



Precipitaciones extremas e inundaciones repentinas en ambiente semiárido: impactos del evento de marzo-abril de 2017 en Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina

José Matildo PAREDES¹, Silvina Mariela OCAMPO¹, Nicolás FOIX^{1,2}, Sabrina Ximena OLAZÁBAL¹, Mauro Nicolás VALLE^{1,2} y José Oscar ALLARD¹

¹ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

² CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas)

E-mail: paredesjose@yahoo.com

Editor: Alfonsina Tripaldi

Recibido: 1 de julio, 2019

Aceptado: 27 de diciembre, 2019

RESUMEN

Entre el 29 de marzo y el 08 de abril de 2017 se registraron precipitaciones extremas en el sudeste de la provincia de Chubut, que ocasionaron las peores inundaciones de la historia de la ciudad de Comodoro Rivadavia. Lluvias persistentes e intensas en dicho período, que totalizaron 399.4 mm y que solo el 30 de marzo alcanzaron 232 mm, activaron las siete cuencas de drenaje efímeras que cruzan el ejido urbano y desembocan en la costa atlántica. En sus cabeceras se formaron cárcavas de dimensiones sin precedentes, ensanchamiento de los arroyos efímeros, y el transporte en suspensión de grandes volúmenes de sedimento tamaño arena generó agradación en zonas bajas. La incorporación adicional de sedimento grueso derivado de caminos, locaciones petroleras y (localmente) canteras de áridos generó un incremento aguas abajo en la capacidad erosiva de los flujos. Aunque parte del sedimento se depositó por desbordamiento de los canales en la zona peri-urbana, la mayor parte del sedimento alcanzó los arroyos de mayor jerarquía e ingresó a la ciudad a alta velocidad. Dentro del ejido urbano, el taponamiento o rotura de desagües pluviales y alcantarillados produjo la inundación de sub-cuencas endorreicas y planas. El sedimento areno-limoso que alcanzó la costa atlántica generó la progradación de formas deltaicas transitorias de hasta 500 m de ancho, medidas desde la línea de costa previa. El evento extremo de precipitaciones produjo daños significativos a la infraestructura urbana e industrial, puso en evidencia falta de planeamiento a escala de cuenca de drenaje, y la necesidad de medidas de protección para reducir el impacto de precipitaciones extremas futuras.

Palabras clave: *catástrofe socio-climática, arroyos efímeros, cárcavamiento, aporte sedimentario, sedimentación en canales fluviales, uso del suelo de la cuenca.*

ABSTRACT

Extreme rainfall and flash floods in a semiarid setting: impacts of the march-april 2017 event in Comodoro Rivadavia, Chubut.
Since 29 March to 8 April 2017 an extreme rainfall event occurred in the southeast of Chubut province, causing the worst floods in the history of the Comodoro Rivadavia city. Persistent and heavy rains in the period, that reached 399.4 mm and on only in 30 March amounted to 232 mm, activated seven ephemeral streams that cross the urban area and debouch in the atlantic coast. Large, unprecedented gullies were formed in upper hillslopes, with widening of the ephemeral streams and suspended transportation of large volume of sand-sized particles generating aggradation in lowland areas. Further incorporation of coarse-size clastic components derived from roads, oil locations and (locally) aggregate quarries favored the downstream increase of the erosive capacity of the flows. Although some sediment was deposited by overbank in the peri-urban area, most of the sediment entered to the city throughout higher-order streams at high velocity. Within the urban area, the blocking of manmade waterways produced the flooding of flat, endorheic sub-basins. The sand-to-silt sized sediment that arrived to the atlantic coast generated the progradation of transient deltas up to 500 m wide,

as measured from the previous coastline. The extreme rainfall event generated significant damages to both urban and industrial infrastructure, evidencing lack of efficient planning at catchment scale, and the need of protective measures to reduce the impact of future rainfalls.

Keywords: *socio-climatic catastrophe, ephemeral streams, gully formation, sediment supply, sedimentation in fluvial channels, watershed land use.*

INTRODUCCIÓN

La dinámica sedimentaria de los sistemas fluviales está controlada por una serie de factores naturales, tales como clima, geología, geomorfología, suelos y vegetación (Miall 1996, Bridge 2003, Schumm 2005). Sin embargo, en décadas recientes se ha reconocido la importancia de una serie de variables sociales y económicas (crecimiento poblacional, urbanización, industrialización, y regulaciones ambientales, entre otras) que impactan con comparable intensidad sobre la dinámica de las cuencas de drenaje (Hooke 2000, Meybeck 2003, Allan 2004, Royer 2016). Particularmente, en zonas semiáridas y áridas los sistemas fluviales son efímeros (Graf 1988, Benvenuti et al. 2005, Billi 2007), y su activación por lluvias infrecuentes, cortas y de alta intensidad - o concentradas en un período corto del año - se traduce en grandes incrementos en la descarga de los arroyos durante episodios particulares, que pueden originar inundaciones repentinas (*flash floods*) que se propagan a través de la red de drenaje (Patton y Baker 1976, Patton 1988). Estos eventos de alta descarga son responsables de movilizar grandes volúmenes de sedimento y agua, produciendo notables impactos sedimentológicos (Gutiérrez et al. 1998, Ortega y Heydt 2009, Archer y Fowler 2015) y geomorfológicos dentro de la red de drenaje (Tooth 2000, Reid y Frostick 2011, Scorpio et al. 2018). El impacto geológico producido por eventos de precipitaciones, particularmente aquellos de lluvias extremas dentro de la red de drenaje incluye ensanchamiento de canales y profundización (Krapesch et al. 2011), cambio en la posición de los canales (Grove et al. 2013), cambio en el patrón en planta de los canales y sus características (Burass et al. 2014, Belletti et al. 2014), erosión y movimiento de grandes cantidades de sedimento de tamaño de grano variable (Reid y Frostick 1986, Powell et al. 2001) y depositación de sedimento dentro de los canales, sobre la planicie de inundación y en depresiones endorreicas (Sloan et al. 2001, Hauer y Habersack 2009, Hooke 2015).

Entre el 29 de marzo y el 8 de abril de 2017 se registraron precipitaciones extraordinarias en el sudeste de la provincia de Chubut totalizando 399.4 mm de lluvia caída, que ocasionaron las peores inundaciones de la historia de la ciudad de

Comodoro Rivadavia, la ciudad más poblada de la Patagonia central. La activación simultánea de siete cuencas de drenaje que cruzan la ciudad para desembocar en la costa atlántica produjo daños generalizados a la infraestructura urbana e industrial, y pérdida de dos vidas humanas. Otros eventos extremos de precipitación han ocurrido en otras localidades de Chubut desde fines del siglo pasado, destacándose Trelew (abril de 1998), Arroyo Verde (2011), Comodoro Rivadavia (2011), y fueron el resultado de una alteración en los patrones de circulación atmosférica, asociados a 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 más prolongados (Rind et al. 1989, Groisman et al. 2005, IPCC 2007).

Las siete cuencas de drenaje efímeras que atraviesan con sentido oeste-este a la ciudad de Comodoro Rivadavia han experimentado una rápida urbanización en las últimas tres décadas. Este crecimiento está fundamentalmente vinculado al desarrollo de la industria del petróleo, y considerando la escasez de tierras adecuadas para el emplazamiento de viviendas, la presión de la urbanización en las zonas bajas de las cuencas de drenaje se ha incrementado progresivamente, con emprendimientos privados y estatales localizados en áreas planas adyacentes a los arroyos, o en áreas de fuerte pendiente (Griznik y Hirtz 2000, Hirtz et al. 2000). Hacia el oeste de la ciudad, las posiciones altas de las cuencas de drenaje son actualmente áreas activas involucradas en el desarrollo de hidrocarburos, con más de 7000 locaciones petroleras, e instalaciones asociadas. El desarrollo urbano e industrial ha producido una sostenida degradación del paisaje natural y deforestación a escala de las cuencas de drenaje. Por otro lado, ninguna de las cuencas efímeras cuenta actualmente con estaciones de monitoreo de descarga, e históricamente las medidas de protección en los arroyos se han limitado a aquellos sectores de mayor vulnerabilidad (por ejemplo, donde los caminos cruzan arroyos, o en puentes emplazados en arroyos de mayor orden), especialmente en áreas urbanas.

En este contexto, esta contribución sintetiza los resultados de estudios sedimentológicos y geomorfológicos realizados con posterioridad al evento extremo de precipitaciones

en el ámbito urbano y peri-urbano de Comodoro Rivadavia, analizando (i) la variación espacial de los rasgos erosivos y depositacionales identificados a lo largo de las cuencas de drenaje, (ii) la influencia de procesos antropogénicos del uso del suelo sobre las características del flujo y la intensidad de la erosión, y (iii) posibles acciones de mitigación para reducir el impacto de lluvias futuras. Un resumen de los hallazgos de este estudio ha sido presentado como un informe técnico de acceso libre de la Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud (UNPSJB) con posterioridad al evento extremo (Paredes et al. 2017), el que constituye la base del presente trabajo.

MARCO REGIONAL

Contexto climático

La ciudad de Comodoro Rivadavia, localizada en el sudeste de la provincia de Chubut en la Patagonia central y adyacente a la costa atlántica en el golfo San Jorge, es una ciudad industrial con un área urbana de 558.2 km², con una población de alrededor de 200000 habitantes. La región analizada se encuentra en la zona de sombra de lluvias de los Andes Patagónicos, y está sujeta a fuertes vientos del oeste, con un contraste de temperaturas estacional significativo. Los datos de la estación meteorológica del aeropuerto General Enrique Mosconi de Comodoro Rivadavia indican que en el período 1963-2017 la temperatura media anual ha sido de 13.5°C, con los valores promedio más bajos en el mes de julio (6.6°C) y las temperaturas más altas en enero (19.4°C); las temperaturas máximas y mínimas absolutas de este registro de 61 años son 40.2°C y -8.5°C, respectivamente (Fig. 1a). En el período considerado, la temperatura media anual muestra un incremento gradual de 0.7°C. La velocidad media del viento es de 32 km/h, con vientos predominantes del oeste con una frecuencia anual de 517/1000, seguidos por vientos desde el noroeste (111/1000), días calmos (93/1000) y del suroeste (63/1000), con vientos raros del sudeste (30/1000) (Montes et al. 2017). Vientos que superan los 200 km/h se han registrado en la estación meteorológica analizada dentro del período de registro, con valores de 215 km/h el 14/09/1976 y de 206 km/h el 28/04/1977 (Natalini y Natalini 2013). La precipitación media anual es de 244.8 mm, con gran parte de las precipitaciones cayendo en otoño-invierno (abril a julio), con valores entre 559 mm (año 2017) y 134 mm (año 2015). La media mensual es de 20 mm, con máximos de precipitación promedio durante el mes de mayo (34.5 mm/mes). Para el período 1963-2017, los eventos de precipitación diarios son intensos si se encuentran

dentro del 5% mayor de todos los eventos de precipitación del período analizado (>15 mm/día), muy intensos cuando se encuentra en el 1% superior (>35 mm/día) y extremos cuando se encuentra en el 0.1% superior de todos los eventos de precipitación (>59 mm/día). Para el sector analizado, ni el promedio anual ni el promedio mensual de precipitaciones (Fig. 1b) son representativos de la distribución de lluvias, que se caracterizan por lluvias dispersas, localizadas e intensas que concentran en corto plazo (2-3 días) entre el 30-40% de las precipitaciones medias anuales. Con excepción del evento de 2017, se ha producido desde el año 2000 una reducción en los valores máximos mensuales de las precipitaciones (Fig. 1d), pero sin embargo el impacto de las lluvias se ha incrementado desde el año 2010, generando daños significativos en áreas urbanas con cantidades decrecientes de lluvia caída. La evapotranspiración potencial de la región alcanza los 704 mm/año, mostrando un déficit anual del orden de 427 mm entre agosto y abril (Hernández et al. 2017). En este contexto, se desarrolla una cobertura de vegetación escasa, principalmente con plantas xerofíticas (Paruelo et al. 1992).

