bajas de la ciudad, debido a
 - a. drenaje ineficiente del agua por las colectoras, con taponamiento y rotura de entubaciones y pluviales, que resultaron de dimensiones menores a las necesarias para evacuar los caudales que tuvieron lugar.
 - b. Actividad antrópica sobre cauces inactivos, que impidió el drenaje natural o lo desvió hacia pluviales que resultaron ineficaces.
 - c. Infraestructura estable permanente sobre antiguos bajos sin salida.

a) Formación y profundización de cárcavas en el casco urbano y en las cabeceras

Un proceso particularmente importante durante el evento socio-climático ha sido la generación de cárcavas de hasta 10-12 metros de profundidad y extensión de cientos de metros de longitud, con anchos de hasta 20 metros, muchas de ellas en áreas en las que no existían evidencias significativas de erosión. Las cárcavas son canales profundos en laderas, generalmente producidas por aguas superficiales, y que frecuentemente no contienen flujo perenne (Kirbky y Bracken, 2009). Son rasgos aislados que inciden sobre una superficie cuasi-planar previa, y típicamente tienen sección rectangular o en V (Bull y Kirkby, 1997). Las cárcavas, una vez formadas, tienen a seguir creciendo, y son muy difícil (y costosas) de erradicar. El factor más importante para predecir la presencia de cárcavas permanentes es la pendiente local, aunque la mayoría de las cárcavas están desencadenadas por cambios en el uso de las laderas por acción del hombre. Taparlas sin efectuar mitigaciones adicionales no soluciona el problema. Por eso, es importante entender los procesos de formación de cárcavas y la sensibilidad de las áreas a su formación, para recomendar y adoptar medidas preventivas que minimicen el riesgo de formación de nuevas cárcavas y reduzcan o reviertan el crecimiento de las existentes.

Las cárcavas se inician comúnmente a partir de surcos erosionales que concentran la escorrentía superficial durante las lluvias. El proceso de erosión en surcos (*rill erosion*) da lugar a numerosos cursos de <30 cm de profundidad, sub-paralelos y cercanamente espaciados moviéndose pendiente abajo por una superficie plana hacia un cauce principal por un proceso conocido como micropiratería. La diferencia entre los surcos de erosión y las cárcavas (*gullies*) depende de su ubicación en el paisaje y de las dimensiones de los canales. Las pendientes mínimas críticas de 2°, 5° y 8° se mencionan para el desarrollo de surcos de erosión, cárcavas someras (entre 0,3 y 2 m de profundidad) y cárcavas profundas (mayores a 2 m de profundidad), respectivamente. En muchos casos, los diseños que tienen las cárcavas están fuertemente condicionados por las propiedades de los suelos o la litología subyacente, que pueden relacionarse con esfuerzos tensionales o compresionales de la superficie terrestre. Estos esfuerzos,

inducen la formación de fracturas que funcionan como zonas de debilidad y como iniciadores de los procesos de meteorización. En el terreno, una vez generada una superficie cóncava el flujo tiende a concentrar el flujo, y de esta forma se aceleran los procesos de eluviación de las partículas de suelo, disminuyendo la superficie del suelo. La mayor parte de los suelos de la región tienen suelos que presentan concentraciones variables de sales o crustificaciones superficiales, las que producen un efecto ambivalente en el desarrollo de las cárcavas. Por un lado, estas crustificaciones o concentración de sales superficiales retardan la iniciación de las cárcavas, debido a su resistencia a la cizalla mayor a los suelos sin crustificaciones. Por otro lado, como de esta forma se favorece la escorrentía superficial el flujo durante las lluvias tiende a concentrarse aguas abajo, se reduce la infiltración y se forman cárcavas en las zonas bajas por exceso de escorrentía.

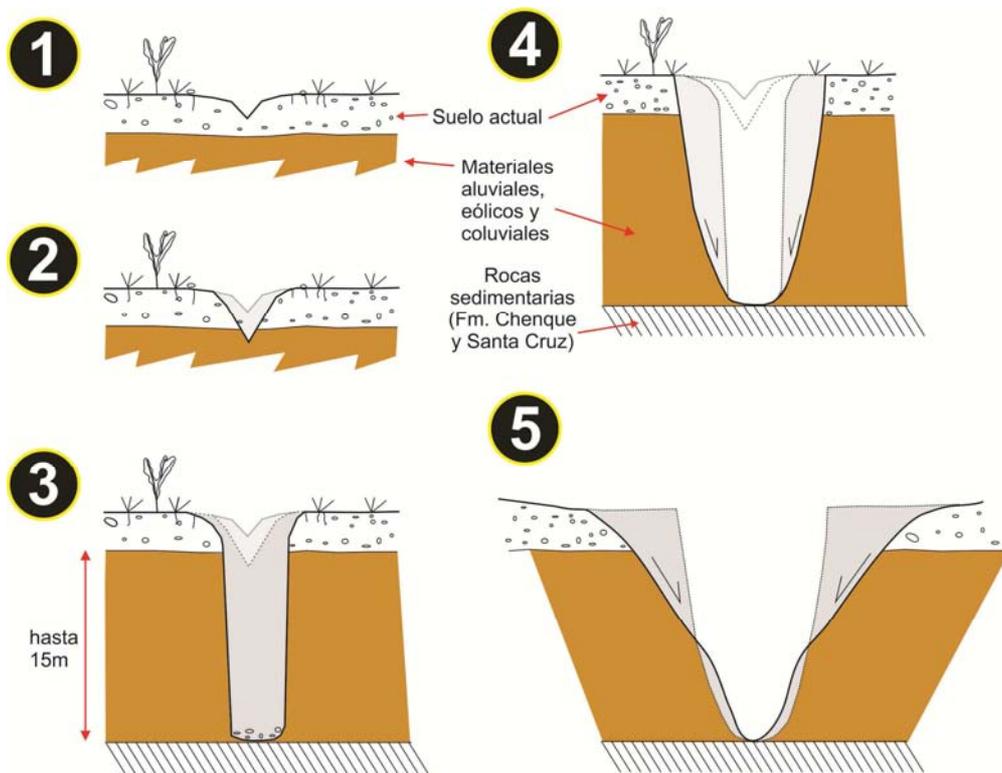


Figura 15. Etapas de formación de cárcavas. (1) Surcos de escorrentía, (2) Incisión hasta alcanzar el relleno cuaternario, conformado por materiales blandos, fácilmente erosionables, (3) etapa de profundización durante la tormenta, (4) Etapa de socavamiento de la base y desplomes gravitacionales, (5) Etapa de ensanchamiento y estabilización de las laderas de la cárcava.

Durante las precipitaciones intensas se incrementa la capacidad erosiva del agua debido a que se traslada a mayor velocidad, por lo que es frecuente que la cárcava se profundice rápidamente y se propague hacia la zona de mayor relieve por un mecanismo conocido como erosión remontante, atravesando la capa de suelo que contiene vegetación que tiende a retener el sedimento. Las pendientes elevadas de las laderas que rodean a la ciudad y barrios de la ciudad (por ejemplo Laprida, Cerro Solo, Los Tres Pinos) favorecen el desarrollo de los procesos erosivos por carvacamiento. En estas condiciones, el flujo desciende de las laderas a alta velocidad y en la zona de quiebre de pendiente impacta contra el sustrato edáfico y tiende a profundizarse rápidamente. En los alrededores de Comodoro Rivadavia, la cubierta edáfica y el relleno aluvial-eólico-coluvial que cubre a las rocas sedimentarias de las Formaciones Chenque y Santa Cruz alcanza en ocasiones un par de decenas de metros de potencia, y la magnitud de la

