

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN/SEDIMENTACIÓN EN EL SISTEMA HIDROLÓGICO DEL A° LUDUEÑA

Pedro A. Basile^{(1),(3)}, Gerardo A. Riccardi^{(2),(3)}, Hernán Stenta^{(1),(3)} y Marina García^{(1),(3)}

⁽¹⁾CONICET, ⁽²⁾CIUNR, ⁽³⁾CURIHAM-FCEIA-UNR

Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina - Telefax: 0341 4808541

E-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar - Web: <http://www.fceia.unr.edu.ar/curiham>

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el balance de sedimentos a escala temporal anual en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña, considerando la erosión en la situación actual y el riesgo de erosión potencial. El balance realizado simulando numéricamente ambos escenarios ha permitido establecer el orden de magnitud de los procesos de sedimentación a largo plazo que se observan en algunos sectores de la cuenca, especialmente en la zona de la presa de retención de crecidas y en la zona del entubamiento cercana a la desembocadura en el río Paraná. La producción de sedimentos en la cuenca es debida sustancialmente a la erosión superficial, mientras que la contribución debida a la erosión lineal puede ser prácticamente despreciada. Las estimaciones de erosión efectuadas han mostrado una mayor producción de sedimentos en las zonas de las cabeceras respecto a la producción en las zonas próximas a la salida de la cuenca. Para los dos escenarios simulados la capacidad de almacenamiento de la presa de retención de crecidas no se ve sustancialmente afectada debido al proceso de sedimentación a largo plazo. En cambio, el sistema de conductos puede experimentar un severo proceso de sedimentación.

ABSTRACT

Herein the sediment budget at annual time scale for the Ludueña Creek watershed is presented. The sediment budget was performed by considering the assessment of current soil erosion losses as well as the assessment of potential soil erosion risk in the hydrological system. For both simulated scenarios it was possible to estimate the order of magnitude of sedimentation processes in different areas of the basin. Particularly, in the area of the existing flood retention dam and in the zone of the conduits close to the outlet of Ludueña Creek in the Paraná River. Sediment yield in the basin is mainly due to surface soil erosion, while the contribution of linear erosion can be neglected. The soil erosion assessment has shown that the sediment yield from the upper part of the basin is greater than the corresponding sediment yield in the lower part. For both scenarios (current soil erosion and potential soil erosion risk) the storage capacity of the flood retention dam is not affected by the sedimentation processes. Instead, the system of conduits can be subjected to a severe sedimentation processes.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de erosión debido al flujo hídrico se pueden dividir en procesos de erosión superficial (o erosión en láminas) y en procesos de erosión lineal (o erosión canalizada). Tal distinción se relaciona con la conocida división que se hace en Hidrología entre el flujo superficial mantiforme sobre el terreno y el flujo encauzado. Mientras el flujo mantiforme es responsable de la erosión superficial, extendida sobre toda la superficie de la cuenca; el flujo encauzado es responsable de la erosión lineal del lecho y de las márgenes a lo largo de los cursos de agua (Basile, 2004a).

La erosión superficial se produce por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo (no adecuadamente protegido por vegetación) que origina el desmenuzamiento o disgregación de las partículas, las cuales son posteriormente transportadas por el flujo mantiforme hasta que se depositan en alguna depresión del terreno o alcanzan la red hidrográfica. La erosión lineal se

vincula con la tensión de corte sobre el fondo que ejerce el flujo hídrico encauzado y con las características sedimentológicas del cauce. Además, la erosión del fondo y del pié de margen (entre otros factores) pueden dar lugar a procesos de colapsos masivos debido a inestabilidad geotécnica de las márgenes (Basile, 2005).

Consecuentemente, la erosión hídrica superficial, además de inducir una disminución de productividad de los suelos cultivables, produce un aumento de sedimentos en suspensión en los cursos de agua. Por otro lado, parte de los sedimentos producidos por erosión superficial y lineal están destinados a depositarse en embalses, cauces, planicies de inundación, etc.. Asimismo, los sedimentos finos erosionados y transportados pueden adsorber sustancias contaminantes (metales pesados, hidrocarburos poliaromáticos, pesticidas, etc.) convirtiendo las vías de drenaje y las zonas de deposición en reservorios de sedimentos contaminados (Basile *et al.*, 2005).