Reseña geológica y geomorfológica

El área de estudio está comprendida entre las latitudes de 45°36' - 45°58' S y longitudes de 67°22' - 68°09' O (Fig. 2), caracterizada por afloramientos de rocas sedimentarias cenozoicas con disposición horizontal. El registro continental de la Formación Sarmiento (Eoceno medio - Mioceno inferior) consiste en sucesiones volcánicas de tamaño ceniza y morfología tipo *badlands*, expuestas en áreas costeras ubicadas al norte de la ciudad de Comodoro Rivadavia (Sciutto et al. 2008); las sucesiones de ambiente marino somero de la Formación Chenque (Mioceno inferior) están preservadas aguas arriba de la Formación Sarmiento, y tienen un espesor de 350 m de potencia máxima, caracterizadas por la alternancia de arcillitas, areniscas y niveles de coquina (Bellosi 1990, 1995, Paredes 2002, Cuitiño et al. 2015). La Formación Santa Cruz (Mioceno medio) está integrada por areniscas y arcillitas de ambiente eólico y fluvial (Bellosi y Jalfin 1996), tiene un espesor de 200 m y está expuesta en la parte alta de las cuencas de drenaje. La sucesión se completa con los Rodados Patagónicos (Plioceno a Pleistoceno), una sucesión glacial que supera los 20 m de potencia conformada por gravas y guijarros transportados desde los Andes por sistemas fluviales de alta energía (Césari y Simeoni 1994, Martínez y Kutschker 2011), actualmente preservados en las cabeceras de las cuencas de drenaje a más de 750 m.s.n.m. conformando la Pampa del Castillo y Pampa de Salamanca. La cobertura sedimentaria del Cuaternario cubre las laderas con limos gravosos y

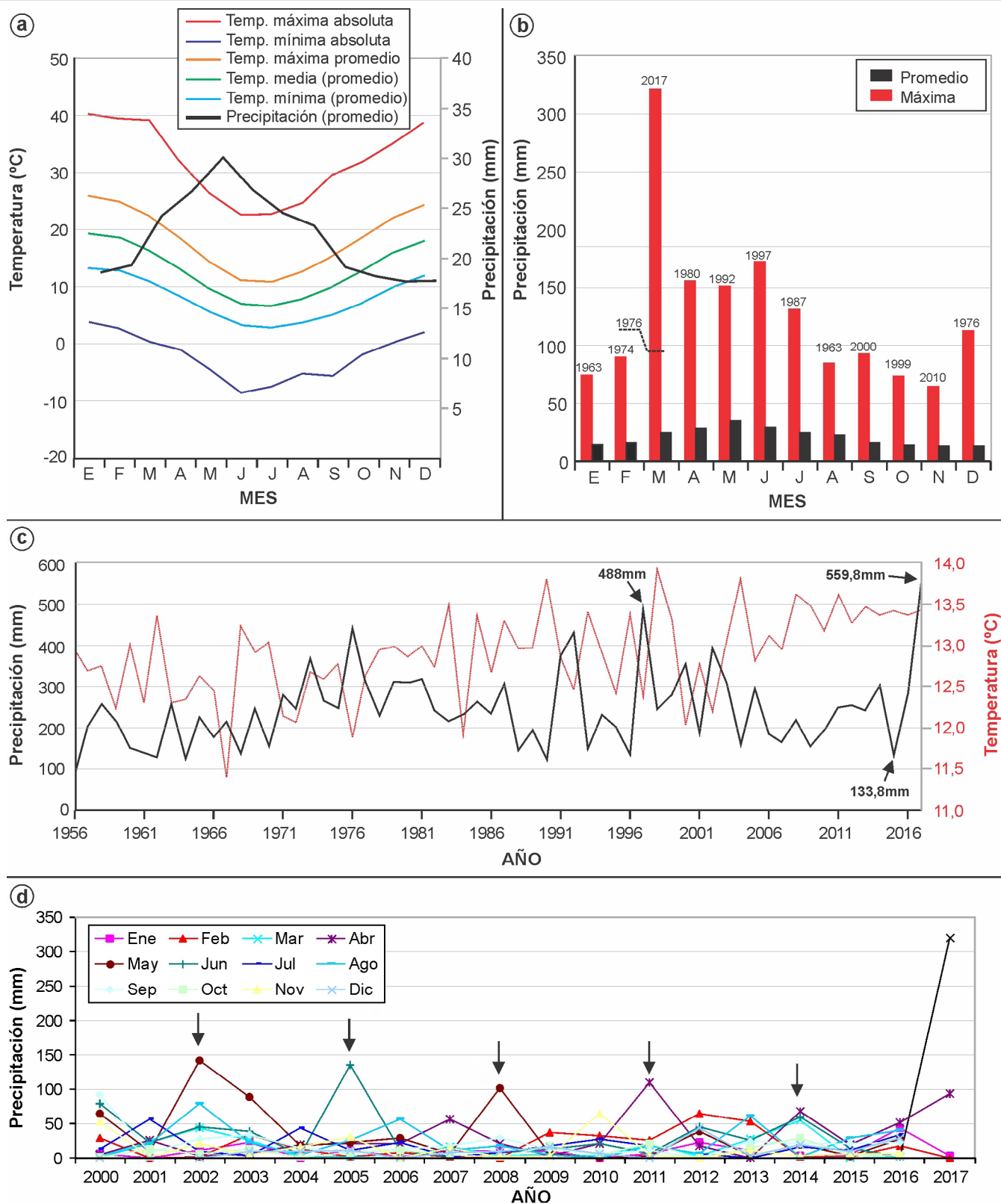


Figura 1. Características climatológicas del área de estudio, según datos del período 1963-2017 obtenidos en la estación meteorológica en el aeropuerto General Enrique Mosconi de Comodoro Rivadavia (ubicación en figura 2): a) Variaciones en la temperatura y precipitaciones; b) Precipitaciones máximas y promedio. El evento ocurrido entre el 29 de marzo y el 8 de abril de 2017 totalizó 399.4 mm y superó el promedio anual de lluvia (244 mm). La lluvia caída entre el 29 y el 31 de marzo alcanzó los 291.6 mm, más de tres veces mayor que el registro máximo previo del mes de marzo (95.5 mm en el año 1976); c) Variación interanual en las precipitaciones y temperaturas promedio. Se señalan los valores máximos y mínimos registrados previamente; el evento de precipitaciones de 2017 es el mayor en el período de registro; d) Distribución mensual de las precipitaciones en el período 2000-2017. Notar la tendencia decreciente de los valores acumulados máximos, con máximos relativos trianuales (flechas). Datos provistos por el Servicio Meteorológico Nacional.

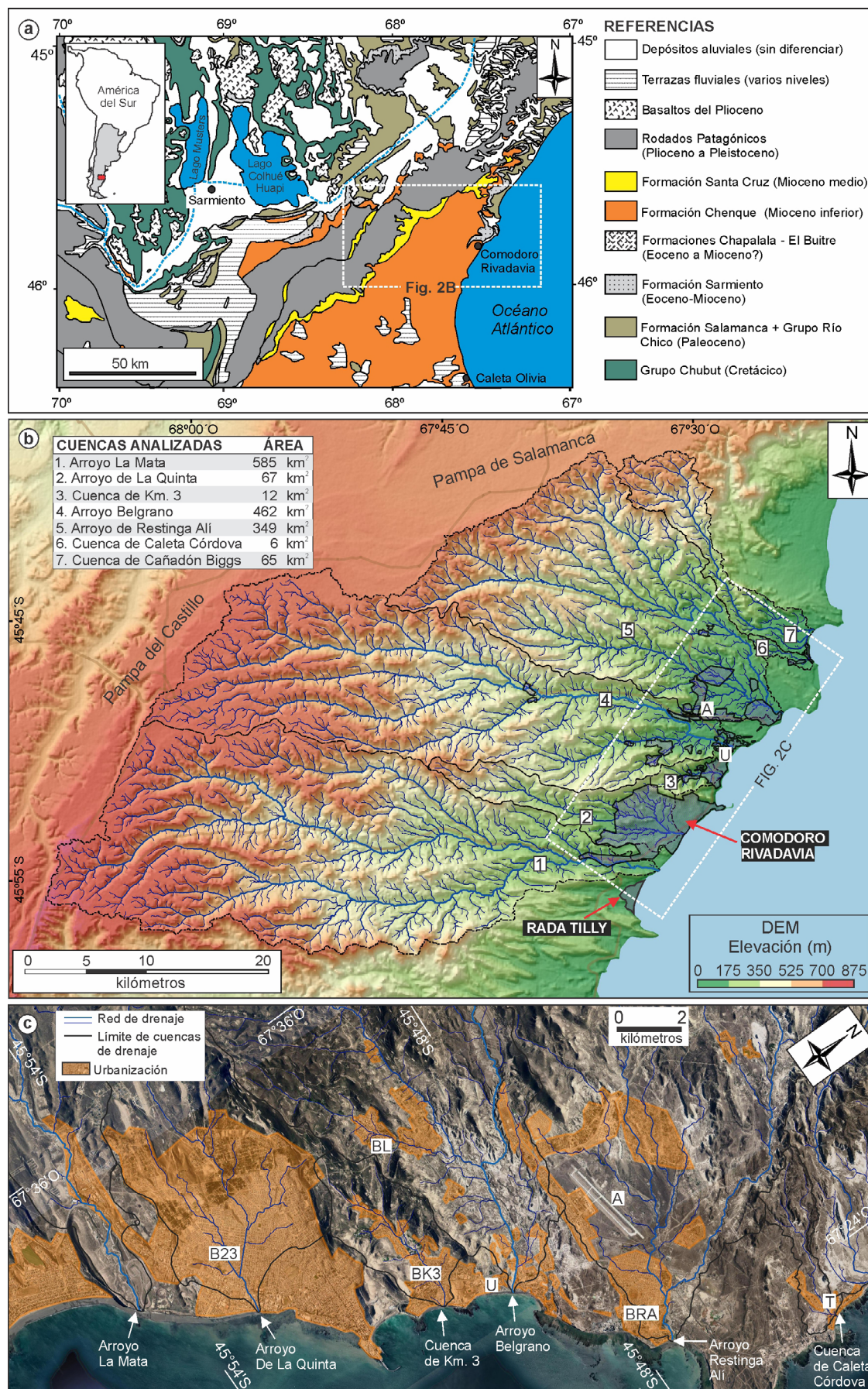


Figura 2. a) Ubicación del área de estudio y mapa geológico simplificado de la cuenca del Golfo San Jorge; b) Cuencas de drenaje y principales tributarios alrededor de las ciudades de Comodoro Rivadavia y Rada Tilly. En color azul se indican los barrios de la ciudad de Comodoro Rivadavia. Claves: (1) Arroyo La Mata, (2) Arroyo De La Quinta, (3) Cuenca de Km. 3, (4) Arroyo Belgrano, (5) Arroyo de Restinga Ali (Km. 8), (6) Cuenca de Caleta Córdova, (7) Cuenca del Cañadón Biggs. El recuadro indica nombre y área de cada cuenca de drenaje. Modelo de Elevación Digital SRTM p229092; c) Detalle de las urbanizaciones y redes de canales fluviales dentro del área urbana. Las letras mayúsculas marcan la posición de las estaciones meteorológicas en el aeropuerto General Mosconi (A), Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (U) y la empresa Termap (T), y de los barrios más afectados por el evento, entre ellos Barrio Juan XXIII (B23), Barrio Laprida (BL), Barrio Km. 3 - General Mosconi (BK3), y Barrio Restinga Ali (BRA).

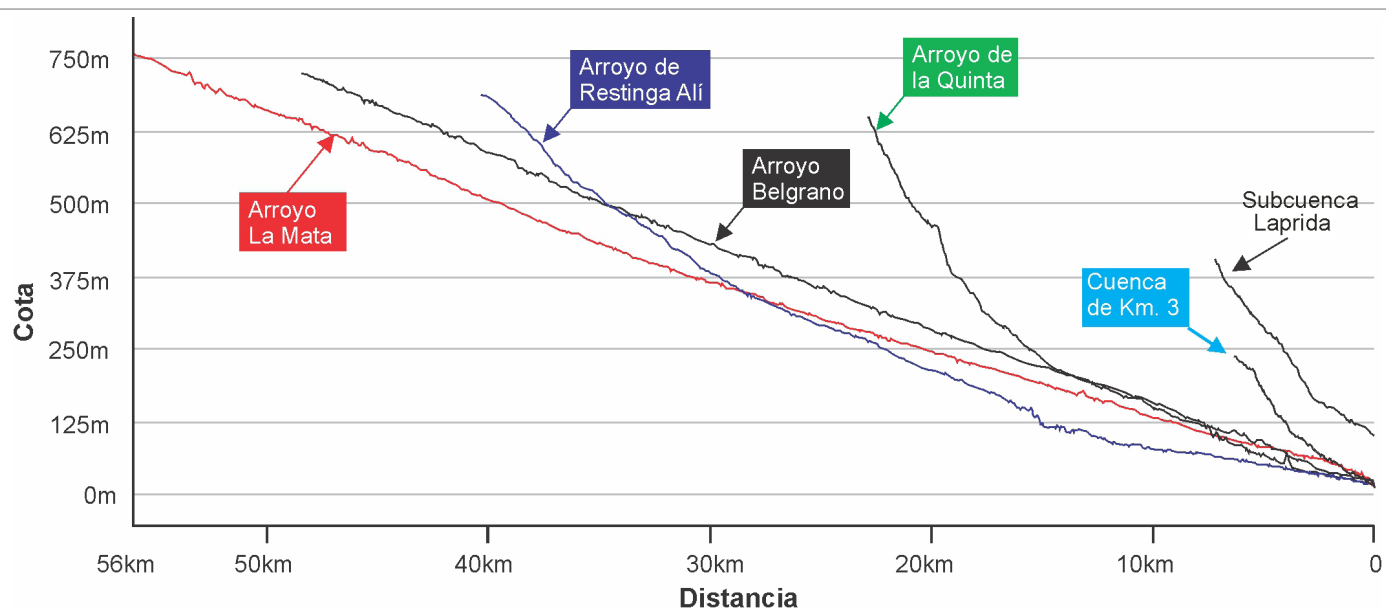


Figura 3. Perfil longitudinal del cauce de mayor longitud de las cuencas de drenaje analizadas (modificado de Paredes et al. 2017). Las desviaciones locales en la cota del cauce se deben al efecto combinado de la presencia de cárcavas profundas y limitaciones en la resolución del DEM utilizado.

arenas de grano muy fino a fino de origen eólico y fluvial, que en sectores alcanzan 15 m de potencia, rellenando canales inactivos, cárcavas previas o cubriendo el paisaje de forma mantiforme (Sciutto et al. 2008, Montes et al. 2015).

La geomorfología del área de estudio muestra siete cuencas de drenaje efímeras que desembocan en el océano Atlántico, sin ríos perennes y cruzando transversalmente al éjido urbano de Comodoro Rivadavia (Fig. 2b). Numerosos barrios están emplazados en áreas planas cerca de la desembocadura (Fig. 2c) o en zonas de fuerte pendiente de las cuencas de drenaje, lo que otorga una peligrosidad intrínseca a las urbanizaciones. Las cuencas de drenaje se caracterizan por pendientes elevadas, con rangos de 0.0027 y 0.0371 para la longitud de los arroyos más largos, cubriendo un área aproximada de 1546 km², y con un desnivel de 0 m s.n.m. en la desembocadura y 751 m en la divisoria de drenaje en la Pampa del Castillo (Fig. 3).