profundización de las cárcavas generó incisiones que superan en muchos casos los 10 metros de relieve vertical, tanto en la zona urbana como en la zona peri-urbana, formando cárcavas incluso en zonas muy próximas a las cabeceras de las redes de drenaje. La etapa de profundización vertical asociada a las etapas de máxima intensidad de la precipitación se asocia a socavamiento de la base por acción del agua a alta velocidad, que produce posteriormente el desplome gravitacional de los márgenes de la cárcava, produciendo un ensanchamiento significativo de la misma (**Fig. 15**). La etapa de ensanchamiento y crecimiento lateral de la cárcava puede ocurrir durante la tormenta o posteriormente a ella. Cuando ocurre al mismo tiempo que la tormenta, genera grandes volúmenes de sedimento friable dentro del cauce, que se traduce en volúmenes crecientes de material transportado por el agua de los cauces durante la tormenta; si los desplomes gravitacionales ocurren con posterioridad a la tormenta existirá material sedimentario suelto o friable dentro del cauce, disponible para ser removilizado en futuras lluvias. Este proceso de profundización y desplome con aumento creciente de la cantidad de sedimento en transporte ha sido el responsable del traslado de miles de metros cúbicos de areniscas finas-muy finas que arribaron a los barrios de la Zona Sur durante la etapa final de la lluvia, que ocurrió entre el 06 y 08 de abril de 2017. De la observación de cárcavas que se crearon y profundizaron en la parte alta de las cabeceras del arroyo de la Quinta y su comparación con imágenes de antes de la tormenta, se ha reconocido cárcavas que alcanzan 870 metros de longitud y hasta 12 m de incisión, responsables de la removilización de más de 70.000 m³ de sedimento arenoso. La generación extraordinaria de estas cárcavas en las cabeceras de la cuenca del cañadón de la Quinta está fuertemente condicionada por las elevadas pendientes de la misma (**Fig. 16**), ya que no han sido identificadas en otras zonas altas de las diferentes redes de drenaje. Aunque el impacto antrópico es comparable en todas las cuencas de drenaje (ver más adelante), la elevada pendiente de los cauces del arroyo de la Quinta produce un fuerte desequilibrio del sistema de transferencia durante las tormentas, favoreciendo la incisión y el rápido ensanchamiento de las cárcavas. Un aspecto particularmente alarmante es la actual disponibilidad dentro de los cañadones de volúmenes de sedimento mucho mayores a los que existían de forma previa a las tormentas de marzo-abril, por lo que se **recomienda** tomar medidas en el corto plazo para evitar su traslado a la ciudad durante futuras precipitaciones muy intensas o extremas.

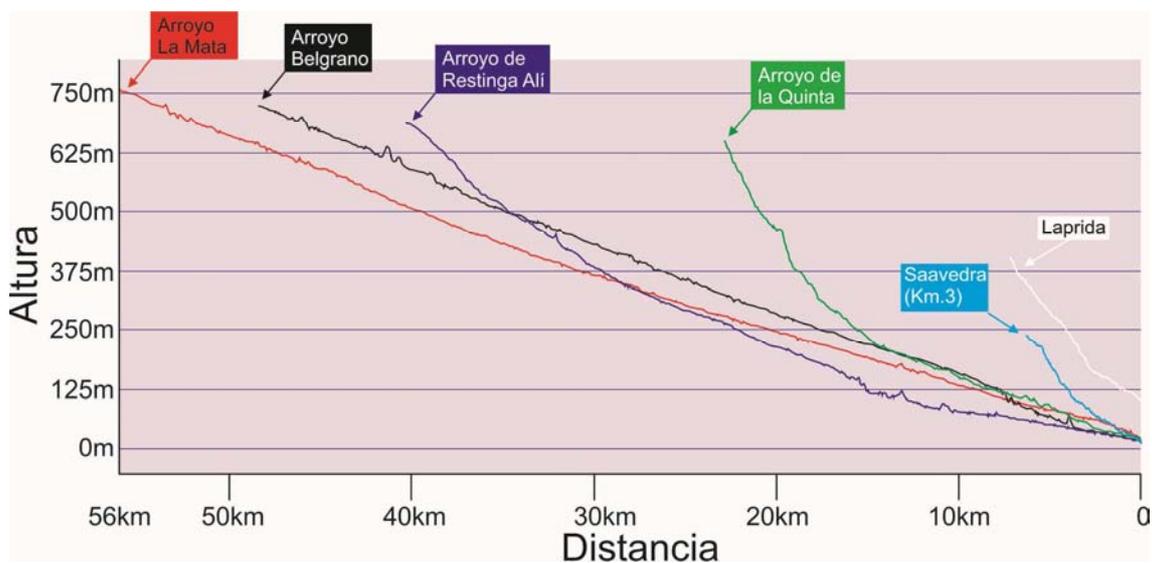


Figura 16. Relaciones distancia vs altura del cauce principal de mayor longitud de las cuencas de drenaje analizadas. Se destaca la pendiente anormalmente alta de las cuencas de Km.3, Laprida y Arroyo de la Quinta.

Mitigaciones al cárcavamiento- RECOMENDACIONES. Dada la magnitud que han desarrollado las cárcavas dentro de la ciudad y en la zona peri-urbana en relación al evento climático analizado (**Fig. 17**), resulta obvio prevenir a formación de nuevas cárcavas y promover la estabilización de las existentes. La estrategia óptima, cuando es posible, es prevenir la incisión por concentración de flujo y la formación de escarpas que proveen el relieve para la formación de la cárcava. El inicio del cárcavamiento se puede retardar efectuando intervenciones en la cuenca de drenaje o de forma localizada. Las intervenciones localizadas generalmente consisten en la construcción de estructuras interpuestas al flujo, que retienen parte del sedimento detrás de ella y reducen la velocidad de flujo, y canalizando e infiltrando parte del flujo a través de la obra. Estas estructuras son costosas, pero minimizan fuertemente el impacto erosional durante las lluvias. Las mitigaciones en las cuencas de drenaje intentan reducir el impacto erosivo de la escorrentía en épocas de lluvia. La infiltración de agua se puede incrementar estableciendo una adecuada cobertura vegetativa. Alternativamente, se pueden generar canales artificiales de alivio del flujo, desviando el flujo de la zona más propensa a la generación de cárcavas. Si las cárcavas se asocian a procesos de colapso por *piping* o al desarrollo de flujo sub-superficial, o cuando la escorrentía superficial se asocia a rápida saturación del sustrato impermeable, el paso crítico es reducir el gradiente hidráulico cercano a la escarpa. Esto se puede facilitar con la instalación de drenaje sub-superficial dirigido hacia fuera de la zona propensa a cárcavamiento, y generando un drenaje lateral superficial.

Cuando las cárcavas ya se han formado, la principal prioridad es impedir que siga transfiriéndose sedimento a la misma para evitar que siga creciendo. Formas comunes de mitigación son la construcción de muros con gaviones cerca de la cabecera de la cárcava, combinado con canales para evacuar o desviar el agua fuera de la cárcava y construcciones más rústicas (diques de roca suelta) dentro de la cárcava destinadas a retener sedimento. Los diques de roca suelta tienen ventajas (bajo costo, uso de materiales locales) y desventajas, entre las últimas se menciona un mantenimiento alto luego de las tormentas y el levantamiento progresivo de las mismas a medida que se colmatan con material fino. Otras estrategias son incrementar la rugosidad del canal a través de re-vegetación o agregando materiales gruesos a lo largo del tramo canalizado, para reducir la velocidad de flujo.