El objetivo principal del presente trabajo es realizar el balance de sedimentos medio anual en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña, a los efectos de establecer el orden de magnitud de los procesos de erosión superficial a nivel de cuenca, redistribución interna, erosión de lecho, erosión de márgenes, sedimentación a largo plazo en la presa de retención de crecidas, sedimentación en la zona del entubamiento e ingresos de sedimentos al río Paraná.

ÁREA DE ESTUDIO

Descripción del Sistema Hidrológico del A° Ludueña

La cuenca del A° Ludueña se encuentra ubicada en el sur de la provincia de Santa Fe (Argentina) y comprende parte de la ciudad de Rosario y un grupo de 8 poblaciones (ver Figura 1). Su red de cursos permanentes y transitorios tiene una longitud de aproximadamente 120 km y se desarrolla sobre cauces de suelos cohesivos altamente resistentes a la erosión inducida por el flujo encauzado. El área de la cuenca es de 717 km², con una pendiente media de 1 ‰. La sección de control corresponde al cruce del arroyo con el puente de la Av. de Circunvalación de la ciudad de Rosario. El caudal medio anual es de 2,7 m³/s, habiéndose observado caudales picos del orden de los 400 m³/s durante la crecida del año 1986. Además, la cuenca presenta una serie de intervenciones antrópicas tales como terraplenes de rutas y ferrocarriles, alcantarillas, puentes, presa de retención de crecidas, etc. La cuenca del A° Ludueña propiamente dicho se desarrolla casi enteramente al sur de la Ruta Nacional N° 9 (RN9). Mientras que, al norte de dicha ruta se desarrolla el sistema formado por el canal Ibarlucea y el canal Salvat. La presa de retención de crecidas se ubica aproximadamente 1 km aguas arriba de la intersección del A° Ludueña con la RN9. El área de aporte que delimita el cierre de la presa es de 440 km² aproximadamente. En inmediaciones del cruce del A° Ludueña con la Av. de Circunvalación de Rosario (6 km aguas abajo de la intersección con la RN9) el arroyo recibe el aporte de la cuenca del canal Ibarlucea (sistema formado por el canal Ibarlucea y el canal Salvat) cuya área de aporte es de aproximadamente 240 km². Aguas abajo de la Av. de Circunvalación el A° Ludueña recorre zonas densamente pobladas de la ciudad de Rosario hasta desembocar en el río Paraná. En parte de este recorrido urbano el arroyo se encuentra entubado.

Problemática Asociada a la Producción de Sedimentos en la Cuenca del A° Ludueña

Los sedimentos erosionados en la cuenca, además de degradar la potencialidad productiva de los suelos, contribuyen con los procesos de sedimentación que se verifican en las zonas de la presa de retención de crecidas y en las zonas de los entubamientos del arroyo Ludueña en la ciudad de Rosario. En efecto, parte de los sedimentos generados en la cuenca del A° Ludueña propiamente dicho son retenidos por la presa y contribuyen con el proceso de sedimentación a largo plazo del vaso de la misma. Hasta el presente no se han realizado evaluaciones del aporte sólido, ni relevamientos de cantidad y calidad de los sedimentos retenidos en la presa.

Por otra parte, los sedimentos que logran pasar a través de las estructuras de descarga de la presa y los sedimentos generados en el sector de la cuenca comprendido entre la presa y la Av. Circunvalación se suman a los sedimentos producidos por la cuenca del canal Ibarlucea. Dicha carga sólida ingresa a la zona de los entubamientos del A° Ludueña en la ciudad de Rosario, localizados aproximadamente 2 km aguas arriba de la desembocadura en el río Paraná. Esta última zona funciona como una suerte de embalse, espontáneamente regulado por las fluctuaciones de niveles hidrométricos del río Paraná, lo cual induce la deposición de una parte de los sedimentos que ingresan, mientras que, la parte restante se descarga en el río Paraná. En esta zona la única información disponible se refiere a mediciones y estimaciones globales del volumen de sedimentos depositados en un período de aproximadamente 8 años (Saucedo y Scuderi, 2003). Esta información, si bien escasa, es muy importante para validar el modelo de erosión a nivel de cuenca y establecer el orden de magnitud del proceso de sedimentación a largo plazo que se está desarrollando en la presa de retención de crecidas y en el sistema de conductos.