En los alrededores de Comodoro Rivadavia, algunos arroyos tienen su lecho húmedo 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 la inmensa mayoría de los arroyos son efímeros y mantienen su lecho seco durante períodos de muchos años, activándose únicamente durante eventos de precipitaciones extremas. Los procesos de erosión y depositación asociados a la actividad ocasional de esos arroyos han labrado un paisaje típicamente fluvial en las cuencas de drenaje alrededor de Comodoro Rivadavia, en la que se reconocen patrones de canales entrelazados, márgenes erosionales y depositacionales, y meandros incididos (Fig. 4).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un relevamiento de campo de las siete cuencas de drenaje con posterioridad al evento extremo de precipitaciones estudiado, desarrollado entre los meses de abril a junio de 2017, analizando una gran cantidad de rasgos desde las zonas altas a la desembocadura. Se recopilieron muestras de sedimento a lo largo de las cuencas de drenaje para análisis granulométrico mediante tamizado, utilizando procedimientos estandarizados (Folk 1980, Thorne 1998), posteriormente representados en base a la escala granulométrica de Krumbein y Sloss (1963).

Para comparar los impactos del desarrollo urbano, de inundaciones previas y del evento extremo de marzo-abril de 2017, se analizaron fotografías aéreas de fechas diferentes: octubre de 1970 (Instituto Geográfico Nacional, fotomosaico del área urbana a escala 1/50.000), octubre de 1995 (SEGEMAR, escalas 1:5000 y 1:8000), octubre de 2001 (UNPSJB, escala 1:10000), complementadas con mapas topográficos antiguos de la ciudad de Comodoro Rivadavia, levantados por L. Von Platten y J. Brandmays para Yacimientos Petrolíferos Fiscales en diciembre de 1929. Se realizó el escaneo y ortorectificación de las imágenes utilizando Georeferencer GDAL de QGIS 2.18.4. El análisis fotográfico se pensó para definir sitios para estudios sedimentológicos y mapeo geomorfológico detallado, pero también para revelar los efectos de las inundaciones sobre las obras civiles, y el impacto de las instalaciones industriales/urbanas sobre la respuesta del sistema fluvial.

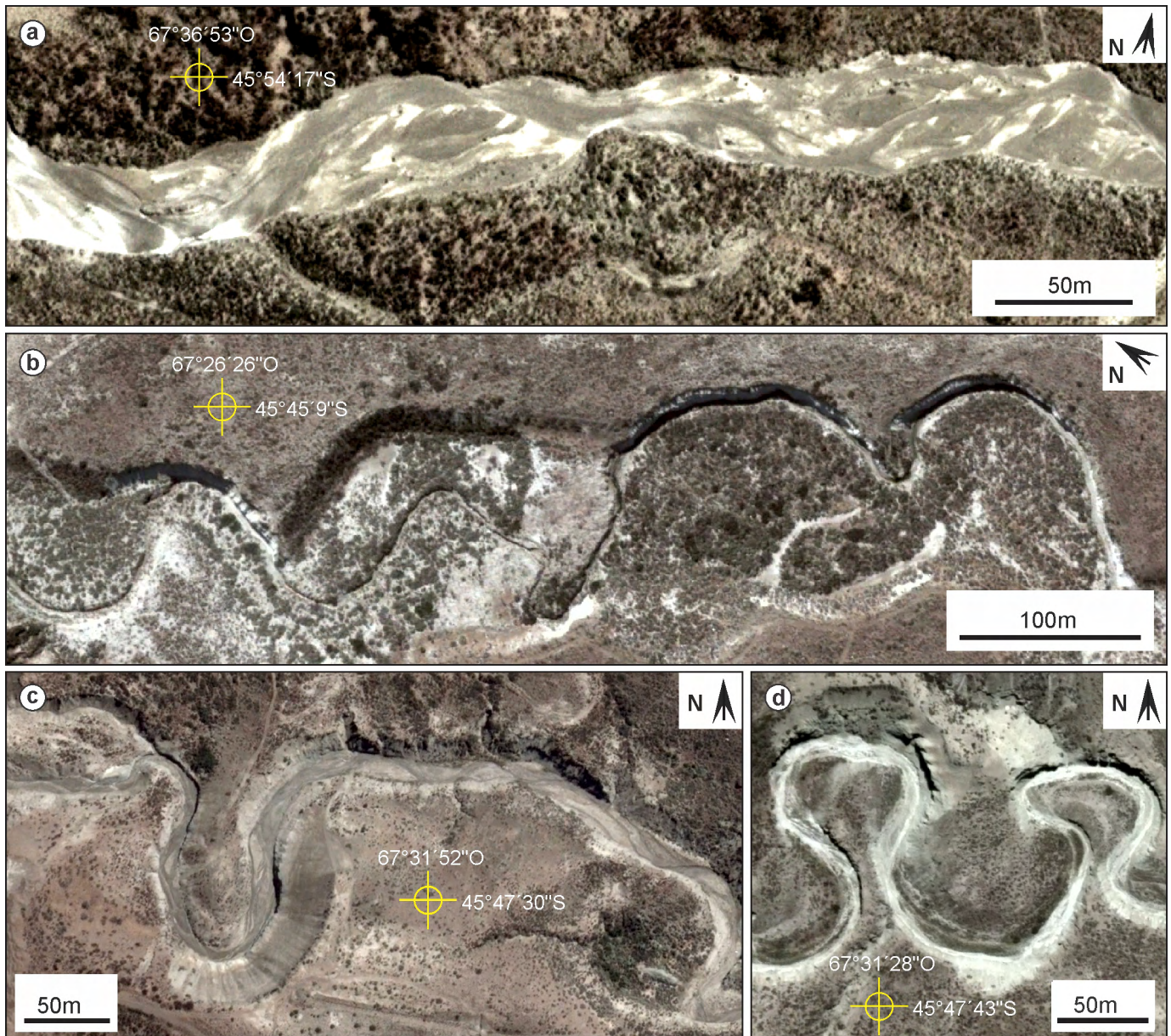


Figura 4. Aspecto típico de los arroyos efímeros en las cuencas de drenaje de Comodoro Rivadavia. a) Arroyo La Mata, con desarrollo de patrones de canales entrelazados; b) Arroyo de Restinga Alfí. Notar los márgenes erosivos curvados asociados a la migración lateral del canal, y el reducido tamaño del canal actual en relación al valle antiguo; c-d) Arroyo Belgrano, con desarrollo de meandros incididos. Imagen de Google Earth™.

Se utilizaron imágenes gratuitas de Google Earth™ para ilustrar los cambios en la geometría de tramos específicos de los canales, para analizar el crecimiento de las cárcavas desde el año 1995, y para evaluar la evolución de los emplazamientos urbanos en relación a las áreas afectadas por el evento extremo.

Se realizó un análisis morfométrico detallado de las siete cuencas de drenaje utilizando el sistema de información geográfica QGIS 2.18.4., a través del mapeo automático y manual de las redes de canales sobre imágenes satelitales, y sobre un modelo de elevación digital (ALOS PALSAR ALPSRP268996250) con 12,5 m de resolución espacial. Los

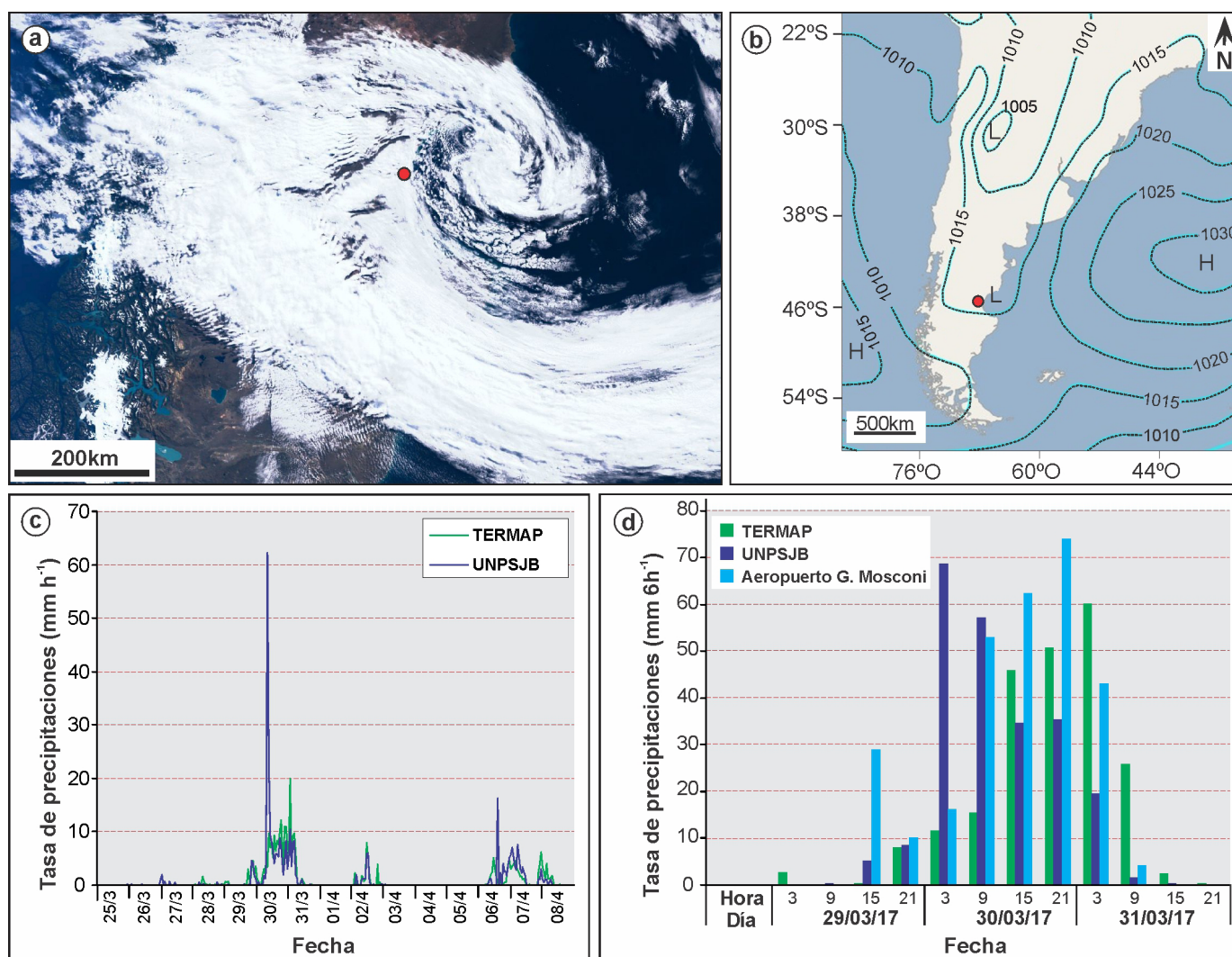
parámetros fundamentales tales como el número de cauces, longitud de los cauces, perímetro y área de las cuencas se extrajeron de las capas vectoriales. Los parámetros morfométricos de las siete cuencas de drenaje, útiles para comprender el comportamiento hidrológico de las cuencas (en ausencia de datos de monitoreo o aforos) se calcularon utilizando las ecuaciones propuestas por Horton (1945) y Strahler (1964). Los valores de descarga así obtenidos se compararon con estimaciones usando la ecuación de Manning (Chow 1959, Henderson 1966). Algunas extrapolaciones de estimaciones de descarga se realizaron asumiendo relaciones directas entre área de drenaje y caudal (Syvitski y Saito 2007).

EL EVENTO EXTREMO DE 2017

La zona costera de las provincias de Santa Cruz y Chubut presentó abundante niebla y bruma en los días previos al inicio de la tormenta. El escenario evidenciaba elevada evaporación de agua de mar, y el desarrollo de una celda de alta presión en el océano Atlántico a lo largo de la costa argentina (Fig. 5), con una anomalía de temperatura del agua de mar de +1.5 °C. La tormenta se desarrolló debido a la formación de una depresión frontal que se movió lentamente desde los Andes hacia la zona costera, influenciada por vientos del oeste. La simultánea conformación de la célula de alta presión en el océano Atlántico favoreció a la estabilización de la tormenta sobre la porción sur de Chubut y sector norte de la provincia de Santa Cruz, proveyendo masas de aire húmedas y cálidas

a la atmósfera, que contribuyeron a incrementar las precipitaciones.

Los valores de las precipitaciones fueron registrados por estaciones meteorológicas en el aeropuerto General Mosconi (399.4 mm), UNPSJB (367 mm) y la empresa Termap (344 mm), identificando tres picos de precipitaciones (Fig. 5c-d). El primer evento de precipitaciones tuvo lugar entre el 29 y el 31 de marzo, el segundo estuvo concentrado el 2 de abril de 2017, en tanto el tercer evento de lluvia ocurrió entre el 6 y el 8 de abril de 2017. El primer evento de precipitaciones fue de alta intensidad y mostró gran variabilidad espacial en la distribución de lluvia caída dentro del área de estudio, totalizando 291 mm de lluvia con un máximo de intensidad horaria de 62 mm. El 30 de marzo de 2017 las precipitaciones alcanzaron 232 mm, una acumulación de lluvia fuera de los valores



históricos de la región (Fig. 5). El segundo y tercer evento de precipitaciones, de menor magnitud aunque superando en conjunto los 95 mm, ocurrieron sobre suelos ya saturados, y produjeron la inundación generalizada de grandes áreas urbanas y daños a la infraestructura, debido a la activación simultánea de las siete cuencas de drenaje.

GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA

En cuencas de drenaje que no cuentan con monitoreo de descarga líquida, el análisis morfométrico brinda información valiosa para la comprensión del comportamiento del sistema fluvial durante las precipitaciones (Gutiérrez et al. 1998, Ortega y Heydt 2009, Borga et al. 2014, Righini et al. 2017). Por ello, en esta sección se compila la información geomorfológica de las siete cuencas de drenaje del área de estudio (Cuadro 1).