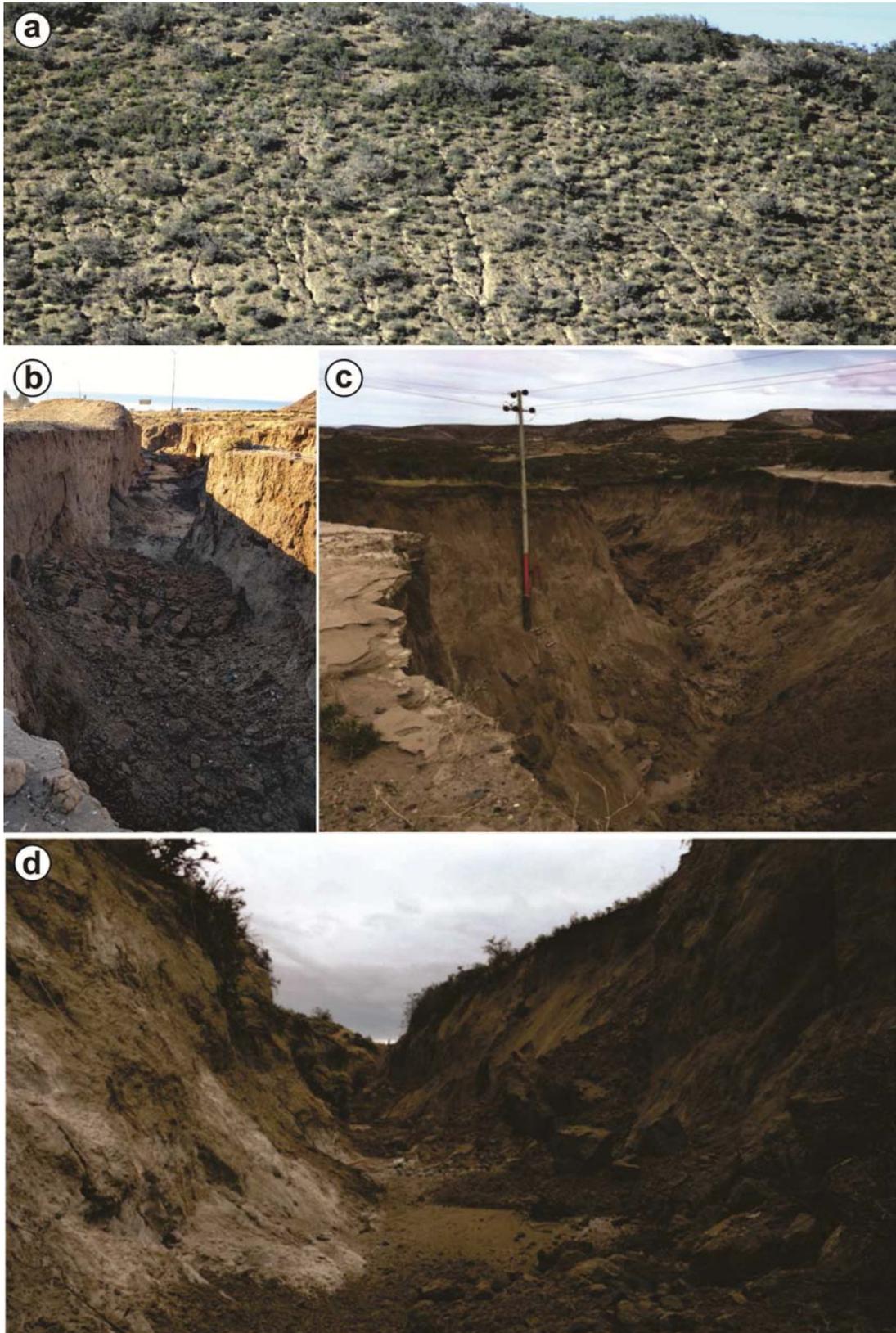


Figura 17. (a) Erosión en surcos, reflejando los estadios iniciales de formación de cárcavas en zonas de alta pendiente. (b) Etapa de profundización, cárcavas formadas en el Infiernillo (c) Ensanchamiento de una cárcava ubicada en las cabeceras del cañadón de la Quinta, que supera los 10 metros de profundidad y 870 metros de largo. (d) Abundante material sedimentario suelto y desplomes de los márgenes en el fondo de una cárcava ubicada en las cabeceras de la red de drenaje que desemboca al norte de Km. 8.

b) Removilización de sedimento durante la tormenta

El transporte de sedimentos arenosos durante el temporal ha constituido uno de los problemas de mayor importancia por los volúmenes que se han depositado dentro de la ciudad, especialmente debido a la ineficiencia de las colectoras en derivar el flujo hacia el mar. La incorporación de sedimento a la escorrentía superficial durante el temporal requiere de dos pasos sucesivos: (1) la erosión del sustrato-suelo e incorporación dentro del fluido, y (2) el sucesivo traslado corriente abajo de la partícula sobre el sustrato o dentro del flujo. Durante las precipitaciones, para transportar material como carga de fondo el esfuerzo de cizalla ejercido por el flujo sobre el sustrato debe exceder el esfuerzo resistivo friccional para poner en movimiento el sedimento, lo cual ocurre de manera generalizada en las etapas de mayor intensidad de los eventos de precipitación.

Algunos de los condicionantes en relación a la altísima cantidad de sedimento que se movilizó a la ciudad son:

1) la etapa previa de sequía, con precipitaciones decrecientes que alcanzaron 134 mm en el año 2015. En la última década, aunque las precipitaciones anuales solo se han reducido modestamente, las lluvias están cada vez más relacionadas a eventos cortos de alta intensidad que escurren rápidamente y no infiltran en el perfil de suelo. En estas condiciones, se modifica la distribución de agua del suelo a diferentes profundidades, de forma que se beneficia a las plantas que desarrollan raíces profundas, pero afecta negativamente a la vegetación perenne con raíces superficiales, que se traduce en una reducción de la cobertura vegetativa y de la capacidad de retención de agua del suelo, dejándolo desprotegido a la acción de las lluvias y sujetas a procesos de crustificación-salinización, y favoreciendo la escorrentía superficial durante las lluvias. Complementariamente, el cambio en el patrón de precipitaciones deja mayor cantidad de sedimento suelto que ha llegado a las redes de drenaje por acción eólica durante gran parte del año, el cual es material fácilmente movilizable por flujos acuosos asociados a tormentas, y que constituye una parte importante de los materiales acarreados hacia la ciudad durante el evento socio-climático.

(2) la pérdida de cobertura vegetativa relacionada a la explotación humana de los recursos naturales en las áreas de cabecera y por crecimiento de la ciudad. Se incluyen aquí caminos, más de 3000 locaciones petroleras, obras de ingeniería y viviendas en todas las cuencas de drenaje. La industria hidrocarburífera ha avanzado con un desarrollo progresivo de caminos, instalaciones y locaciones de pozo de mayores dimensiones a lo largo del siglo XX y XXI en todos los cañadones que se encuentran aguas arriba de la ciudad, y la ciudad ha avanzado aguas arriba con loteos en los márgenes (y en algunos casos) dentro de los valles fluviales, y en depresiones cerradas (bajos endorreicos).

Se ha realizado un análisis preliminar de la superficie de suelo desnudo de las diferentes cuencas de drenaje, utilizando imágenes satelitales Sentinel S2A de ESA (Agencia Espacial Europea) las cuales poseen 14 bandas espectrales con diferentes resoluciones espaciales. Las bandas 8 (842nm) y 4 (665nm) fueron procesadas y corregidas atmosféricamente en SNAP DESKTOP, un software libre de la misma empresa. A partir de una clasificación supervisada se dividió al área de estudio en zonas vegetadas y zonas no vegetadas, con el fin de cuantificar el porcentaje de cobertura presente en cada cuenca hidrográfica (**Fig. 18**), dejando fuera de este análisis la cuenca del arroyo de Km. 8 por limitaciones de tiempo.

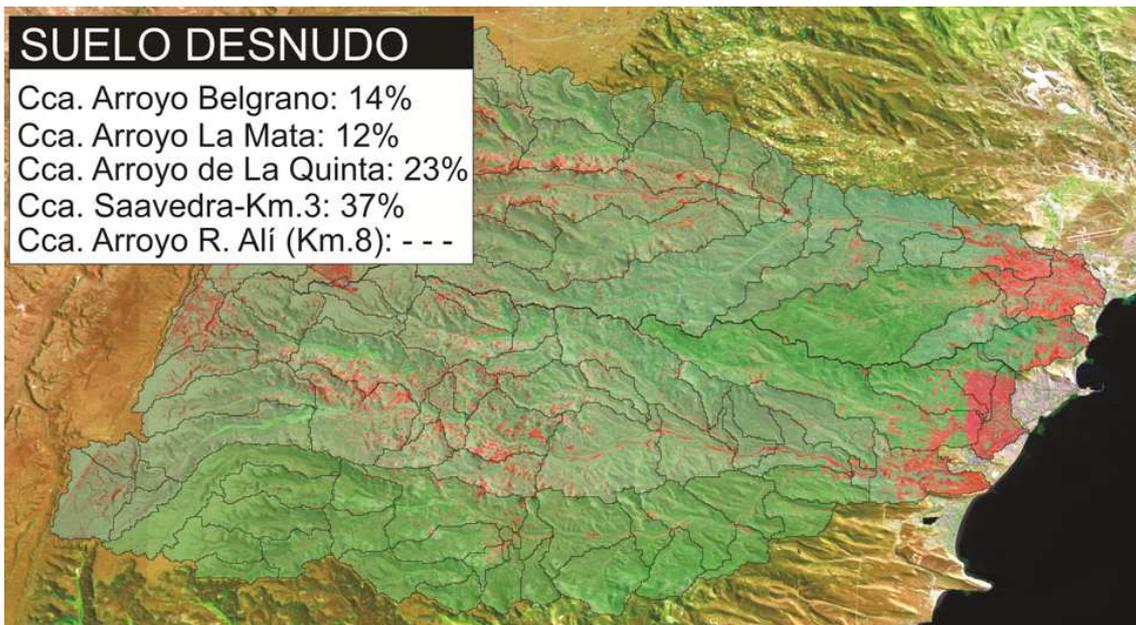


Figura 18. Porcentajes estimado de suelo desnudo en las diferentes redes de drenaje. Las zonas indicadas en rojo indican ausencia total de vegetación, relacionada a caminos, viviendas, locaciones petroleras y otras obras de infraestructura.