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN LINEAL

Erosión del Lecho

A los fines de evaluar el aporte correspondiente a los procesos de erosión debido al flujo encauzado se utilizó información topobatimétrica, hidrológica y de características sedimentológicas del cauce en diferentes secciones transversales del arroyo. Se analizó principalmente la evolución temporal del cauce en un tramo de aproximadamente 1 km de longitud ubicado entre la presa de retención de crecidas y la RN9. El material constitutivo del cauce es una asociación de limos y arcillas (> 95%). En su gran mayoría se trata de suelos tipificados como ML y CL, con baja plasticidad (IP = 8% a 10%), con concentración de calcáreos y consistencia firme. El ángulo de fricción interna varía entre 15° y 30°, mientras que la cohesión varía entre 39 kPa y 88 kPa.

De la comparación efectuada entre las secciones transversales relevadas al final del período de análisis (1995) y las correspondientes al inicio (1987) se observa que las mismas son prácticamente idénticas, es decir, se han mantenido estables sin sustanciales alteraciones. Tratándose de suelos fuertemente cohesivos puede aseverarse que las secciones transversales no han sufrido procesos erosivos significativos que pudieran haber sido compensados con procesos de sedimentación durante dicho período. Por lo tanto, se utilizó la información hidrológica para deducir indirectamente los parámetros de los predictores de erosión en suelos

cohesivos de Fuerza tractiva, Rossinsky y Lischtvan-Lebedieb (Riccardi *et al.*, 2005).

Conocidos los caudales máximos que transitaron por el tramo y conocida la erosión producida mediante los relevamientos de la sección transversal antes y después del tránsito de caudales fue posible deducir los parámetros de las formulaciones de predicción de erosión del lecho. El período de tiempo considerado fue de 9 años y consistió en una serie temporal, de 1986 a 1995, en la cual la serie de caudales fue reconstruida mediante transformación lluvia-caudal, contando con la serie completa de lluvias y series parciales de alturas y caudales. Debido al desborde que se produce para caudales máximos superiores a los $70 \text{ m}^3/\text{s}$ - $80 \text{ m}^3/\text{s}$ la reconstrucción de los perfiles de flujo se realizó utilizando un modelo cuasi-bidimensional (Riccardi, 2000).

El ajuste de los predictores de erosión se planificó de modo tal de lograr que la sucesión de caudales máximos estimados produjeran sucesivas erosiones que culminaban en la erosión final observada. Al constatarse que no hubo un proceso de erosión generalizado se procedió a ajustar los predictores de modo tal que al paso de la mayor crecida registrada durante el período (caudal máximo $Q_{\text{máx}} = 176 \text{ m}^3/\text{s}$) se produjera la erosión observada (nula en la mayoría de las secciones).

En la Tabla 1 se presentan los resultados del ajuste de los predictores de erosión mencionados anteriormente para cada una de las secciones transversales analizadas. En el caso de fuerza tractiva la tensión admisible máxima soportada fue de $35,9 \text{ N/m}^2$. La aplicación del predictor de erosión de Rossinsky determinó un valor de la velocidad máxima sin erosión para la profundidad $h=1 \text{ m}$ de $1,54 \text{ m/s}$. En el caso de la formulación de Lischtvan-Lebediev el coeficiente C_{LL} máximo es $0,91$. Cabe destacar que el valor máximo no significa necesariamente que si se superan las velocidades deducidas a partir de estos parámetros se produzca erosión. El valor hallado indica que, aún en situación de máximo caudal circulante por la sección, en los 9 años no se ha producido una erosión generalizada en el tramo ni tampoco indicios de erosión incipiente del lecho. Tal comportamiento es similar al observado en otras secciones localizadas en diversas zonas de la cuenca del A° Ludueña.

Erosión de Márgenes debido a Mecanismo de Colapso Masivo

La información topobatimétrica analizada tampoco puso en evidencia procesos de colapsos masivos de márgenes. Por lo tanto, a los efectos de analizar el grado de estabilidad de las márgenes se utilizó el modelo derivado por Basile (2005) a partir de la modificación del modelo de Osman y Thorne (1988).

En la Tabla 2 se presentan las características topográficas y geotécnicas de las márgenes para cada una de las secciones transversales estudiadas. El modelo se aplicó considerando cuatro situaciones típicas que se plantean durante el tránsito de la onda de crecida en el tramo considerado:

- Situación I : profundidad en la sección $h = 0$ y margen seca,
- Situación II : profundidad en la sección $h = 0,5 Z_0$ y margen parcialmente saturada,
- Situación III: profundidad en la sección $h = Z_0$ y margen saturada,
- Situación IV: profundidad en la sección $h = 0$ y margen saturada.