El análisis geomorfológico de las cuencas muestra im-

portantes diferencias entre ellas. El tamaño de sus áreas varía en dos órdenes de magnitud (6-585 km²) al igual que la longitud total de los cursos (9.96-940 km), pero la longitud del curso principal cambia en un orden de magnitud (5.6-56 km). La pendiente promedio del curso principal de todas las cuencas es muy alto, con valores entre 0.0027 a 0.0371, aunque localmente valores mayores se encuentran en algunas subcuencas (por ej. Barrio Laprida: 0.049). Los tiempos estimados de concentración de lluvias utilizando el método de Kirpich (Kirpich 1940) varían entre 23 minutos y 7.8 horas. Estas estimaciones indican que las cuencas más pequeñas, que además muestran mayores pendientes y una morfología cuasi-circular (señalado por el índice de circularidad mayor) tienen tiempos de concentración menores (por ej. Cuenca de Km. 3 = 23 minutos). A partir de estas observaciones, se reconoce que la respuesta rápida del flujo durante las tormentas tiene una relación directa con los parámetros morfométricos de las cuencas.

Adicionalmente, y aunque ninguna de las cuencas de dre-

Cuadro 1. Principales parámetros morfométricos de las cuencas de drenaje del área de estudio. Ver ubicación en figura 2b.

PARÁMETRO	Símbolo/ fórmula	CUENCA DE DRENAJE						
		Biggs	Caleta Córdoba	Km.8	Belgrano	Km. 3	De La Quinta	La Mata
Área (km ²)	A	65	6	349	462	12	67	585
Perímetro (km)	P	80	20	114	140	16	55	155
Longitud del cauce principal (kms)	L	24,2	5,6	40,3	48,4	6,3	22,8	56
Relieve relativo (cauce principal)	Dc	614	110	670	713	234	635	729
Pendiente promedio (cauce principal)	$S = Dc/L$	0,0152	0,0027	0,0166	0,0147	0,0371	0,0279	0,0130
Ancho de la cuenca (km)	W	2,7	1,1	8,7	9,5	1,9	2,9	10,4
Altura máxima (m)	H máx	662	154	702	751	373	664	773
Altura mínima (m)	H min	12	5	16	16	15	12	22
Desnivel (m)	H máx - H min	650	149	686	735	358	652	751
Coef. de compactación (Gravelius)	$Kc = 0,282 P/\sqrt{A}$	2.80	2.30	1.72	1.84	1.30	1.89	1.81
Índice de circularidad	$Ic = 4\pi A/P^2$	0.13	0.19	0.34	0.30	0.59	0.28	0.31
Factor de forma	$Rf = A/L^2$	0.11	0.19	0.21	0.20	0.30	0.13	0.19
Longitud total de cauces (km)	Lt	112.82	9.96	597.82	742.78	18.01	111.96	940.28
Densidad de drenaje (1/km)	$Dd = Lt/A$	1.74	1.66	1.71	1.61	1.50	1.67	1.61
Número de cauces	N	119	9	578	801	20	117	1025
Frecuencia de cauces	$F = N/A$	1.83	1.50	1.66	1.73	1.67	1.75	1.75
Tiempo de concentración (minutos) según Kirpich (1940)	$Tc = 0.02 L^{0.77} S^{-0.385}$	230.58	144.85	330.21	398.34	23.22	174.60	467.41

naje tiene estaciones de aforo o monitoreo de la descarga, durante el temporal e inmediatamente luego de cada evento de precipitaciones, se obtuvieron estimaciones de flujo en el arroyo Belgrano, utilizando estructuras sedimentarias y videos registrados durante la tormenta. De esta forma se estimaron los caudales del arroyo Belgrano mediante dos métodos: (i) ecuación de continuidad, y (ii) Ecuación de Manning (Manning 1891) (Cuadro 2).

(i) Ecuación de continuidad. Durante la tormenta, la sección de 60 m² (L=12 m, H= 5 m) del puente ubicado en la desembocadura fue completamente cubierta por agua. A partir de la observación de videos capturados durante la tormenta con objetos incorporados al flujo, se realizó una estimación aproximada de la velocidad superficial del flujo con un valor de 3 m/segundo en base al promedio de las mediciones realizadas. La descarga así estimada utilizando $Q= A.V$ es de 180 m³/seg.

(ii) Ecuación de Manning: La fórmula incluye la pendiente de la línea de agua (S), el radio hidráulico (R) y el coeficiente de Manning (o factor de rugosidad) (Cuadro 2). La pendiente de la línea de agua se la consideró equivalente a la pendiente del fondo del cauce, y se midió sobre el modelo de elevación digital (S = 0,0112), mientras que el radio hidráulico es $R= A/P$, donde A es la sección del canal (60 m²) y P es el perímetro mojado ($P= L + 2H$). De esta forma, $R= 60m^2/22m= 2.72$ metros. La estimación del coeficiente de Manning tiene en cuenta la pendiente (S) y la profundidad del canal (D) en la siguiente fórmula ($n=0.43S^{0.37}/D^{0.15} = 0.064$) (Georgakakos et al. 1991). El caudal estimado utilizando la ecuación de Manning para la desembocadura del arroyo Belgrano es de 193 m³/segundo.

Las estimaciones realizadas utilizando la ecuación de continuidad y la ecuación de Manning son de carácter orientativo, e indican valores de caudales comparables de la descarga

del arroyo Belgrano en su desembocadura, con valores entre 180 y 193 m³/seg., respectivamente.

Por otro lado, es conocida la relación directa que existe entre la descarga líquida (m³/s) y el área de la cuenca de drenaje (km²) para la gran mayoría de los sistemas fluviales (Syvitski et al. 2003, Galster et al. 2006, Syvitski y Saito 2007, Burgers et al. 2014, entre otros). Los coeficientes de regresión (R²) indican valores de 0.66-0.89 para esta relación en cuencas de distintas dimensiones (90-7500000 km²) y bajo diferentes condiciones climáticas (Syvitski et al. 2003). Galster et al. (2006) proponen que $Q = kA^c$ (Q: caudal, A: área de drenaje, k: velocidad del flujo y c: contante dependiente de la escala de la cuenca, generalmente ~1). Por esta razón, para estimar la descarga líquida en cuencas no aforadas se han generado métodos basados en la consideración que la escorrentía por unidad de área es similar en cuencas hidrológicamente similares (Ergen y Kentel 2016, Li et al. 2019). Por ello, asumiendo similares condiciones de precipitación y escorrentía (sustrato, cobertura vegetal, etc.) en las distintas cuencas analizadas en este trabajo, se ha utilizado la proporcionalidad $Q \propto A$ a los efectos de extrapolar los resultados obtenidos en la desembocadura del arroyo Belgrano a las otras seis cuencas efímeras (Cuadro 3). Estos resultados constituyen sólo una aproximación a las condiciones desarrolladas durante la tormenta.

GEOMORFOLOGÍA: RASGOS EROSIVOS

El evento de precipitaciones estudiado produjo grandes modificaciones del paisaje fluvial de la zona de estudio a través de procesos de incisión, relocalización de canales (avulsión), cambios en el diseño en planta de los canales, así como construcción y destrucción de barras dentro de los canales. Se produjeron procesos de erosión lateral en los márgenes de canales, aunque la formación y crecimiento de cientos de cárcavas constituyó uno de los impactos más dramáticos de la tormenta. Debido al impacto geomórfico durante el evento considerado, en esta contribución analizaremos con detalle los procesos de desarrollo de cárcavas y el ensanchamiento de canales.

Cuadro 2. Estimaciones de descarga acuosa del arroyo Belgrano en su desembocadura, utilizando la ecuación de continuidad y la ecuación de Manning.

Ecuación de continuidad	Ecuación de Manning
$Q = A \times V$	$Q = 1/n \times S^{1/2} \times R^{2/3} \times A$
$Q = 60 \text{ m}^2 \times 3 \text{ m/s} = 180 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 1/0.064 \times 0.0112^{1/2} \times 2.72 \text{ m}^{2/3} \times 60 \text{ m}^2 = 193 \text{ m}^3/\text{s}$

Cuadro 3. Estimaciones de descarga (aproximadas) de las siete cuencas de drenaje, derivadas y extrapoladas de los resultados obtenidos para la cuenca del arroyo Belgrano.

	La Mata	De La Quinta	Km.3	Belgrano	Km.8	Caleta Córdoba	Cañadón Biggs
Área (km ²)	585	67	12	462	349	6	65
Descarga (m ³ /seg)	244	28	5	193	146	2.5	27.2

Desarrollo de cárcavas

El efecto combinado de pendientes empinadas, vegetación escasa y gran disponibilidad de material superficial poco consolidado favorece el crecimiento y profundización de cárcavas durante eventos extremos de precipitaciones (Valentin et al. 2005, Thompson y Croke 2013). En el área estudiada tuvo lugar el desarrollo de cárcavas tanto dentro del área urbana como en las porciones medias y altas de las cuencas de drenaje. El análisis de varias de estas cárcavas en áreas urbanas y peri-urbanas revelaron una relación directa entre pendiente, profundidad a la que se encuentra el sustrato resistente (rocas sedimentarias del Mioceno) y cambios del uso del suelo sobre el desarrollo de las cárcavas (Paredes et al. 2017, Foix et al. 2017).

Grandes cárcavas emplazadas dentro de la ciudad (por ej. en los barrios Laprida y Km. 3) se desarrollaron sobre laderas cóncavas, tienen sección transversal con forma de U o V, profundidades de más de 6 m y centenares de metros de longitud. Debido a que sus márgenes laterales se degradaron rápidamente, las cárcavas aportaron grandes cantidades de sedimento tamaño arena (y cantidades inferiores al 20% en peso de limos y arcillas) a los arroyos durante la tormenta. El análisis de fotografías aéreas obtenidas desde 1970 reveló que numerosas cárcavas dentro de la ciudad fueron rellenadas durante el desarrollo urbano, y tanto caminos o viviendas se emplazaron sobre aquellas antiguas vías de drenaje (Fig. 6). En estos casos, los cambios en el uso del suelo y la falta de medidas de protección para evitar concentraciones del flujo durante las tormentas constituyeron los principales factores desencadenantes para la formación y crecimiento de las cárcavas.

Otras cárcavas formadas dentro del éjido urbano (por ej. barrio Laprida) fueron excavadas en bolsones de material coluvial ubicado al pie de las laderas. En este caso las cárcavas se desarrollaron en subcuencas muy pequeñas (< 1 km²) pero con laderas empinadas (de más de 20°), que rápidamente redujeron la pendiente a valores de alrededor de 5° hacia el pie de la ladera. Las laderas empinadas consisten en una alternancia de arcilitas y areniscas consolidadas de la Formación Chenque cubiertas por un paquete delgado (< 1 m de potencia) de sedimento Cuaternario regularmente cortado por canales rectos (efímeros) con sección transversal rectangular, mientras que en las partes bajas el coluvio supera los 7 m de potencia y está mayormente conformado por arenas muy finas a finas de ambiente fluvio-eólico. Durante la tormenta, la concentración de flujo favoreció la incisión del sustrato al pie de las laderas, que generó un rápido crecimiento hacia las cabecezas de las cárcavas hasta alcanzar el sustrato resistent-

te. El proceso de formación y crecimiento de estas cárcavas estuvo principalmente controlado por las pendientes de más de 20° de las laderas, y por la mayor profundidad del sustrato resistente al pie de las mismas, sumado a la intensidad de las

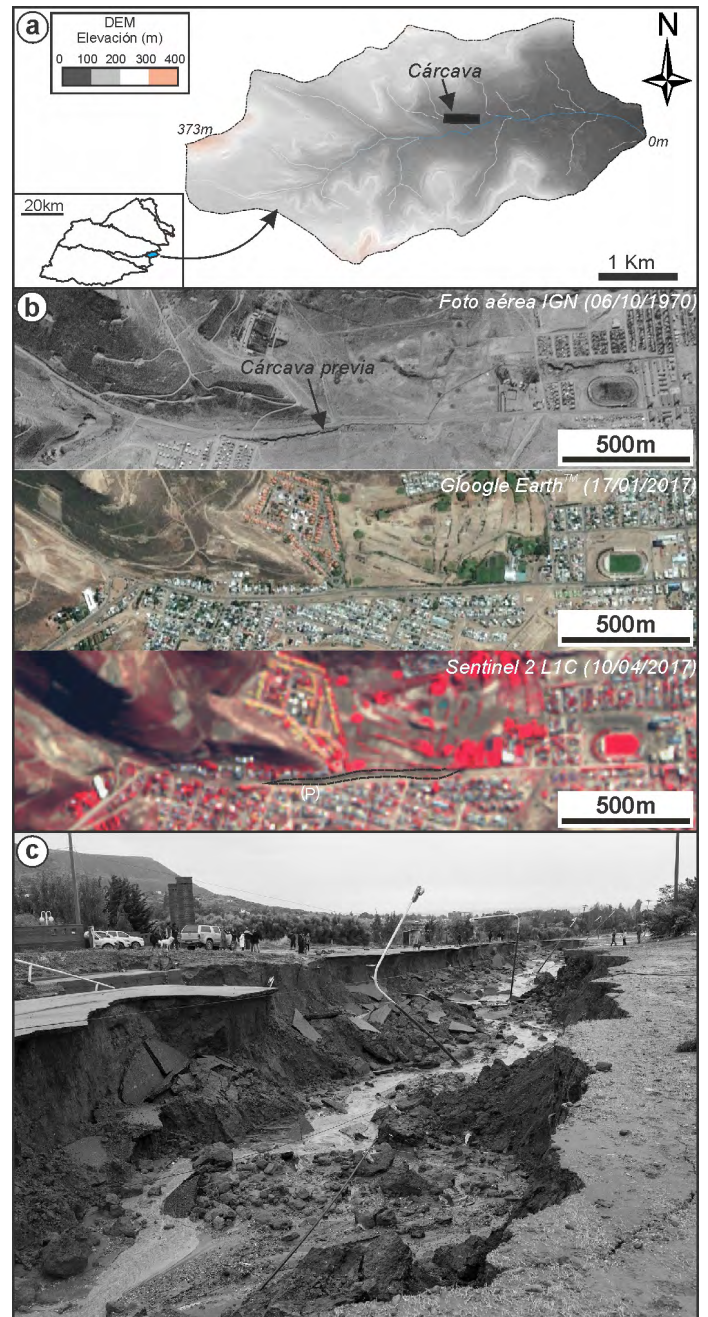


Figura 6. Cárcavas desarrolladas en áreas urbanas: a) Ubicación de cárcava dentro de la cuenca de Km. 3 utilizando el DEM ALOS PALSAR; b) Comparación de fotografías aéreas de 1970, con imagen satelital Google Earth™ previa a la tormenta (11/01/2017) y una imagen Sentinel 2 L1C obtenida luego del temporal de precipitaciones de 2017. En la imagen Sentinel, el área inundada en la cuenca de Km. 3 se muestra en color marrón y los límites de la cárcava se indican en línea punteada. La fotografía (Fig. 6c) se obtuvo desde el punto P; c) Vista aguas abajo del canal de la cárcava de más de 3 m de profundidad generada sobre la avenida Fray Luis Beltrán (Km. 3). Fotografía gentileza de David Muñoz.

lluvias. De acuerdo con comunicaciones verbales de residentes locales, las cárcavas se formaron en un período de pocas horas en la madrugada del 30 de marzo, durante el evento de mayor intensidad.