Los porcentajes obtenidos, de carácter orientativo, indican que existe un porcentaje de suelo desnudo proporcionalmente importante en relación al área de las cuencas de drenaje, un factor que contribuye a la escorrentía superficial y reduce la infiltración durante las tormentas. El porcentaje de suelo sin vegetación es significativamente alto para la cuenca del Arroyo de la Quinta, por tratarse de una cuenca de drenaje con elevada pendiente y por desembocar dentro de la ciudad, por lo que se requieren mitigaciones importantes para limitar el traslado de sedimento de la misma.

La observación detallada de estos cañadones y sus cabeceras permite reconocer el desarrollo de cárcavas concentradas en bordes de caminos y locaciones de pozos petroleros, principalmente asociados a ausencia de cobertura vegetal y de suelo, que favorece el escurrimiento superficial. Especialmente importante para la producción de sedimento son las laderas no estabilizadas en los márgenes de las locaciones petroleras, que frecuentemente se traducen en cárcavas profundas sin que exista una red de drenaje asociada excepto el flujo que escurre de la locación y el camino que la alcanza. No existe desarrollo de cárcavas e incisiones hídricas en zonas en las cuales no hay influencia antrópica, por lo que una parte de la producción de sedimento que alcanzó a la ciudad es consecuencia de estas actividades.

Por tanto, y hacia el futuro, se **recomienda** minimizar el movimiento de suelos y la extracción de cobertura vegetal para el desarrollo de caminos, locaciones de pozos petroleros u otras instalaciones urbanas o industriales. Esto implica evitar la ubicación de caminos, locaciones de pozos u otras instalaciones en laderas de pendientes moderadas a abruptas. A mayor pendiente, mayor es el movimiento de suelo necesario para su emplazamiento y mayores son las dimensiones de los taludes necesarios para su estabilización. Estos taludes, inconsolidados y libres de cobertura edafológica y vegetal, dejan desprotegidos a los agentes externos a los sedimentos que los conforman, favoreciendo el desarrollo de formas hídricas erosivas, y favoreciendo el transporte de sedimentos pendiente abajo. A su vez, las cárcavas y *pipes* generados, pueden producir inconvenientes operativos e inclusive ocasionar accidentes laborales debido a las magnitudes que suelen desarrollar. Complementariamente, se considera recomendable la realización de un **plan de revegetación** que facilite el desarrollo de suelo en los

taludes y locaciones de pozo en desuso. Para tal fin se sugiere la reutilización de la capa superficial del suelo extraído en otras obras en desarrollo y el escarificado del perímetro de grandes locaciones. También debería considerarse un plan de revegetación de caminos circundantes a la ciudad que estén en desuso o sean innecesarios.

Complementariamente, y para mitigar el efecto sobre el aporte de sedimento y el cárcavamiento en relación a las locaciones petroleras, se **recomienda** la realización de obras de drenaje revestidas en cada locación, estableciendo pendientes sobre la misma que faciliten el escurrimiento del agua de lluvia que alcanza las locaciones. Se pretende de esta forma la evacuación del agua de lluvia por los márgenes de las mismas, evitando la formación de cárcavas en la zona de mayor relieve y/o donde existe mayor volumen de sedimento o roca sedimentaria removilizado.

c) Granulometría del material transportado

A los efectos de analizar las características granulométricas de los materiales acarreados durante la tormenta por las diferentes redes de drenaje se realizó un muestreo sistemático de los depósitos. Se realizó un análisis granulométrico con tamices correspondientes a la escala phi (ϕ ; [Krumbein y Sloss, 1963](#)), sometidos a vibración durante 15 minutos mediante un equipo Ro-Tap. Cuando fue necesario, las muestras obtenidas se desagregaron previamente con mortero. Se elaboraron histogramas de distribución de tamaños de grano a partir de los porcentajes en peso de las muestras retenidas en cada tamiz. En este informe se presentan las características de siete (7) muestras obtenidas en diferentes redes de drenaje, a los efectos de establecer los parámetros granulométricos básicos (**Fig. 19**).

De los resultados obtenidos se destaca la importante participación en las muestras de fracciones granulométricas de arena fina y muy fina (rango de tamaños entre 0,249 y 0,0626), con porcentajes de limos y arcillas que no supera en ningún caso el 20%. La fracción de granulometría mayor a 2 mm está escasamente representada en muestras obtenidas de las cabeceras, pero constituye una proporción importante del registro que ha quedado preservado en la parte central de los canales principales. Los valores obtenidos, con modas en 3Φ son comparables a los resultados derivados del análisis de la fracción arena de dunas eólicas actuales de la región ([Montes et al., 2015](#)), por lo que se considera que el retrabajo de materiales arenosos con procesos eólicos sobreimpuestos constituye la principal fuente de sedimento transportado en la tormenta. En virtud que las dunas eólicas actuales derivan de la removilización de sedimentos aluviales y coluviales mezclados en grado variable con componentes derivados de la erosión del sustrato de las formaciones Chenque y Santa Cruz, la génesis de los componentes transportados es múltiple y variable en función de la red de drenaje analizada. Dadas las características granulométricas finas (alrededor de 0,2 mm en promedio) y las velocidades de flujo relativamente altas (superior a 1 m/seg) durante todo el temporal, gran parte de los materiales analizados han sido transportados en suspensión intermitente o suspensión continua hasta ser depositados cuando la velocidad de flujo se redujo notablemente dentro de la ciudad.

Un aspecto destacado en relación a las características tremendamente erosivas de los flujos de tormenta se relaciona con la incorporación de granulometrías anómalas asociadas a fuentes puntuales de sedimento. De esta forma, en varios puntos alrededor de la ciudad se ha producido la incorporación de fracción grava fina cuando los arroyos han atravesado canteras en actividad o en desuso. Este proceso incorpora de manera instantánea componentes en transporte de un tamaño de grano (y de masa) decenas de veces mayor a la arena fina-muy fina que normalmente llevan los cursos de agua, aumentando la energía cinética del flujo y su capacidad erosiva. Este hecho ha resultado

particularmente notable en el ensanchamiento del arroyo de Restinga Alí (Km. 8) en la zona inmediatamente aguas arriba del puente que conecta dicho barrio con Caleta Córdova.

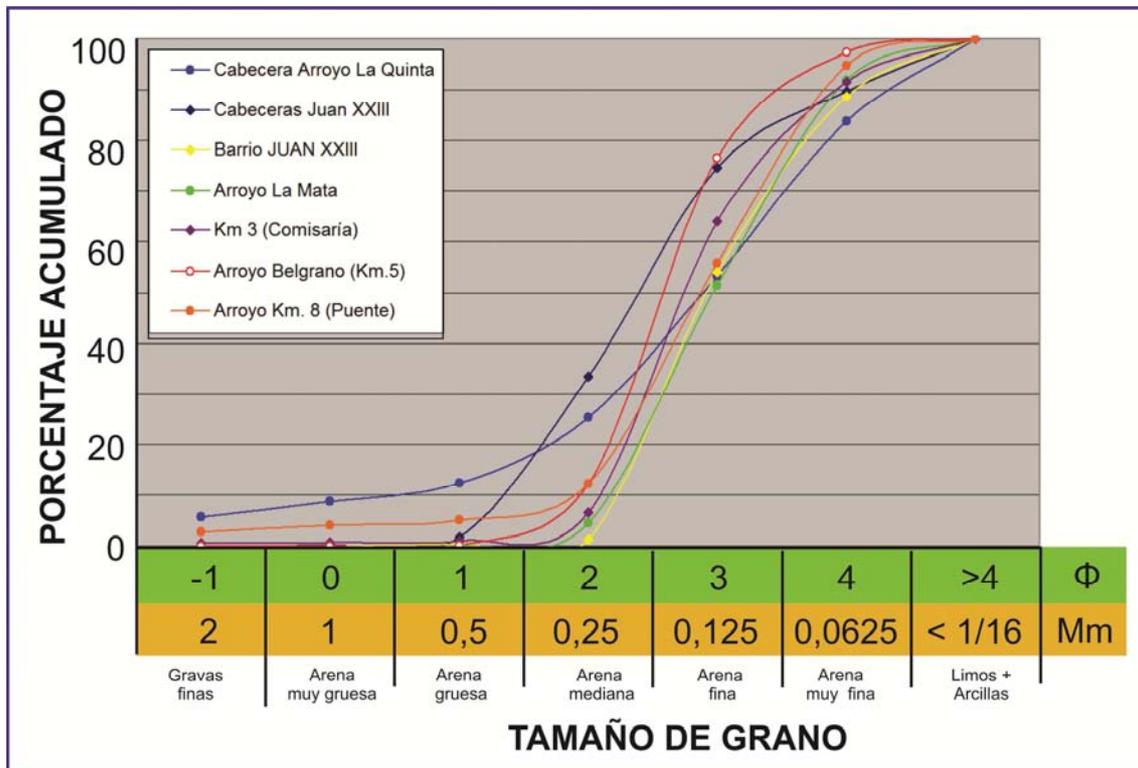


Figura 19. Distribución de tamaño de grano (Escala Phi y en mm) de las muestras obtenidas en diferentes cuencas de drenaje y áreas de cabecera.