La situación I se corresponde con la fase inicial, antes que comience la fase de crecimiento de caudales. En este caso la presión de confinamiento que ejerce el curso es nula y se asume, además, que la margen en esta situación se encuentra seca. La situación II se corresponde con una condición intermedia entre la fase inicial de crecimiento de caudales y el pico del hidrograma. La situación III puede presentarse durante el tránsito del caudal pico, es decir, cuando la presión de confinamiento es máxima y la margen se encuentra saturada. Mientras que, la situación IV se observa cuando la crecida ya ha transitado por la sección. En esta última situación la presión de confinamiento ejercida por la profundidad del agua en el curso es totalmente sustraída y la margen permanece todavía saturada por la alimentación previa del curso y de la eventual lluvia local.

En la Tabla 3 se exponen los valores calculados del factor de seguridad, en función de las distintas situaciones planteadas y para cada una de las secciones transversales analizadas. Se observa que, en todos los casos, el mismo es mucho mayor que la unidad, lo cual evidencia que las mismas son sumamente estables. Esto es debido sustancialmente a los valores extremadamente elevados que presenta la cohesión del material que constituye las márgenes. El factor de seguridad muestra un aumento progresivo, alcanzando el valor máximo en la situación III y descendiendo posteriormente a su valor mínimo en la situación IV.

En la Tabla 4 se presentan los valores calculados del Factor de seguridad para cada una de las secciones transversales, en función de ángulos hipotéticos de margen y considerando la situación IV, es decir, la situación más desfavorable para la estabilidad de la margen. Se observa que, aún en esta situación, las márgenes resultan estables inclusive para ángulos de 90°.

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN SUPERFICIAL

A los efectos de evaluar la erosión superficial se utilizó el modelo EROSUP-U (Basile, 2004b; Basile *et al.*, 2005) basado en la ecuación universal de pérdida de suelos (EUPS), la cual resulta apropiada para estimar la erosión superficial media anual a largo plazo, es decir, integrada o promediada en un período de 10 o más años (Wischmeier *et al.*, 1978).

Cabe señalar que la EUPS es una ecuación empírica, que estima exclusivamente la producción de sedimentos por erosión superficial, es decir, no contempla los procesos de erosión del flujo encauzado (erosión de lecho y márgenes) ni obviamente procesos de remoción en masa (deslizamientos, flujos de detritos, flujos de barro, etc.). Estos últimos es imposible que se verifiquen en la cuenca del A° Ludueña ya que se trata de un sistema hidrológico de llanura. Por otra parte, el aporte correspondiente a los procesos de erosión debido al flujo encauzado puede considerarse despreciable, tal como surge del análisis realizado precedentemente.

A los fines del análisis de los procesos de erosión superficial la cuenca fue dividida en 28 subcuencas (ver Figura 2). La mayoría de las subcuencas se dividieron a su vez en sub-subcuencas. En el trazado de las subcuencas se adoptó el criterio de materializar unidades homogéneas desde el punto de vista geomorfológico e hidrológico.

Para implementar el modelo se utilizó información pluviográfica de la estación Rosario

Aeropuerto y pluviométrica de la Estación Zavalla, correspondientes al período 1986-1998. La erosionabilidad del suelo se determinó utilizando datos sobre las características texturales de los suelos de la cuenca, derivados de cartas de suelos del INTA. En la Tabla 5 se presentan las características texturales y el contenido de materia orgánica de cada una de las series de suelos básicas presentes en la cuenca. Los parámetros geomorfológicos para cada subcuenca se determinaron a partir de información digitalizada de curvas de nivel con equidistancia de 2,5 m, red de cursos permanentes y temporarios en CAD.

Los valores promedios del factor asociado a la cobertura vegetal (C) se determinaron en función de datos de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) utilizando la relación propuesta por Van de Knijff *et al.* (1999). Las imágenes satelitales fueron procesadas en mapas de Índice Diferencia Normalizada de Vegetación mediante rutinas internas de IDRISI (Zimmermann, 2002).

Para caracterizar las diversas prácticas de manejo y para estimar la erosión superficial actual se especificó un valor promedio del factor de prácticas conservacionistas (P) igual a 0,6 para cada subcuenca. Mientras que, para estimar el riesgo de erosión superficial potencial el mismo se especificó igual a la unidad.

RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS. BALANCE SÓLIDO MEDIO ANUAL

En la Tabla 6 se presentan los valores de producción bruta y producción neta de sedimentos para cada subcuenca, estimados considerando la erosión actual y el riesgo de erosión potencial (C=1 y P=1). De acuerdo a la clasificación de Wischmeier *et al.* (1978) los valores estimados de erosión actual para cada subcuenca son bajos (valores de A menores que 448 (T/km²/año)). Sin embargo, es necesario señalar que se trata de valores medios anuales a largo plazo y además valores medios areales. Por otra parte, utilizando la misma clasificación, los valores estimados considerando el riesgo de erosión potencial resultan altos (valores de A mayores que 1121 (T/km²/año)). En ambos casos se observa una producción bruta específica de sedimentos ligeramente menor en la zona baja de la cuenca respecto a la producción en la zona media y alta.

Balance Sólido Medio Anual Considerando Erosión Actual

En la Figura 3 se presenta el balance medio anual de sedimentos en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña, considerando el proceso de erosión actual. La cuenca del A° Ludueña propiamente dicho con cierre en la presa de retención de crecidas presenta una producción bruta de 81560 T/año, una deposición interna de 63640 T/año y un ingreso de sedimentos a la presa de 17920 T/año. La eficiencia de retención de sedimentos media a largo plazo de la presa, estimada en función del método de Churchill, es de 25 % aproximadamente (pasa el 75 %). Por lo tanto, en la presa se estima una sedimentación media anual a largo plazo de 4480 T/año. Realizando un pronóstico de sedimentación, considerando según Lane y Koelzer embalse normalmente vacío y sedimento en ingreso con una composición de 50 % de arcilla, 47 % de limo y 3 % de arena fina, se obtiene una pérdida de volumen de aproximadamente 0,35 Hm³ al cabo de 100 años.

Por otra parte, el 75 % del sedimento que pasa a través de la presa representa una erogación de 13440 T/año. Suponiendo una lámina de escurrimiento medio anual de 120 mm, distribuida uniformemente en la cuenca, se obtiene una concentración media anual a largo plazo de 255 ppm inmediatamente aguas abajo de la presa. La cuenca del canal Ibarlucea contribuye con una producción neta de 11760 T/año, mientras que, la generada en el sector comprendido entre la presa y la Av. Circunvalación es de 460 T/año. Por lo tanto, la cantidad de sedimentos que ingresa al sistema de conductos es de 25660 T/año. Suponiendo la misma lámina de escurrimiento mencionada más arriba, la correspondiente concentración de sedimentos media anual a largo plazo que ingresa al sistema de conductos es de 298 ppm.

La eficiencia de retención de sedimentos media en el sistema de conductos, estimada en función del método de Churchill, es de aproximadamente 20% (pasa el 80%). Por lo tanto, se estima una sedimentación media anual a largo plazo de 5130 T/año. La sedimentación observada en un período de 8 años es de aproximadamente 30500 m³. Adoptando, según Lane y Koelzer, embalse con normalmente considerables descensos de nivel y composición de sedimento igual a la mencionada anteriormente, se obtiene una deposición media observada para el período de 4380 T/año, es decir, aproximadamente el 85% del valor estimado mediante el modelo. El ingreso de sedimentos al río Paraná es de 20530 T/año.

Balance Sólido Medio Anual Considerando Riesgo de Erosión Potencial

En la Figura 4 se presenta el balance medio anual de sedimentos en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña, considerando el riesgo de erosión potencial (C=1, P=1). La producción neta de sedimentos que ingresa a la presa es de 251100 T/año. En este caso, asumiendo que la presa tiene la eficiencia de retención de sedimentos media a largo plazo mencionada anteriormente, se estima una deposición de sedimentos media anual a largo plazo de 62780 T/año. Realizando un pronóstico de sedimentación, bajo las mismas hipótesis señaladas más arriba, se obtiene una pérdida de volumen de aproximadamente 4,9 Hm³ al cabo de 100 años. El volumen del embalse correspondiente a la cota de 30 m IGM es de 71,32 Hm³. Consecuentemente se observa que, aún en este caso de aporte sólido extraordinario, la capacidad de almacenamiento no se vería significativamente disminuida ya que la pérdida de capacidad sería aproximadamente igual al 7 % del volumen correspondiente a la cota 30 m IGM (la cota de coronamiento es 32,5 m IGM).