Adicionalmente, cárcavas de centenares de metros de longitud se formaron durante la tormenta en posiciones altas de la cuenca De La Quinta, que tiene una diferencia de altura de 633 m (Fig. 3) y que atraviesa la zona urbana con mayor densidad poblacional. La cárcava de mayores dimensiones observada en estas posiciones altas luego del evento estudiado presenta sección transversal en "V", supera los 15 m de profundidad y 870 m de longitud (Fig. 7). Basados en la comparación de imágenes satelitales, la cárcava se formó enteramente durante el evento extremo de 2017, y en base a las observaciones de campo se calculó que más de 80.000 m³ de sedimento arenoso se movilizaron aguas abajo desde esta única cárcava. La formación de cárcavas en las zonas altas de las cuencas de drenaje parece corresponder a un proceso único en el registro Cuaternario, ya que en estos sectores no se reconocieron evidencias geomorfológicas atribuibles a cárcavas previas (superficies erosivas antiguas delimitando cárcavas, diferencias en el tipo y densidad de vegetación en áreas cóncavas y elongadas, o depósitos sedimentarios que

puvieran atribuirse a removilización de materiales desde cárcavas). A partir de estas observaciones, consideramos que la capacidad erosiva de la tormenta no tiene precedentes dentro del área de estudio. El desarrollo generalizado de cárcavas dentro del área de estudio puede promover varios impactos negativos en el futuro cercano, como el descenso del nivel de flujo en los arroyos, y el incremento de la respuesta rápida del flujo durante las tormentas (Costa y de Almeida Prado Bacellar 2007), favoreciendo el incremento del transporte de material coluvial durante eventos de precipitación.

Ensanchamiento de canales

Los arroyos efímeros de zonas semiáridas generalmente reducen su descarga aguas abajo durante eventos de lluvia intensos (Tooth 2000). Sin embargo, y aunque no se cuenta con datos de variaciones espaciales en la intensidad de las lluvias, durante el evento extremo de precipitaciones de 2017 tanto la abundancia como la intensidad de la lluvia favorecieron la convergencia de flujo en la red de drenaje, y la descarga se incrementó aguas abajo. Los arroyos de mayor orden de las cuencas de drenaje se encuentran muy cerca del sustrato de la Formación Sarmiento en la parte norte del área de estudio (por ej. arroyo Belgrano y arroyo de Restinga Ali) y de

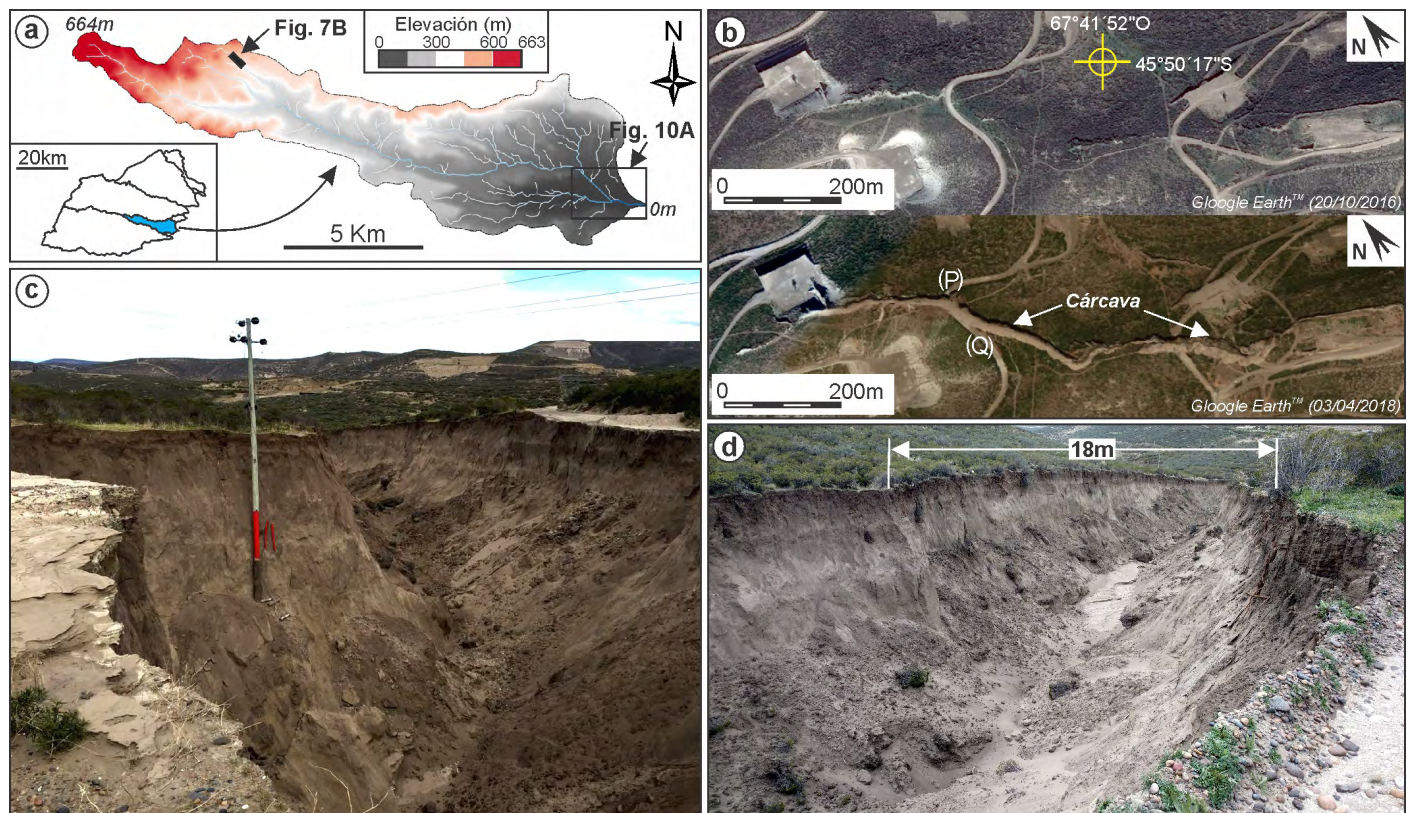


Figura 7. Cárcavas desarrolladas en la parte alta de las cuencas de drenaje: a) Modelo de elevación digital ALOS PALSAR con la ubicación de una cárcava de grandes dimensiones en la cuenca De La Quinta; b) Comparación de imágenes de Google Earth™ de antes (2016) y después (2018) del evento extremo de precipitaciones. De forma previa a la tormenta había escasas evidencias de erosión. La cárcava actualmente alcanza 870 m de largo; c-d) Fotografías de la cárcava obtenidas desde los puntos P y Q (Fig. 7b) mirando aguas abajo (hacia el sur-sureste). En c la profundidad de la cárcava excede los 10 metros.

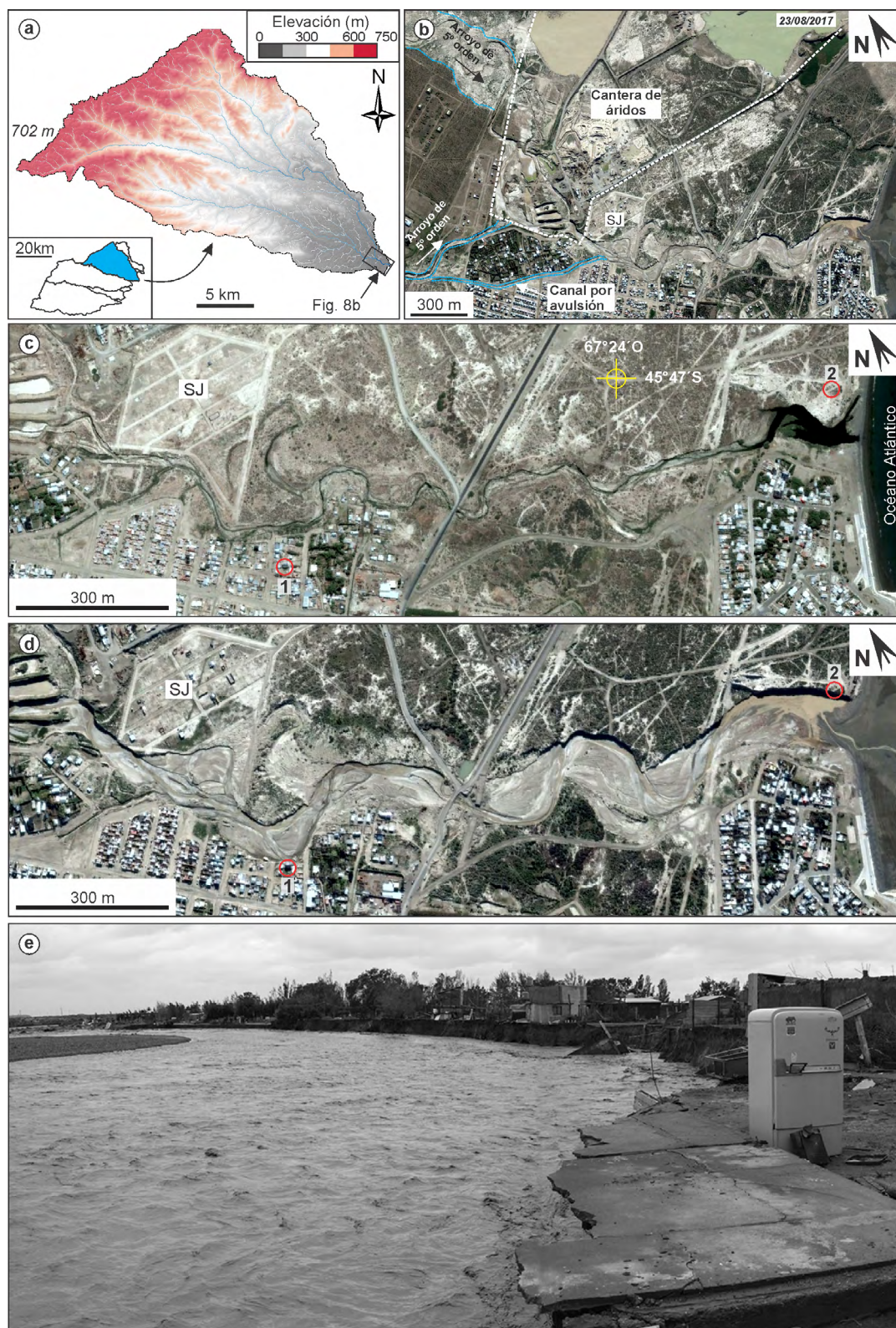


Figura 8. Ensanchamiento de cauces en el arroyo de Restinga Ali: a) Modelo de elevación digital ALOS PALSAR de la cuenca de Restinga Ali; b) Zona de confluencia de tributarios de 5° orden y desembocadura del arroyo de Restinga Ali. Se indican los límites de la cantera de áridos (emplazada sobre el arroyo) y la ubicación del emprendimiento habitacional San Jorge (SJ); c-d) Comparación de imágenes de Google Earth™ de antes y después del evento extremo de precipitaciones. El círculo rojo (indicado como 1) se encontraba ubicado a 71 m del margen sur del canal, y posteriormente a la tormenta quedó en el margen del canal activo. El círculo numerado como 2 muestra la rectificación de la desembocadura a través de la erosión de 72 m del margen norte del arroyo; e) Erosión del margen sur del canal de 6° orden, mostrando el impacto erosivo sobre viviendas emplazadas cerca del margen del canal. La fotografía está tomada desde el punto 1 mirando al este (aguas abajo). Fotografía gentileza de David Alejandro Muñoz.

la Formación Chenque (arroyo La Mata) al sur de Comodoro Rivadavia. Dentro de la ciudad, los arroyos están principalmente confinados a canales pluviales artificiales (a cielo abierto o subterráneos) y la mayor parte de la superficie urbana es impermeable, por lo que los canales están mayormente impe-

didos de incidir el sustrato. En este escenario, la respuesta de los canales de mayor orden durante el evento extremo ha estado asociado mayormente a agradación del sustrato, erosión de márgenes y ensanchamiento del canal activo en sectores desprotegidos, aunque localmente se produjo incisión.

Durante la tormenta, la competencia de los arroyos se incrementó, movilizándose bloques de hasta 80 cm como carga de fondo, y arenas finas a muy finas transportadas como carga en suspensión. El incremento de descarga de los cauces favoreció el incremento aguas abajo de la velocidad de flujo, que permitió el transporte eficiente de partículas tamaño canto rodado a guijarro derivados de caminos, locaciones petroleras, y localmente partículas obtenidas de canteras de áridos. El incremento simultáneo en la carga transportada y la velocidad de flujo condujo al incremento aguas abajo de la energía cinética del flujo, incrementando su capacidad erosiva. Las partículas de mayor tamaño y la vegetación incorporada al flujo produjeron un profundo impacto en la dinámica fluvial de los arroyos, bloqueando los cauces en las secciones más angostas, endicando los arroyos de forma temporaria y favoreciendo el desarrollo de macroturbulencias que, localmente, tuvieron la capacidad para movilizar vehículos, contenedores y toneladas de desechos urbanos o industriales (ver sección Inundación de áreas urbanas).