En las revisiones de campo realizadas posteriormente a la tormenta se han reconocido procesos de erosión generalizado en cárcavas de escala muy variable, desde un par de metros de profundidad a más de 10 metros. Una vez concluida la tormenta, la acción eólica ha comenzado los procesos normales de removilización de estos materiales, disponibles dentro de las cárcavas y en los márgenes de los arroyos que se activaron durante la tormenta. Dado que todas las cárcavas se han ensanchado y profundizado durante el evento extraordinario, se considera que existe mayor disponibilidad de sedimento suelto dentro de las mismas a las que existían previamente a la tormenta extraordinaria. Por tanto, se **recomienda** la gestión de obras que retengan sedimento en la zona peri-urbana. La reducción de la cantidad de sedimento en transporte es crítica para evitar que ante futuras precipitaciones muy intensas y extremas se repita el anegamiento de las áreas urbanas ubicadas en depresiones cerradas (barrio Juan XXII, sectores del barrio Laprida).

d) Inundaciones repentinas de las partes bajas de la ciudad

Como se mencionó, la inundación de numerosos barrios de la Zona Sur de la ciudad se ha debido, en parte, a la ineficiencia de los pluviales en drenar el agua del Cañadón de la Quinta y el agua caída sobre la parte alta de la ciudad. Sin embargo, existen razones subyacentes que han generado las condiciones para que ello ocurra:

(1) Emplazamiento de barrios afectados en depresiones endorreicas, sobre antiguas lagunas salobres sin salida al mar. El emplazamiento urbano asociado al crecimiento demográfico de la ciudad deja en situación de vulnerabilidad ante crecidas a una parte

importante de la Zona Sur de la ciudad. Los mapas del Departamento Minería y Geología de YPF (1929) muestran, previamente al crecimiento urbano, la existencia de una laguna salobre en la ubicación casi exacta de la zona inundada de los barrios Juan XXIII y Pueyrredón, y que también se refleja en la distribución planimétrica actual de la ciudad (**Fig. 20**). Un caso similar tuvo lugar en el Barrio Laprida, con el anegamiento de una zona deprimida cerrada, que conformaba un antiguo mallín.

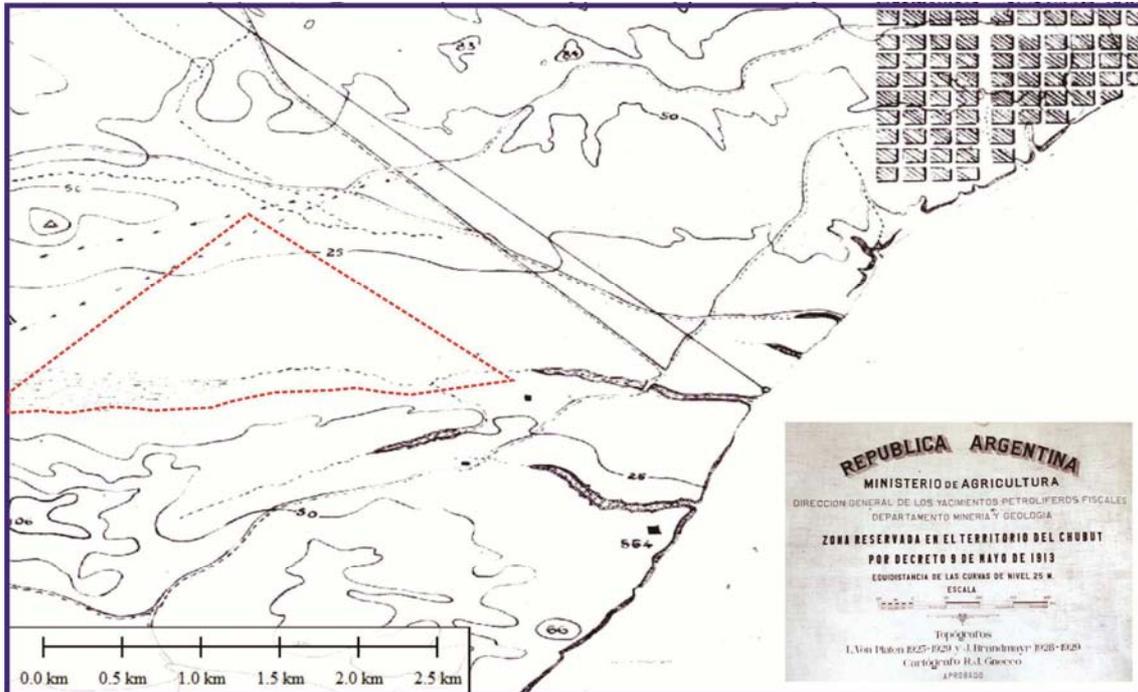


Figura 20. Mapa del Departamento Minería y Geología de YPF (1929) con la ubicación de un bajo sin salida en el lugar donde se generaron los mayores daños por la inundación en la zona sur de la ciudad.

Un aspecto central relacionado con el diseño de obras pluviales de las cuencas de drenaje debe considerar la elevada carga de sedimento en transporte durante las

precipitaciones, que reduce por agradación del sustrato la superficie útil de las colectoras pluviales. En la reciente experiencia, se ha visto que el entubamiento de las colectoras es desastroso, por cuanto su obstrucción por sedimento o desechos urbanos inutiliza rápidamente las mismas, buscando el agua nuevas rutas hacia los puntos más bajos de la ciudad, o generando endicamientos que favorecen desbordes hacia zonas de menor pendiente. Una consecuencia directa de la redirección de los flujos de tormenta hacia zonas de menor pendiente fuera de las colectoras es que el flujo se desconfinan, reduce su velocidad y comienza a depositar su carga en transporte. En el evento reciente, el principal mecanismo depositacional dentro de los barrios de la Zona Sur se asocia al escurrimiento por rutas alternativas de menor pendiente a la de las colectoras diseñadas para ello, que derivó en la depositación de centenas de miles de toneladas de sedimento dentro de la ciudad. Por ello, y dada la recurrencia trianual de las precipitaciones muy intensas ($> 34,4$ mm/día), se **recomienda** la evaluación de colectoras pluviales a cielo abierto, de mayor envergadura de las existentes para prevenir futuras inundaciones. En virtud del inexistente registro previo de precipitaciones la intensidad registrada (232 mm/día) en el evento de marzo-abril, se considera fundamental para la eficacia de la obra un diseño dimensional con secciones que permitan el desagote de toda el agua de lluvias con un intervalo de recurrencia de al menos 70 años.



Instituto Geográfico Nacional, Oficina Provincial Chubut

Figura 21. Fotografía aérea del sector afectado de los barrios Juan XXIII y Pueyrredón, y su relación con los drenajes naturales (arroyo de la Quinta) y un arroyo ubicado sobre la posición actual de la Avenida Chile, que desembocaba en el barrio Stella Maris.

La Avenida Chile, ubicada en la posición aproximada de un antiguo cañadón conformaba la ruta natural para el escurrimiento del agua de lluvia (**Fig. 21**). Con el desarrollo de la ciudad sobre la misma, esta vía natural, que drenaba el excedente de agua del Cañadón Azul ha desaparecido, dejando a la zona del barrio 1008 viviendas en una zona deprimida cerrada, sin drenaje natural hacia el mar. En la **Figura 22** se muestra la topografía de las calles Lisandro de la Torre y Avenida Chile, destacándose en la última la depresión existente en el Barrio 1008 viviendas. Por tanto, y en virtud de

la depositación de arena observada en el barrio durante el temporal, resulta prioritario que para complementar las obras de desagote que se plantearán en la Colectora de la Avenida Roca, se **recomienda** la construcción de una segunda colectora en la Avenida Chile, a los efectos de drenar el agua que llegue a la ciudad desde el Cañadón Azul y las precipitaciones directas que caigan sobre el barrio, o el escurrimiento superficial que exceda la capacidad de la colectora de la Avenida Roca en futuras precipitaciones.

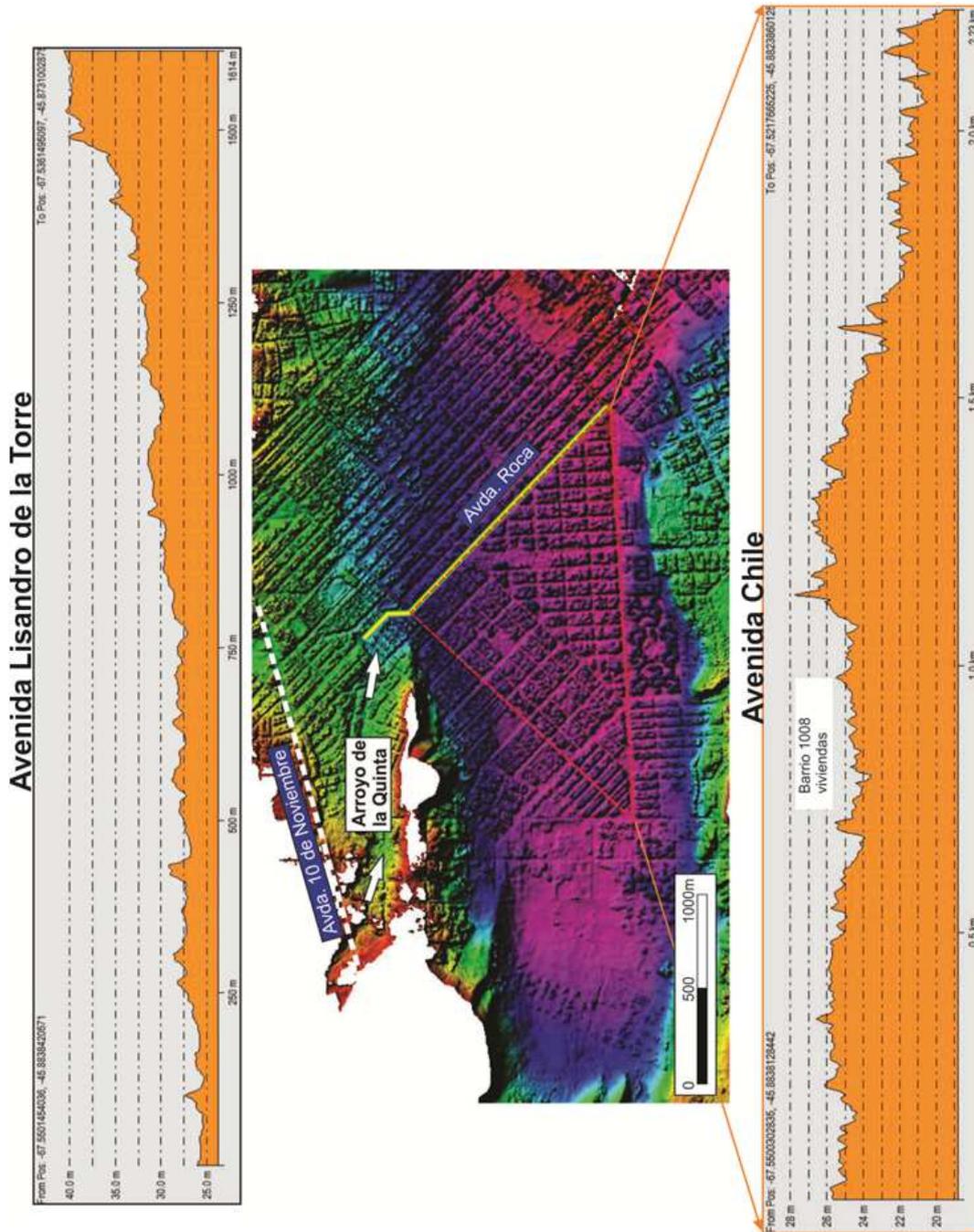


Figura 22. Mapa topográfico de los barrios de la Zona Sur de la ciudad y cortes topográficos a lo largo de las avenidas Chile y Lisandro de la Torre. Notar la depresión cerrada ubicada en la posición actual del barrio 1008 Viviendas, y el desnivel aproximado de tres (3) metros con respecto al punto de desagote del pluvial de la Avenida Roca.

(2) Emplazamiento de viviendas familiares y locaciones petroleras dentro del valle fluvial. Existen numerosos ejemplos dentro del casco urbano de la ciudad, como el ejemplificado en la **Figura 13** con asentamientos no legalizados sobre el lecho del arroyo de Km. 8. Sobre el cañadón de la Quinta y aguas arriba del actual ingreso al loteo Los Tres Pinos en el año 1984 se construyó la locación petrolera del pozo CH-2361, cubriendo el 85% del ancho del vale fluvial. Aguas abajo de esa locación, se instalaron viviendas y se redireccionó el agua por medio de una colectora con un trazado recto y entubaciones en el ingreso al barrio. Durante la tormenta, el flujo en el arroyo de la Quinta ocupó todo el ancho del valle y la altura de agua superó los 130 cm sobre la posición de flujo en etapa de baja descarga. La colectora ubicada en la entrada del Barrio Los Tres Pinos resultó insuficiente para el desagote del flujo extraordinario, destruyendo las entubaciones y generando la inundación de las viviendas ubicadas sobre el valle fluvial.

En estas situaciones como en otras situaciones comparables, se considera necesario efectuar un relevamiento planimétrico específico a los efectos de definir áreas de exclusión para la construcción de viviendas familiares. En aquellos casos en los que la relocalización de las familias no sea posible, se deben gestionar obras de ingeniería ubicadas aguas arriba y dimensionadas de acuerdo a caudales extraordinarios, o para evacuar las precipitaciones con un intervalo de recurrencia de al menos 70 años.

Otro aspecto relevante y relacionado con la actividad urbana sobre las redes de drenaje se relaciona con los desechos urbanos. El arroyo de la Quinta antes de ingresar en la colectora de la Avda. Roca atraviesa en barrio A.D. Moure, en donde en su trayecto adquiere gran cantidad de desechos urbanos y efluentes cloacales. Por ello, es **prioritaria** la eliminación de residuos de su cauce y un programa de mantenimiento del mismo, especialmente de forma previa a las precipitaciones. Los desechos urbanos constituyen un condicionante importante en la respuesta de los pluviales, siendo su correcto funcionamiento responsabilidad compartida de los ciudadanos y del Estado.

Los datos relevados sobre los caudales que puede desagotar el pluvial de la Avda. Roca oscilan entre 5.4 y 5.9 m³/seg. según la sección analizada, considerando velocidades de flujo de 3 m/seg. Estos valores representan un 20% de los valores estimados de caudal para el arroyo de la Quinta (28 m³/seg). Por tanto **se recomienda** un rediseño y ampliación de los desagües existentes en función de los caudales observados durante la tormenta.

e) Ensanchamiento y profundización de cauces

Los sistemas fluviales efímeros en general tienen pérdidas de caudal aguas abajo, con lo que durante lluvias normales el efecto en posiciones cercanas a la desembocadura es mínimo. Sin embargo, en eventos de precipitación muy intensos o extremos, la activación de la cuenca genera que por convergencia de flujo dentro de la red de drenaje se provean caudales progresivamente mayores hacia la desembocadura, incrementando la capacidad erosiva y generando la profundización o ensanchamiento de los cauces previos para transportar la carga de agua y de sedimento. Dado que en las partes bajas de la red de drenaje ésta se encuentra muy próxima al sustrato resistente de las formaciones Sarmiento (Cuenca del arroyo Belgrano y cuenca de arroyo de Km. 8) y Chenque (arroyo La Mata) la principal respuesta del sistema fluvial durante la tormenta en las zonas cercanas a la desembocadura se asoció al ensanchamiento significativo de los cauces. Este ensanchamiento provocó la removilización de grandes volúmenes de sedimento previamente depositados, desplomes de los márgenes de los cauces y en ocasiones la destrucción parcial o total de viviendas emplazadas en los márgenes o dentro del valle fluvial. Tanto en el arroyo Belgrano como el de Restinga Allí el

desplome de los márgenes generaron un peligroso acercamiento de viviendas ubicadas fuera de la faja de canales, y la destrucción de todos los asentamientos no regularizados ubicados dentro de la fajas de canales.