Tanto en el arroyo Belgrano como en el de Restinga Alí, el ensanchamiento de los canales estuvo mayormente asociado al colapso de los márgenes y retrabajo de sedimentos disponibles dentro del cauce, removilizados por flujos de alta velocidad. Cerca de la desembocadura, varias decenas de viviendas emplazadas dentro de la planicie proximal del arroyo de Restinga Alí fueron enteramente destruidas, incorporadas al flujo durante los momentos de mayor intensidad de la descarga debido al ensanchamiento del canal activo de más de 70 m (Fig. 8). La respuesta excepcional del canal de Restinga Alí se explica solamente de forma parcial por el evento de precipitaciones extremo. La presencia de una cantera de áridos que se encuentra aguas arriba de la confluencia entre dos tributarios de 5° orden y que fue afectada por la inundación (Fig. 8b) produjo un cambio importante en el diseño del canal y un significativo impacto en la urbanización ubicada aguas abajo. Aguas arriba del punto de confluencia ambos tributarios transportaban principalmente arenas de tamaño fino a muy fino (Paredes et al. 2017), pero en su ingreso a la cantera de áridos se produjo una súbita incorporación de grandes volúmenes de clastos volcánicos redondeados de tamaño grava con rango de tamaños entre 1 y 7 cm previamente removidos de los Rodados Patagónicos por los laboreos en la cantera, los que fueron incorporados al flujo. Esta adición, a su vez, produjo en la confluencia la depositación de la carga gruesa y rápida agradación del sustrato, favoreciendo el ensanchamiento del canal aguas abajo de la zona de confluencia (Frings 2008).

SEDIMENTOLOGÍA: RASGOS DEPOSITACIONALES

Adicionalmente al impacto erosivo del flujo acelerado en toda la red de drenaje, se depositaron grandes volúmenes de sedimento incluyendo áreas urbanas por desbordamiento de los cauces y mediante la inundación de subcuencas endorreicas, y en la forma de deltas en la desembocadura de los arroyos.

Flujos encauzados y no encauzados

Debido a la alta descarga líquida y de sedimentos, la mayoría de los arroyos fue incapaz de transportar el flujo de forma confinada, produciendo rápida agradación del lecho fluvial y procesos de desbordamiento que depositaron paquetes de hasta 2 m de potencia de arenas finas a muy finas en ambientes de planicie de inundación proximal.

Por un lado, los cauces de mayor orden desarrollaron un patrón entrelazado (Fig. 4a) y transportaron una mezcla de bloques y gravas derivados de las zonas altas de la red de drenaje como carga de fondo durante los momentos de mayor intensidad de la descarga, así como grandes volúmenes de arenas finas a muy finas transportadas en suspensión. Los cauces desarrollaron barras medias caracterizadas por una cabeza de barra dominada por depósitos de gravas con textura clasto sostén, en tanto que la cola de la barra está constituida por una proporción mayor de arenas medianas a finas (Fig. 9a). La fracción granular clástica de mayor tamaño, preservada como rellenos de fondo de canal o en la parte alta de las barras, comúnmente desarrollaron imbricación de clastos (Fig. 9b). Cordones transversales (McDonald y Banerjee 1971, Rust y Gostin 1981) fueron identificados en el relleno de canales (Fig. 9c), caracterizados por acumulaciones regulares de clastos imbricados dispuestos de forma transversal al flujo, con ejes a(t) y b(i) (Harms et al. 1975), y se formaron en condiciones de alto régimen de flujo. En varias localidades, las gravas con estratificación entrecruzada planar preservadas tanto en la parte más profunda de canales someros o en la parte alta de barras, contienen paquetes de decenas de centímetros de potencia con textura abierta (Fig. 9d) (Lunt y Bridge 2007).

Por otro lado, aunque los materiales transportados por desbordamiento durante la tormenta tienen alguna variación espacial en el tamaño, el evento extremo produjo sucesiones sedimentarias principalmente dominadas por arenas de grano fino a muy fino con estratos macizos, laminación paralela, y localmente laminación convoluta, comúnmente conteniendo numerosas superficies erosivas (Fig. 9f). Otras sucesiones de

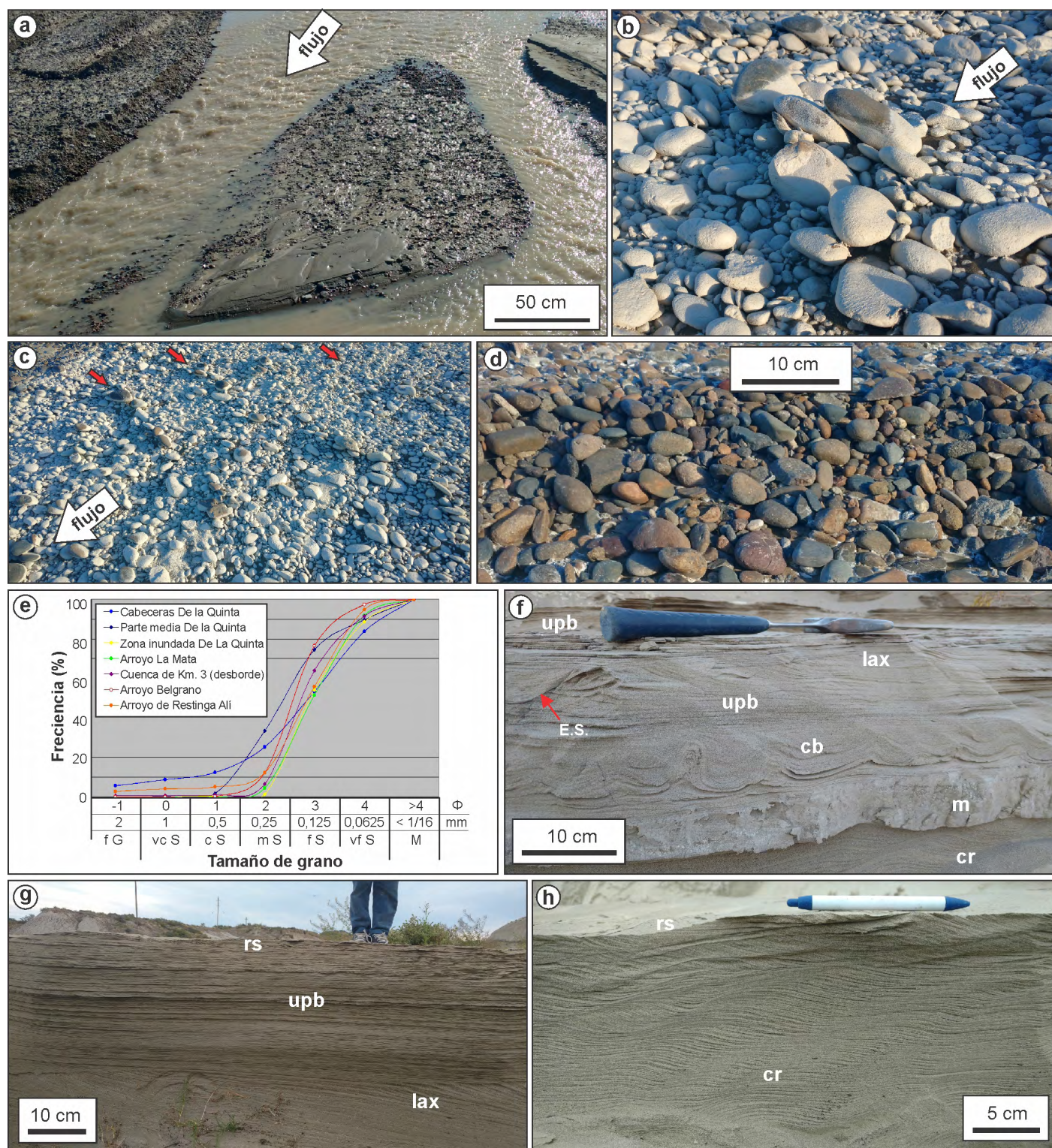


Figura 9. Rasgos sedimentológicos de depósitos de canal y desbordamiento: a) Barra central en un sector con diseño entrelazado, cerca de la desembocadura del arroyo Belgrano. Notar la presencia de clastos de mayor granulometría en la cabeza de la barra y de areniscas en la cola de la barra. La escala gráfica representa 50 centímetros; b) Gravas imbricadas en un arroyo de 4° orden dentro de la cuenca del arroyo Belgrano. El eje "a" del clasto de mayor tamaño es de 7 cm; c) Secuencia de tres cordones transversales (flechas rojas) en el relleno de fondo de canal de un arroyo de 4° orden del arroyo Belgrano. Las fechas están separadas entre sí por 55 cm; d) Estrato tabular de 20 cm de potencia de gravas con textura abierta en el tope de un relleno de fondo de canal del arroyo de Restinga Alí; e) Distribución de tamaño de grano de depósitos de desbordamiento; f) Sucesiones de facies preservadas en los márgenes del canal de 6° orden del arroyo Belgrano. Referencias: cr= ondulitas escalonadas, m= estrato macizo, cb= estratificación convoluta, upb= capa plana de alto régimen, lax= estratificación entrecruzada de bajo ángulo, E.S.= superficie erosiva; g) Sucesión de estratos arenosos con capa plana de alto régimen (upb) en el arroyo de Restinga Alí, aguas arriba de la cantera de áridos. Los estratos plano-paralelos están subyacidos por arenas con laminación entrecruzada de bajo ángulo (lax) y cubiertos por areniscas con ondulitas asimétricas (rs); h) Arenas con laminación ondulítica escalonada tipo B en el arroyo de Restinga Alí.

desbordamiento están dominadas por arenas de grano fino con laminación ondulítica escalante, o paquetes de arenas con laminación paralela (Fig. 9g-h). Las sucesiones como las arriba descritas son características de ríos efímeros (McKee et al. 1967, Tunbridge 1981, North y Taylor 1996). El tamaño dominante de los depósitos producidos por desbordamiento de los cauces es -3ϕ , con un contenido de arcillas y limos por debajo de 20% (Fig. 9e). Los valores obtenidos son comparables con los resultados granulométricos de sucesiones eólicas actuales dentro del área de estudio (Montes et al. 2015) y sugieren que la fuente principal de componentes clásticos incorporados al flujo durante la tormenta es de origen eólico.

Inundación de áreas urbanas

Uno de los impactos más dramáticos del evento extremo de precipitaciones fue la inundación de grandes áreas urbanas en las cuencas De la Quinta y en la subcuenca Laprida (en la cuenca del arroyo Belgrano). El elevado aporte de sedimentos, vegetación y desechos urbanos generó el taponamiento temprano del sistema de alcantarillado durante la tormenta, desencadenando procesos de avulsión sobre una superficie impermeable (asfalto-hormigón) que generó la inundación generalizada de las áreas bajas de la ciudad, en donde tuvo lugar reducción de velocidad de flujo y depositación adicional de la carga transportada en suspensión. Las áreas inundadas fueron impactadas severamente, con destrucción total o parcial de viviendas y contaminación del sistema de provisión de agua potable. Las calles, rutas, el sistema de electricidad, telefonía y el sistema cloacal fueron severamente impactados e interrumpidos. Adicionalmente, debido al tamaño de grano muy fino de los componentes depositados, al taponamiento del sistema de alcantarillados y de pluviales a cielo abierto, la escorrentía del agua y las tasas de infiltración fueron muy bajas e hicieron que sea muy complejo y lento el proceso de evacuación del agua y la limpieza de la ciudad, trabajo que demandó casi dos meses luego del final de la tormenta.

Dentro de la cuenca De La Quinta, en la zona Sur de la ciudad de Comodoro Rivadavia, una zona residencial de 2.65 km² se desarrolló desde la década de 1970 sobre una zona anteriormente salinizada (Griznik y Hirtz 2000, Hirtz y Griznik 2019). Esta sub-cuenca endorreica fue sepultada por más de 400000 m³ de arenas finas a muy finas, donde más de 400 viviendas fueron destruidas o dañadas (Fig. 10a). En las zonas más impactadas de la zona inundada se depositaron más de 2 m de arenas finas a muy finas (Fig. 10c-d), y la remoción del coluvio se completó en el mes de junio de 2017. Estimaciones previas de descarga en la cuenca De La Quinta para un evento de 1998 (Hirtz et al. 2000) indicaron valores

de 23.26 m³/s para un evento con una recurrencia de 25 años, mientras que la estimación para el evento de 2017 es de 28 m³/s. Pese a algunas diferencias en la descarga máxima que el sistema de pluviales a cielo abierto puede drenar durante las tormentas, el sistema de pluviales actuales de la cuenca De La Quinta (actualmente sobre la avenida Roca, Fig. 10b) puede evacuar solamente 5.3 m³/s, resultando notablemente subdimensionado.

Una situación similar ocurrió en el barrio Laprida, donde una combinación de pendiente muy alta y el emplazamiento del barrio en una depresión adyacente al arroyo principal favorecieron la agradación rápida durante la tormenta e inundación por desborde (Fig. 10e-f). El sistema de pluviales enterrados en Barrio Laprida colapsó debido al taponamiento de vegetación y sedimento acumulado en el ingreso al sistema subterráneo, produciendo el sepultamiento del barrio con más de 1,30 metros de sedimento arenoso (Fig. 10g-h).