En el arroyo Belgrano, inmediatamente al oeste de su intersección con la RN N°3 se generaron durante la tormenta obras transitorias mediante la instalación de tanques de agua de 1000 litros en los márgenes, dispuestos para reducir el efecto erosivo del agua. Con posterioridad, en sectores en los que se generó mayor erosión se produjo el relleno con material granular o escombros. Aunque para las condiciones de flujos relacionados a lluvias normales este tipo de obra podría resultar eficiente, es en las precipitaciones muy intensas o extremas donde se generan condiciones de mayor descarga y capacidad erosiva del flujo encauzado. Para esas situaciones, se considera que la estabilización de los márgenes de los cauces debe realizarse con estructuras de contención basal rígida (por ejemplo gaviones), a los efectos de incrementar la resistencia a la erosión de la estructura. La altura de los gaviones es recomendable que sea al menos la altura que alcanza el flujo durante los eventos extraordinario en esa posición. El relleno de parte del cauce por materiales granulares carentes de materiales resistentes en su base podría ser incluso perjudicial ante futuras precipitaciones muy intensas, por cuanto constituye una fuente de provisión de materiales sueltos ya disponibles dentro del lecho del cauce.

7. CONCLUSIONES - RECOMENDACIONES

Las conclusiones de este estudio pretenden visualizar problemáticas recurrentes que constituyen las causas por las cuales se ha producido una inundación sin precedente sobre grandes sectores de la ciudad, y plantear estrategias que colaboren en la mitigación de los efectos de futuras precipitaciones. El entendimiento de la dinámica sedimentológica que tuvo lugar durante la tormenta es el paso previo para la formulación de propuestas de obras de ingeniería que mitiguen los efectos de precipitaciones futuras. Por ese motivo, en este estudio se han abordado desde diferentes aproximaciones aspectos climáticos, geomorfológicos y de dinámica antrópica que han derivado en la problemática socio-climática de la ciudad en relación a la tormenta.

A partir del análisis histórico de las **precipitaciones** de la ciudad se concluye que las precipitaciones extremas que ocurrieron entre el 29 de Marzo y el 08 de abril de 2017 no se ajustan al patrón climático de la región, y por tanto su recurrencia o período de retorno no se puede establecer en base a los registros históricos. Es importante destacar que el elemento desencadenante de las precipitaciones ha sido un desequilibrio atmosférico asociado a incrementos globales, regionales y locales de las temperaturas del agua de mar y de los continentes, con consecuencias en la distribución de las masas de aire y precipitaciones asociadas, temática que excede a este reporte. De forma inédita, han ocurrido procesos de erosión asociados a carvavamiento en la parte alta de las cuencas de drenaje de mayor pendiente, por lo que el condicionante geomorfológico ha sido decisivo en la erosión asociada a las lluvias.

Le **geomorfología** de la región refleja la existencia de sistemas fluviales efímeros que han transportado agua y sedimentos de forma torrencial en eventos cortos de alta intensidad, con redes de drenaje de centenas de km² que drenan dentro y alrededor de la ciudad. La diferencia de relieve existente entre las cabeceras y la desembocadura, y la elevada pendiente asociada, requiere que en relación a los tiempos de concentración y los volúmenes de agua y sedimento en transporte se planteen diferentes estrategias para mitigar el impacto de las lluvias. En caso de cuencas pequeñas (**Km 3, Laprida**) con tiempos de retardo o de concentración de decenas de minutos se debe prever un sistema eficiente que facilite el escurrimiento superficial del agua, evitando las entubaciones o desagües enterrados. En cuencas de mayores dimensiones (ej. Cañadón de la Quinta) se requieren intervenciones localizadas y a nivel de cuenca de drenaje, a los efectos de reducir el volumen de sedimento en transporte y reducir la velocidad del flujo en las crecidas, de forma que no se colapsen los pluviales dentro de la ciudad.

La cuenca del **Cañadón de la Quinta**, que desemboca en la zona sur de la ciudad, requiere obras que reduzcan la cantidad de sedimento en transporte en el área periurbana, y la revisión del diámetro de diseño de todos los pluviales interpuestos dentro del canal principal. El canal pluvial trapezoidal de la Avda. Roca requiere un rediseño integral (véase [Hirtz et al., 2000](#)) considerando los caudales durante las crecidas, y aportando estrategias para reducir el taponamiento con sedimento o desechos urbanos. Los tramos subterráneos deben evitarse a lo largo de todo su trayecto.

La presencia de una depresión cerrada en la zona del **Barrio 1008 viviendas** y de un cañadón que drenaba al mar en la posición en la que se encuentra la Avda. Chile requieren ser contemplados para complementar el escurrimiento de los barrios Juan XXIII y Pueyrredón, y áreas ubicadas al oeste. Se considera que un pluvial a cielo

abierto y diseño trapezoidal sobre la Avda. Chile podría satisfacer la demanda de falta de drenaje por crecimiento de la ciudad sobre la red de escurrimiento natural.

El **impacto antrópico** en las redes de drenaje ha dejado porcentajes de suelo desnudo anormalmente altos, con abundante material sedimentario removilizado debido a la construcción de caminos, locaciones petroleras e instalaciones. A los efectos de mitigar su impacto sobre la provisión de sedimentos a las redes de drenaje durante las tormentas se recomienda elaborar obras de drenaje de cada instalación urbana como industrial, así como minimizar el movimiento de suelos y la extracción de cobertura vegetal para el desarrollo de caminos, locaciones de pozos petroleros u otras instalaciones urbanas o industriales. Complementariamente, se considera recomendable la realización de un plan de revegetación que facilite el desarrollo de suelo en los taludes y locaciones de pozo en desuso. Para ello, se sugiere la reutilización de la capa superficial del suelo extraído en otras obras en desarrollo y el escarificado del perímetro de grandes locaciones. También se debería considerar un plan de revegetación de caminos circundantes a la ciudad que estén en desuso o sean innecesarios.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los entes estatales y empresas privadas que colaboraron con información para la elaboración del presente informe técnico. Se agradece a las autoridades de YPF el acceso a información planimétrica, DEMs e imágenes satelitales utilizadas en este reporte. Se agradece a la Dra. Agrim. Mabel Álvarez (Oficina Provincial Chubut del Instituto Geográfico Nacional, Subsecretaría de Asuntos Municipales -Ministerio de Gobierno) y a María Dolores Puente (Instituto Geográfico Nacional, Oficina Provincial Chubut) por el acceso a cartografía antigua de la ciudad y mapas topográficos. Se agradece a Termap S.A. y a la Facultad de Ingeniería (UNPSJB) el acceso a información de los pluviómetros. El Servicio Meteorológico Nacional brindó la información histórica de precipitaciones de la Estación Comodoro Rivadavia en el aeropuerto local.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Ameghino, F., 1889.** Contribución al conocimiento de los mamíferos fósiles de la República Argentina. *Actas de la Academia Nacional de Córdoba* 6: 1-1028. Córdoba.
- Ameghino, F.G., 1906.** Les formations sedimentaires du Cetace superieur et du Tertiaire de Patagonie. *Anales Museo Nacional de Historia*, 8: 1-568. Buenos Aires.
- Barreda, V.D., Palamarczuk, S., 2000.** Palinoestratigrafía del Oligoceno tardío-Mioceno, en el área sur del Golfo San Jorge, provincia de Santa Cruz, Argentina. *Ameghiniana Revista de la Asociación Paleontológica Argentina*, 37: 103-117.
- Beven, K., 2002.** Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. *Hydrological Processes* **16**, 189-206.
- Bellosi, E.S., 1990.** Formación Chenque: registro de la transgresión patagónica de la Cuenca del Golfo San Jorge. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 57-60. San Juan.
- Bellosi, E.S., M. Gonzalez, R. Kay y R. Madden, 2002.** El Valle inciso colhuehuapense de Patagonia Central (Mioceno inferior). 9° Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 49. Córdoba.
- Bird, E., 2008.** Coastal Geomorphology, 2nd Ed., John Wiley and Sons, Chichester.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., Jakob, M., 2014.** Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows. *J. Hydrol.* 518, 194–205.
- Bull L.J., Kirkby M.J., 1997.** Gully processes and modelling. *Progress in Physical Geography* **21**(3): 354–374.
- Caldenius, H., 1932.** Las glaciaciones cuaternarias de Patagonia y Tierra del Fuego. Dirección de Minas y Geología, Publicación 25:1-169. Buenos Aires.
- Cisneros, J. M.; Cholaky, C. G.; Cantero Gutierrez, A.; Gonzalez, J. G.; Reynero, M. A.; Diez, A.; Bergesio, L. 2012.** Erosion Hídrica. Principios y técnicas de manejo. UniRío Editora. U.N.R.C. Río Cuarto.
- Coronato, F y del Valle, H. 1988.** Caracterización hídrica de las cuencas hidrográficas de la Provincia del Chubut. CENPAT-CONICET. 190 pp. Puerto Madryn.
- Creutin, J.D., Borga, M., Grunfest, E., Lutoff, C., Zoccatelli, D., Ruin, I., 2013.** A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods. *J. Hydrol.* 482, 14–24.
- Cuitiño, J.I., Scasso, R., Ventura Santos, R., Mancini, L., 2015.** Sr ages for the Chenque Formation in the Comodoro Rivadavia region (Golfo San Jorge basin, Argentina): stratigraphic implications. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 22 (1): 3-12.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) www.fao.org**
- Feagle, J.G., T.M. Bown, C. Swisher and G. Buckley, 1995.** Age of the Pinturas and Santa Cruz Formation. 6° Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía Actas: 129-135. Trelew.
- Feruglio, E., 1938.** Relaciones estratigráficas entre el Patagónico y el Santacruciano en la Patagonia Austral. *Revista Museo La Plata (N.S.) 1 Sec. Geol.:* 129-159. La Plata.
- Feruglio, E., 1947.** Mapa geológico de la hoja 40 b, "San Carlos de Bariloche". Dirección General de Minas y Geología, Buenos Aires.
- Feruglio, E., 1949.** Descripción Geológica de la Patagonia. Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Vol. 1: 1-334. Buenos Aires.
- Figari, E., Strelkov, E., Laffife, G., Cid de la Paz, M., Courtade, S., Celaya, J., Vottero, A., Lafourcade, S., Martínez, R. y Villar, H., 1999.** Los sistemas petroleros de la Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica. 4° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas, p. 197-237. Buenos Aires.
- Foix, N., 2009.** Tectónica y sedimentación del registro paleógeno (Formaciones Salamanca y Río Chico) de la Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. Tesis doctoral UNPSJB, inédita, 313 pág.
- Foix, N., Paredes, J.M., Giacosa, R.E., 2013.** Fluvial architecture variations linked to changes in accommodation space: Río Chico Formation (Late Paleocene), Golfo San Jorge basin, Argentina. *Sedimentary Geology*, 394: 342-355.
- Frenguelli, J., 1929.** Apuntes de geología Patagónica. Descripción de algunos perfiles de la zona petrolífera de Comodoro Rivadavia. *Boletín de Informaciones Petroleras*, 6(59):575-605. Buenos Aires.
- Georgakakos, K.P., Unnikrishna, P.V., Bravo, H.R., Cramer, J.A., 1991.** A national system for determining threshold runoff values for flash-flood prediction. Issue Paper, Department of Civil and Environmental Engineering and Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, IA.
- Georgakakos K.P. 1986.** On the design of national real-time warning systems with capability for site-specific flash flood forecasts. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **67**: 1233–1239.
- Georgakakos K.P., Unnikrishna, P.V., Bravo, H.R., Cramer J.A., 1991.** A national system for determining threshold runoff values for flash flood prediction. Issue Paper, Department of Civil and Environmental Engineering and Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa City, IA.
- González Díaz, E.F. 2004.** La extensa zona de deslizamientos de la escarpa oriental de la Pampa de Salamanca, Chubut, entre los 45°00'S y 45°45'S.
- Groisman, P., Ya, R. W. Knight, T. R. Karl, D. R. Easterling, B. Sun, and J. M. Lawrimore, 2004.** Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: Trends derived from in situ observations. *J. Hydrometeor.*, **5**, 64–85.