Formación de deltas

El evento extremo de precipitaciones generó valores extraordinarios de descarga en el sistema de drenaje efímero, con desplazamiento aguas abajo de volúmenes importantes de sedimentos. Aunque parte del sedimento se depositó a lo largo de la red de canales o dentro del área urbana, un volumen importante de sedimento suspendido alcanzó la costa durante la tormenta. En la desembocadura, la pérdida de competencia del flujo permitió la depositación de arenas finas a muy finas en la forma de lóbulos de sedimento con diseño distributivo, los cuales durante la tormenta presumiblemente crecieron hasta 500 m desde la costa (Fig. 11). Las plumas de fango conteniendo altas concentraciones de carga exportaron partículas finas hacia el ambiente de plataforma, las que estuvieron sujetas a una dispersión regulada por las corrientes costeras y oceánicas. Los deltas, transitorios, permanecieron unas pocas semanas luego del temporal, siendo removilizado y distribuido el sedimento arenoso a lo largo de la costa debido a la acción de vientos intensos.

DISCUSIÓN: IMPACTO ANTROPOGÉNICO Y NATURAL

A escala global, menos del 17% de la superficie continental se puede considerar sin impacto humano directo (Meibek 2003), siendo los sistemas fluviales uno de los ecosistemas más impactados en Argentina (Serra 2004, Latrubesse y Brea 2010). Actualmente, los sistemas fluviales se pueden analizar tanto en términos de su importancia como un recurso que



Figura 10. Inundaciones urbanas: a) Imagen Sentinel 2 de parte de la cuenca De La Quinta (composición de las bandas 12-8-2) dentro del área urbana (ubicación en figura 7a). Los colores verdes a oscuros reflejan zonas de alto contenido de humedad. El área definida por las avenidas Roca, Chile y Lisandro de la Torre fueron inundadas con más de 2 m de arena debido a ineficiencia del pluvial de la avenida Roca, principal colector del agua que ingresa a la ciudad; b) Fotografía de la Avenida Roca obtenida el 30 de marzo de 2017 (mirando aguas arriba) con el agua de lluvia movilizándose principalmente por la calle (fotografía de David Alejandro Muñoz); c) Vehículos y sedimento transportado durante el temporal fueron depositados en depresiones endorreicas de la cuenca De La Quinta. Fotografía de D.A.: Muñoz obtenida el 04 de abril de 2017; d) Remoción del sedimento depositado en la ciudad. Fotografía tomada el 16 de abril de 2017; e) Ubicación de la subcuenca Laprida en relación a la cuenca del arroyo Belgrano; f) Área urbana del barrio Laprida afectada por las inundaciones, y principales vías de evaluación del agua de lluvia. Se indica la posición de la figura 10 g-h; g) Cancha de fútbol ubicada en el acceso oeste del barrio Laprida, con más de 150 cm de arena fina; h) Sepultamiento de viviendas y vehículos en barrio Laprida. Fotografías obtenidas el 8 de abril de 2017.

puede ser potencialmente explotado, o como un riesgo potencial que debe ser controlado para evitar perjuicios a la sociedad (Lundqvist y Falkenmark 2000). Entre los numerosos cambios inducidos por el hombre en las cuencas de drenaje se pueden mencionar (i) el uso del suelo, (ii) minería, transformación industrial y producción de energía, (iii) urbanización, (iv) construcción de reservorios, (v) irrigación, (vi) control de la morfología del río y las características del sustrato (Meibek 2003). En el último siglo, los sistemas efímeros analizados en

esta contribución han sido profundamente modificados por el desarrollo urbano y por actividades industriales (por ej. producción de hidrocarburos). Entre los impactos más evidentes dentro del área de estudio, la reducción de la cobertura de vegetación nativa y suelos se menciona como de primer orden, que conjuntamente con el gradiente alto de las laderas, se consideran como las principales causales de la elevada producción de sedimentos tamaño arena depositados dentro de los cauces durante las tormentas. Tanto el crecimiento ur-



Figura 11. Deltas formados en la desembocadura de los arroyos efímeros durante el temporal. La imagen se obtuvo el día 10 de abril de 2017 con el sensor Sentinel-2 LC1. Ubicación de los arroyos en figura 2. a) Arroyo La Mata; b) Arroyo Belgrano; c) Arroyo de Restinga Alí; d) Desembocadura del arroyo De La Quinta.

bano como las actividades industriales dentro de la red de drenaje han producido pérdida de vegetación nativa e incremento de la superficie impermeable, con valores entre 12 % (cuenca del arroyo La Mata) y 37 % (cuenca de Km. 3). La actividad hidrocarburífera dentro de las cuencas de drenaje ha producido el emplazamiento de más de 7000 locaciones petroleras desde el descubrimiento de los hidrocarburos en el año 1907, con caminos e instalaciones de conducción conectándolos. El desarrollo continuo de los yacimientos ha producido un gran número de nuevas rutas de sedimento y grandes áreas propensas a ser erosionadas por procesos de deflación eólica y fluvial, incrementando la disponibilidad de sedimento durante las tormentas. Estudios teóricos han mostrado que un incremento de la magnitud y frecuencia de eventos de alta descarga líquida (climáticamente controladas) en intervalos de tiempo relativamente largos (varias décadas), induce cambios marcados en la cantidad de sedimento aportado durante eventos de descarga de un tamaño dado, resultando en modificaciones en la relación entre descarga líquida y aporte se-

dimentario (Couthard et al. 2008). Aunque estas condiciones parecen ocurrir actualmente, la falta de estaciones de monitoreo de descarga en las cuencas de drenaje analizadas impide evaluar sistemáticamente esta aseveración a escala local.

Además, el crecimiento espasmódico de la población de Comodoro Rivadavia ha estado muy asociado a los niveles de actividad industrial, principalmente el precio internacional del petróleo (Cabral Marques 2019). La inmigración desde otras áreas del país, así como de países limítrofes, comúnmente deriva en emplazamientos precarios de viviendas en áreas con riesgo de inundación, generando una ocupación espontánea y desordenada del territorio (Baeza y Chanampa 2016). Aunque fuera del objeto de esta contribución, tanto las observaciones de campo como la revisión histórica de fotografías aéreas (Paredes et al. 2017: Fig. 21) sugieren que la urbanización de áreas planas o en cuencas endorreicas se ha incrementado en las últimas décadas. La falta de programas de poblamiento territorial efectivos por los entes gubernamentales locales ha generado que un gran número de habitantes

de la ciudad estén actualmente viviendo en áreas proclives a ser inundadas (subcuencas endorreicas, Fig. 10a) o se encuentren directamente emplazados dentro de la faja de canales activa (Fig. 8c-d), revelando un crecimiento urbano poco planificado, o estrategias de control poco eficientes ante ocupaciones espontáneas (Fig. 12). Este es probablemente el escenario más peligroso que ha experimentado la ciudad en sus más de 100 años de crecimiento, como ha sido puntualizado en Paredes (2019). Un control gubernamental efectivo tanto del desarrollo urbano como de las actividades industriales en el ámbito peri-urbano es fundamental para evitar futuras catástrofes como las descritas en esta contribución.

Es por ello que, dada la falta de una gestión integral de las cuencas de drenaje y lo limitado de las políticas de uso

del suelo en la zona urbana y peri-urbana, se hace indispensable la formulación de dos tipos de obras estructurales: por un lado, la construcción de reservorios de sedimento o presas pequeñas interpuestas al flujo en la zona peri-urbana, que retengan parte del sedimento transportado durante las lluvias, y reduzcan tanto la velocidad del flujo como la descarga máxima de los arroyos al ingreso de la ciudad. Por otro lado, se requiere un redimensionamiento de los pluviales a cielo abierto y la construcción de drenajes adicionales en bajos sin salida, así como la generación de estudios científicos actualizados en relación al uso de pluviales entubados, ya que su utilidad en el evento extremo de 2017 ha sido nula. Este tipo de obras de ingeniería no nos exime de intentar mejorar nuestro entorno natural promoviendo el desarrollo de políticas



Figura 12. Asentamientos espontáneos sobre el arroyo De La Quinta dentro del éjido urbano: a) Imagen de Google Earth TM posterior al temporal, mostrando el impacto de la profundización del arroyo sobre las viviendas y población ubicada en los márgenes del cauce; b) Vista hacia el este del arroyo De La Quinta desde el punto R. Fotografía obtenida el 4 de julio de 2017

de poblamiento urbano que respeten la geomorfología fluvial, así como prácticas responsables del uso del suelo en la zona urbana y peri-urbana.

CONCLUSIONES

Un evento extremo de precipitaciones que totalizó 399.4 mm tuvo lugar entre el 29 de marzo y el 8 de abril de 2017 en la región costera del golfo San Jorge, en la Patagonia central. La persistencia e intensidad de las lluvias favoreció el desarrollo de inundaciones repentinas en siete cuencas efímeras y sin monitoreo de descarga, que desembocan en el océano Atlántico cruzando la ciudad de Comodoro Rivadavia. El impacto sedimentológico y geomorfológico del evento extremo de 2017 fue evaluado, y las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

1) Debido a las altas pendientes, a la alta intensidad y volumen de la escorrentía superficial y al carácter disperso de la vegetación en las cuencas de drenaje, durante la tormenta se generaron un gran número de cárcavas con forma de V, algunas alcanzando 870 m de largo y hasta 15 m de profundidad.

2) Los procesos de erosión en manto y flujos no encauzados fueron los responsables de la provisión de grandes volúmenes de arenas (mayormente de grano fino a muy fino) removilizados aguas abajo desde las cárcavas. Materiales de granulometría anómala incorporados al flujo a partir de fuentes puntuales como locaciones petroleras, caminos y canteras de áridos, incrementaron la capacidad erosiva del flujo.

3) Los procesos de convergencia de flujo en canales de mayor orden (5° y 6°) generaron agradación del sustrato, desconfiamiento del flujo y ensanchamiento de los canales en áreas próximas a la desembocadura, mientras que en sectores donde el sustrato se encontraba desprotegido se produjeron cárcavas dentro del área urbana. Los depósitos sedimentarios generaron sucesiones dominadas por estructuras sedimentarias generadas en condiciones de alto régimen de flujo.

4) El taponamiento de los pluviales artificiales con sedimento, vegetación y desechos urbanos provocaron la inundación de grandes áreas planas dentro de la ciudad.

5) En varias subcuencas endorreicas en las que no existían evidencias de acción fluvial (Zona Sur de la ciudad, barrio Laprida) se depositaron arenas de grano fino a muy fino (-3ϕ) y cantidades menores de limos y arcillas, impactando severamente a la infraestructura urbana y los servicios urbanos. Áreas urbanas de más de 2.65 km² en la Zona Sur de la ciudad fueron cubiertas por espesores máximos de 2 m de sedimento areno-limoso.

6) En las áreas urbanas más afectadas, las estimaciones de descarga sugieren que el sistema de descargas pluviales a cielo abierto solo es capaz de evacuar el 20 % de la descarga de la cuenca de drenaje durante eventos extremos.

7) El aporte de sedimentos generado durante la tormenta a la zona costera generó formas deltaicas transitorias de más de 500 m de ancho. Estos cuerpos lobulados crecieron enteramente durante el temporal y fueron completamente re-trabajados por corrientes costeras y mareas pocas semanas después del final de la tormenta.

8) Para mitigar el impacto de futuros eventos de precipitación se requiere la gestión (y construcción) de reservorios en la zona peri-urbana, y el redimensionamiento de los pluviales a cielo abierto dentro del área urbana.

9) El evento extremo de precipitaciones produjo severos daños a la infraestructura urbana e industrial, revelando falta de planeamiento a escala de cuenca de drenaje. Para reducir el riesgo de los habitantes y mayor degradación del entorno natural, tanto el desarrollo urbano como industrial deben respetar la geomorfología fluvial, minimizando la erosión de suelo nativo y la iniciación de cárcavas, a través de la implementación de prácticas más responsables de uso del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNPSJB a través del PI CIUNPAT 1433 (2018-2020). Los autores agradecen a la empresa TERMAP S.A. y a la Facultad de Ingeniería (UNPSJB) por la provisión de los datos de sus estaciones meteorológicas. Se agradece al Servicio Meteorológico Nacional, que brindó la información histórica de precipitaciones de la Estación Comodoro Rivadavia en el aeropuerto local. Los autores agradecen las detalladas y criteriosas revisiones realizadas por los árbitros de la revista, Dr. Nelso Cesar Doffo y un revisor anónimo, así como comentarios editoriales de la Editora Alfonsina Tripaldi, que ayudaron a darle foco y claridad a la versión previa del manuscrito.

REFERENCIAS

- Allan, J.D. 2004. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35: 257-284.
- Archer, D.R. y Fowler, H.J. 2015. Characterizing flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain. *Journal of Flood Risk Management* 11: S121-133.
- Baeza, B. y Chanampa, M. 2016. La naturalización de las problemáticas medioambientales en torno a la explotación petrolera en Comodoro Rivadavia. *Identidades, Dossier* 3, 6: 7-31.

- Belletti, B., Durfour, S. y Piégay, H. 2014. Regional assessment of the multi-decadal changes in braided riverscapes following large floods (example of 12 reaches in South East of France). *Advances in Geosciences* 37: 57-71.
- Bellosi, E.S. 1990. Formación Chenque: Registro de la transgresión patagónica en el Golfo San Jorge. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 57-60, San Juan.
- Bellosi, E.S. 1995. Paleogeografía y cambios ambientales de la Patagonia Central durante el Terciario Medio. *Boletín de Informaciones Petroleras* 44: 50-83.
- Bellosi E.S. y Jalfin, G. 1996. Sedimentación en la planicie costera Santacrucense-Superpatagónica (Mioceno Inferior-Medio, Cuenca San Jorge). 6° Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 181-186, Bahía Blanca.
- Benvenuti, M., Camicelli, S., Ferrar, G. y Sagri, M. 2005. Depositional processes in latest Pleistocene and Holocene ephemeral streams of the Main Ethiopian Rift (Ethiopia). En: Blum, M.D., Marriott, S.B. y Leclair, S.F. (eds.), *Fluvial Sedimentology VII*. International Association of Sedimentologists, Special Publication 35: 277-294.
- Billi, P. 2007. Morphology and sediment dynamics of ephemeral stream terminal distributary systems in the Kobo Basin (northern Welo, Ethiopia). *Geomorphology* 85: 98-113.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F. y Jakob, M. 2014. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology* 518: 194-205.
- Bridge, J.S. 2003. *Rivers and Floodplains: Forms, Processes and Sedimentary Record*. Blackwell, 1-491, Oxford.
- Buraas, E.M., Renshaw, C.E., Magilligan, F.J. y Dade, W.B. 2014. Impact of reach geometry on stream channel sensitivity to extreme floods. *Earth Surface Processes and Landforms* 39: 1778-1789.
- Burgers, H.E., Schipper, A.M. y Hendriks, A.J. 2014. Size relationships of water discharge in rivers: scaling of discharge with catchment area, mainstem length and precipitation. *Hydrological Processes* 28: 5769-5775.
- Cabral Marques, D. 2019. Comodoro Rivadavia: una ciudad de reciente integración urbana, de construcción compleja y con dificultades para pensarse/diseñarse a sí misma. En: Paredes, J.M. (Compilador) *Comodoro Rivadavia y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo*. Editorial Universitaria de la Patagonia, 104-118, Comodoro Rivadavia.
- Césari, O. y Simeoni, A. 1994. Planicies fluvio-glaciares terrazadas y bajos eólicos de la Patagonia Central, Argentina. 13° Symposium Latin-American Geosciences, *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie* 1: 155-164.
- Chow, V.T. 1959. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Co., 680 p., New York.
- Costa, A.M. y de Almeida Prado Bacellar, L. 2007. Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, southeastern Brazil. *Catena* 69: 230-238.
- Coulthard, T.J., Lewin, J. y Macklin, M.G. 2008. Non-stationarity of basin scale sediment delivery in response to climate change. En: Habersack, H., Piégay, H. y Rinaldi, M. (eds.), *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration Developments in Earth Surface Processes* 11. Elsevier, 525-556, Amsterdam.
- Cuitiño, J.I., Scasso, R., Ventura Santos, R. y 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: 3-12.
- Ergen, K. y Kentel, E. 2016. An integrated map correlation method and multiple-source sites drainage-area ratio method for estimating streamflows at ungauged catchments: A case study of the Western Black Sea Region, Turkey. *Journal of Environmental Management* 166: 309-320.
- Galster, J.C., Pazzaglia, F.J., Hargreaves, B.R., Morris, D.P., Peters, S.C. y Weisman, R.N. 2006. Effects of urbanization on watershed hydrology: The scaling of discharge with drainage area. *Geology* 34: 713-716.
- Foix, N., Allard, J.O., Paredes, J.M. y Ocampo, S.M. 2017. Descarga acuosa extraordinaria de sistemas fluviales efímeros y daños urbanos asociados: tormenta 2017 en Comodoro Rivadavia. V Jornadas de las Ciencias de la Tierra Dr. Eduardo Musacchio, EDUPA, 40-42, Comodoro Rivadavia.
- Folk, R.L. 1980. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphills, 182 p., Austin.
- Frings, R.M. 2008. Downstream fining in large sand-bed rivers. *Earth-Science Reviews* 87: 39-60.
- Georgakakos, K.P., Unnikrishna, P.V., Bravo, H.R. y 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.
- Graf, W.L. 1988. *Fluvial Processes in Dryland Rivers*. Springer, 346 p., New York.
- Griznik, M. y Hirtz, N.R. 2000. Salinización en el Ejido Urbano de la ciudad de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. Evaluación y Propuesta de Saneamiento. Primer Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas, ALSHUD-AIH, Res.P. 313, Fortaleza-Ceará.
- Groisman, P.Y., Knight, R.W., Easterling, D.R., Karl, T.R., Hegerl, G.C. y Razuvaev, V.N. 2005. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate* 18: 1326-1350.
- Grove, J.R., Croke, J. y Thompson, C. 2013. Quantifying different riverbank erosion processes during an extreme flood event. *Earth Surface Processes and Landforms* 38: 1393-1406.
- Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. y Sancho, C. 1998. Geomorphological and sedimentological analysis of a catastrophic flash flood in the Arás drainage basin (central Pyrenees, Spain). *Geomorphology* 22: 265-283.
- Harms, J.C., Southards, J.B. y Walker, R.G. 1975. Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences. SEPM Short Course No. 2, 161 p., Tulsa.

- Hauer, C. y Habersack, H. 2009. Morphodynamics of a 1000-year flood in the Kamp River, Austria, and impacts on floodplain morphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 654-682.
- Henderson, F.M. 1966. *Open Channel Flow*. Prentice Hall, 522 p., New Jersey.
- Hernández, M.A., González, N. y Hernández, L. 2017. Hydrogeology of a Large Oil-and-Gas Basin in Central Patagonia. San Jorge Gulf Basin, Argentina. *Springer Briefs in Latin American Studies*, Springer, 1-95, New York.
- Hirtz, N.R. y Grizinik, M. 2019. El bajo anegadizo del suroeste de la ciudad: su evolución desde la salinización a la inundación de marzo-abril de 2017. En: Paredes J.M. (Compilador), Comodoro Rivadavia y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo. Editorial Universitaria de la Patagonia, 49-59, Comodoro Rivadavia.
- Hirtz, N.R., Grizinik, M. y Blachakis, A. 2000. Evaluación geohidrológica aplicada al desarrollo urbano de la ciudad de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. Primer Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas, ALSHUD-AIH, Res.P. 316, Fortaleza-Ceará.
- Hooke, R.L. 2000. On the history of humans as geomorphic agents. *Geology* 28: 843-846.
- Hooke, J.M. 2015. Variations in flood magnitude–effect relations and the implications for flood risk assessment and river management. *Geomorphology* 263: 19-38.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America, Bulletin* 5: 275-370.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) 2007. *Cambio climático 2007: informe de síntesis*. Ginebra: IPCC.
- Kirpich, Z.P. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering* 10(6): 362.
- Krapesch, G., Hauer, C. y Habersack, H. 2011. Scale orientated analysis of river width changes due to extreme flood hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 2137-2147.
- Krumbein, W.C. y Sloss, L.L. 1963. *Stratigraphy and Sedimentation*, 2nd Edition, W.H. Freeman and Company, 660 p., San Francisco.
- Latrubesse, E.M. y Brea, D. 2010. Floods in Argentina. En: Latrubesse, E.M. (ed.), *Geomorphology of Natural Hazards and Human Exacerbated Disasters in Latin America*. Elsevier, 333-349, Amsterdam.
- Li, Q., Peng, Y., Wang, G., Wang, H., Xue, B. y Hu, X. 2019. A combined method for estimating continuous runoff. by parameter transfer and drainage area ratio method in ungauged catchments. *Water* 11 (5): 1104.
- Lundqvist, J. y Falkenmark, M. 2000. Towards hydrosolidarity. Focus on the upstream-downstream conflicts of interests. *Water International* 25: 168-319.
- Lunt, I.A. y Bridge, J.S. 2007. Formation and preservation of open-framework gravel strata in unidirectional flows. *Sedimentology* 54: 71-87.
- Manning, R. 1891. On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institute of Civil Engineers of Ireland* 20: 161-207.
- 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: 336-345.
- McDonald, B.C. y Banerjee, I. 1971. Sedimentation and bedforms on a braided outwash plain. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 1282-1301.
- McKee, E.D., Crosby, E.J. y Berryhill, H.L. 1967. Flood deposits, Bijou Creek, Colorado, June 1965. *Journal of Sedimentary Petrology* 37: 829-851.
- Meybeck, M. 2003. Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes. *Phil. Trans. Roy. Society of London* 358: 1935-1955.
- Miall, A.D. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits*. Springer, 582 p., Berlín.
- Montes, A., Rodríguez, S.S., San Martín, C. y Allard, J.O. 2015. Migración de campos de dunas en cañadones costeros de Patagonia. *Geomorfología e implicaciones paleoclimáticas*. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 28: 65-76.
- Montes, A., Rodríguez, S.S. y Domínguez, C.E. 2017. Geomorphology context and characterization of dunefields developed by the southern westerlies at drying Colhué Huapi shallow lake, Patagonia, Argentina. *Aeolian Research* 28: 58-70.
- Natalini, B. y Natalini, M.B. 2013. Revisión de velocidades de viento extremas en tres localidades del sur de Argentina. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* 13 (2): 235-248.
- North, C.P. y Taylor, K.S. 1996. Ephemeral-Fluvial Deposits: Integrated Outcrop and Simulation Studies Reveal Complexity. *AAPG Bulletin* 80: 811-830.
- Ortega, J.A. y Heydt, G.G. 2009. Geomorphological and sedimentological analysis of flash-flood deposits. The case of the 1997 Rivillas flood (Spain). *Geomorphology* 112: 1-14.
- Paredes, J.M. 2019. (Compilador) Comodoro Rivadavia y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo. Editorial Universitaria de la Patagonia, 307 p., Comodoro Rivadavia.
- 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., Ocampo, S.M., Foix, N., Olazábal, S.X., Fernández, M.A., Montes, A., Castro, I., Maza, W., Allard, J.O., Rodríguez, S.S., San Martín, C., Simeoni, A., Mendos, G., Quagliano, J.A., Turra, J.M., Maino, J., Sánchez, F. y Valle, M.N. 2017. Sistemas fluviales efímeros e inundaciones repentinas de la ciudad de Comodoro Rivadavia: causas, procesos y mitigaciones. Informe Técnico FCNyCS. UNPSJB, 1-44, Comodoro Rivadavia.
- Paruelo, J.M., Aguiar, M.R., Golluscio, R.A. y León, R.J.C. 1992. La patagonia extraandina: análisis de la estructura y funcionamiento de la vegetación a distintas escalas. *Ecología Austral* 2: 123-136.

- Patton, P.C. 1988. Drainage basin morphometry and floods. En: Baker, V.R., Kochel, R.C. y Patton, P.C. (eds.), *Flood Geomorphology*. Wiley, 51-64, New York.
- Patton, P.C. y Baker, V.R. 1976. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research* 12: 941-952.
- Powell, D.M., Reid, I. y Laronne, J.B. 2001. Evolution of bed load grain size distribution with increasing strength and the effect of flow duration on the caliber of bed load sediment yield in ephemeral gravel bed rivers. *Water Resources Research* 37: 1463-1474.
- Reid, I. y Frostick, L.E. 1986. Dynamics of bedload transport in Turkey Brook, a coarse-grained alluvial channel. *Earth Surface Processes and Landforms* 11: 143-155.
- Reid, I. y Frostick, L.E. 2011. Channel form, flows and sediments of endogenous ephemeral rivers in deserts. En: Thomas, D.G. (ed.), *Arid zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands*. Wiley-Blackwell, 301-332, Chichester.
- Righini, M., Surian, N., Wohl, E., Marchi, L., Comiti, F., Amponsah, W. y Borga, M. 2017. Geomorphic response to an extreme flood in two Mediterranean rivers (northeastern Sardinia, Italy): analysis of controlling factors. *Geomorphology* 290: 184-199.
- Rind, D., Goldberg, R. y Ruedy, R. 1989. Change in climate variability in the 21st century. *Climatic Change* 14: 537.
- Royer, T.V. 2016. Human-Dominated Rivers and River Management in the Anthropocene. En: Jones, J.B. y Stanley, E.H. (eds.) *Stream Ecosystems in a Changing Environment*. Elsevier, 491-523, Amsterdam.
- Rust, D.M. y Gostin, V.A. 1981. Fossil transverse ribs in Holocene alluvial fan deposits, Depot Creek, South Australia. *Journal of Sedimentary Petrology* 51: 441-444.
- Schumm, S.A. 2005. *River Variability and Complexity*. Cambridge University Press, 220 p., Cambridge.
- Sciutto, J.C., Césari, O. e Iantanos, N. 2008. Hoja geológica 4569-IV Escalante, escala 1:250000: Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, Secretaría de Minería de la Nación, Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 351, 76 p., Buenos Aires.
- Scorpio, V., Crema, S., Marra, F., Roghini, M., Ciccacese, G., Borga, M., Cavalli, M., Corsini, A., Marchi, L., Surian, N. y Comiti, F. 2018. Basin-scale analysis of the geomorphic effectiveness of flash floods: a study in the northern Apennines (Italy). *Science of the Total Environment* 640-641: 337-351.
- Serra, J.J. 2004. Urbanización e inundaciones en sistemas hídricos del centro de la región patagónica. En: Bertoni, J.C. (Organizador), *Inundaciones Urbanas en Argentina*, 155-195, ed. GWP-SAMTAC, Córdoba, Argentina.
- Sloan, J., Miller, J.R. y Lancaster, N. 2001. Response and recovery of the Eel River, California, and its tributaries to floods in 1955, 1964 and 1997. *Geomorphology* 36: 129-154.
- Strahler, A.N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En: Chen, V.T. (ed.), *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 40-74, New York.
- Syvitski, J.P.M. y Saito, Y. 2007. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change* 57: 261-282.
- Syvitski, J.P.M., Peckham, S.D., Hilberman, R.D. y Mulder, T. 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology* 162: 5-24.
- Thompson, C. y Croke, J. 2013. Geomorphic effects, flood power, and channel competence of a catastrophic flood in confined and unconfined reaches of the upper Lockyer valley, southeast Queensland, Australia. *Geomorphology* 197: 156-169.
- Thorne, C.R. 1998. *Stream Reconnaissance Handbook*. John Wiley and Sons, 133 p., Chichester.
- Tooth, S. 2000. Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research. *Earth-Science Reviews* 51: 67-107.
- Tunbridge, I.P. 1981. Sandy high-energy flood sedimentation - some criteria for recognition, with an example from the Devonian of SW England. *Sedimentary Geology* 28: 79-95.
- Valentin, C., Poesen, J. y Li, Y. 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena* 63: 132-153.