- Hill C, Verjee F, Barrett C. 2010. *Flash Flood Early Warning System Reference Guide*. University Corporation for Atmospheric Research, ISBN 978-0-615-37421-5. http://www.meted.ucar.edu/communities/hazwarnsys/haz_fflood.php
- IPCC 2007 (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). *Cambio climático 2007: informe de síntesis*. Ginebra: IPCC.
- Iwashima, T., Yamamoto, R., 1993. A statistical analysis of the extreme events: Long-term trend of heavy daily precipitation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **71**, 637–640.
- Jarrett, R.D., 1984. Hydraulics of high-gradient rivers. *Journal of Hydraulical Engineering*, **110** (11): 1519–1539.
- Kirbky, M.J., Bracken, J.L., 2009. Gully processes and gully dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, **34**: 1841–1851.
- Krumbein, W.C., Sloss, L.L., 1963. *Stratigraphy and Sedimentation*, 2nd Edition, W.H. Freeman and Company, San Francisco, p. 660.
- Legarreta, L., Uliana, M., Torres, M., 1990. Secuencias deposicionales cenozoicas de Patagonia Central: sus relaciones con las asociaciones de mamíferos terrestres y episodios marinos epicontinentales. 3° Simposio del Terciario de Chile. Actas: 135-176. Concepción.
- Longobardi, A., Villani, P., Grayson, R.B., Western, A.W., 2003. On the relationship between runoff coefficient and catchment initial conditions. *Proc. MODSIM 2003*, 867–872.
- Marshall, L.G, R.L. Cifelli, R.E. Drake, G.H. Curtis, 1986. Vertebrate paleontology, geology, and geochronology of the Tapera de Lopez and Scarritt Pocket, Chubut Province, Argentina. *Journal of Paleontology* **60**: 920-951.
- Martínez, O.A. y Kutschker, A. 2011. The ‘Rodados Patagónicos’ (Patagonian shingle formation) of eastern Patagonia: environmental conditions of gravel sedimentation. *Biological Journal of the Linnean Society*. **103**(2), 336-345.
- Martínez, O.A., González, M., Toppazzini, M. y Kutschker, A. 2014. Mantos de grava y evolución del paisaje en el suroeste de la provincia del Chubut (Argentina), desde el Mioceno hasta el presente. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, **27**(2): 39-50.
- Meehl, G. A., F. Zwiers, J. Evans, T. Knutson, L. Mearns, and P. Whetton, 2000. Trends in extreme weather and climate events: Issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 427–436.
- Montes, A., Rodríguez, S.S., San Martín, C.N., Allard, J.O., 2015. Migración de campos de dunas en cañadones costeros de Patagonia. *Geomorfología e implicancias paleoclimáticas*. *Revista de la Sociedad Geológica de España* **28** (2), 65-76.
- Ori, G.G., Diachille, G., Komatsu, G., Marinangeli, L., Rossi, A.P., 2007. River morphologies and palaeodrainages of western Africa (Sahara and Sahel) during humid climatic conditions. En: Nichols, G., Williams, E., Paola, C. (Eds.) *Sedimentary Processes, environments and basins*. IAS Special Publication **38**, p. 519-533.
- Paredes, J.M., 2002. Asociación de facies y correlación de las sedimentitas de la Formación Chenque (Oligoceno-Mioceno) en los alrededores de Comodoro Rivadavia, Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, **9** (1): 53-64.
- Paredes, J.M., Foix, N., Guerstein, G.R., Guler, M.V., Irigoyen, M., Moscoso, P., Giordano, S., 2015. A late Eocene-early Oligocene transgressive event in the Golfo San Jorge basin: palynological results and stratigraphic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, **63**: 293-309
- Raigemborn, M.S., Krause, J.M., Bellosi, E., Matheos, S.D., 2010. Redefinición estratigráfica del Grupo Río Chico (Paleógeno Superior), en el norte de la cuenca del Golfo San Jorge, Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* **67**, 239-256.
- Rind, D., Goldberg, R., Ruedy, R., 1989. Change in climate variability in the 21st century. *Climatic Change* **14**, 537.
- Rodríguez, J.F., Littke, R., 2001. Petroleum generation and accumulation in the Golfo San Jorge Basin, Argentina: a basin modeling study. *Marine and Petroleum Geology* **18**, 995-1028.
- Sayama, T., McDonnell, J., 2009. A new time-space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the watershed scale. *Water Resour. Res.* **45**, July 1.
- Sayama, T., McDonnell, J.J., Dhakal, A., Sullivan, K., 2011. How much water can a watershed store? *Hydrol. Process.* **25** (25), 3899–3908.
- Sciutto, J.C., Césari, O. e Iantanos, N., 2008. Hoja geológica 4569-IV Escalante, escala 1:250000: Programa Nacional de Cartas Nueva unidad litoestratigráfica del grupo Chubut. 95 Geológicas de la República Argentina, Secretaría de Minería de la Nación, Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 351, 76 p. Buenos Aires
- Simeoni, A. 2008. Mesetas y bajos de la Patagonia central extraandina. La Inversión del Relieve. En: Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino. Tomo II - Sur: 729-745.
- Sunamura, T., 1992. *Geomorphology of rocky coasts*. John Wiley and Sons, 302 p.
- Weiler, M., McDonnell, J.J., 2007. Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hillslopes. *Water Resour. Res.* **43** (3): W03403. <http://dx.doi.org/10.1029/2006WR004867>
- Windhausen, A., 1924. Líneas generales de la constitución geológica de la región situada al oeste del Golfo San Jorge. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, **27**: 167-320. Córdoba.