La salida de sedimentos de la presa es de 188320 T/año. Suponiendo una lámina de escurrimiento medio anual de 120 mm, distribuida uniformemente en la cuenca, se obtiene una concentración media anual a largo plazo de 3580 ppm inmediatamente aguas abajo de la presa. La cuenca del canal Ibarlucea contribuye con una producción neta de 176700 T/año, mientras que, la generada en el sector comprendido entre la presa y la Av. Circunvalación es de 38530 T/año. Por lo tanto, la cantidad de sedimentos que ingresa al sistema de conductos es de 403550 T/año. Suponiendo la misma lámina de escurrimiento mencionada más arriba, la correspondiente concentración de sedimentos media anual a largo plazo que ingresa al sistema de conductos es de 4690 ppm, es decir, casi 16 veces mayor que la estimada en el caso de erosión actual. Por lo tanto, en este caso, en el sistema de conductos la situación es crítica pues, si bien podría alcanzarse un cierto equilibrio, la deposición de 80710 T/año sería de todos modos excesiva. El ingreso de sedimentos al río Paraná es de 322840 T/año.

CONCLUSIONES

Con referencia a los procesos de erosión lineal, debido al flujo encauzado, el tramo estudiado no muestra procesos de erosión generalizada de lecho ni colapsos masivos de márgenes, tal como surge de la comparación de los relevamientos topobatimétricos realizados entre los años 1987 y 1995. Esto indica que los valores derivados de tensión de corte sobre el lecho y velocidades no necesariamente son umbrales máximos de resistencia sino que existe la probabilidad de que sean superados.

En lo que respecta a los predictores de erosión de lecho (Fuerza Tractiva y Rossinsky) si bien los valores derivados se encuentran dentro de los rangos establecidos en la literatura, puede afirmarse que son, en general, superiores a los que se fijan para limos arcillosos de baja plasticidad. Efectivamente, para arcillas pesadas muy compactas el valor límite máximo de tensión de corte es de 33 N/m^2 (Chow, 1994). Por otro lado, para suelos limo-arcillosos compactos la velocidad sin erosión para $h=1 \text{ m}$ recomendada es de $1,20 \text{ m/s}$ (Rossinsky et al., 1950).

En relación a la erosión de márgenes por colapso masivo, los factores de seguridad calculados para las distintas situaciones consideradas son mucho mayores que la unidad. Esto indica que las mismas son sumamente estables, debido sustancialmente a los elevados valores de la cohesión. En efecto, aún en la situación más desfavorable desde el punto de vista de la estabilidad (situación IV: margen saturada y presión de confinamiento nula) las márgenes pueden adoptar ángulos hipotéticos inclusive de 90° y continuar estables, con valores mínimos del factor de seguridad entorno a 2 (sección transversal S23) y un valor máximo de 9,2 (margen derecha de la sección transversal S21).

La producción de sedimentos media anual a largo plazo en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña se relaciona principalmente con el proceso de erosión superficial. Se evaluó el proceso de erosión superficial actual como así también el riesgo de erosión superficial potencial. Se realizaron los balances de sedimentos para ambos escenarios, los cuales permitieron establecer el orden de magnitud relativo de los procesos de sedimentación a largo plazo que experimentan la presa de retención de crecidas y el entubamiento del arroyo en la ciudad de Rosario, estimándose además el correspondiente ingreso de sedimentos al río Paraná.

En los dos escenarios simulados (erosión actual y potencial) la capacidad de almacenamiento de la presa de retención de crecidas no se ve sustancialmente afectada por el proceso de sedimentación a largo plazo. Sin embargo, el sistema de conductos puede experimentar un severo proceso de sedimentación, razón por la cual deberían adoptarse medidas para la gestión y control de sedimentos en el área de estudio.

Agradecimiento. El presente trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos PID ING95 de la UNR, y PIP 5308 del CONICET. Nuestro agradecimiento a todas las instituciones que han colaborado con el apoyo financiero y/o logístico.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i :	producción bruta específica de sedimentos de la i -ésima subcuenca
A'_i :	producción bruta de sedimentos de la i -ésima subcuenca
c :	cohesión del suelo del lecho y márgenes
C_{LL} :	coeficiente en formulación de Lischtvan-Lebediev
F_s :	factor de seguridad al colapso masivo de margen
F_i :	área de la i -ésima subcuenca
MI:	margen izquierda
MD:	margen derecha
MO:	contenido de materia orgánica en suelos de la cuenca
p :	porosidad del suelo de margen
SY_i :	producción neta específica de sedimentos de la i -ésima subcuenca
SY'_i :	producción neta de sedimentos de la i -ésima subcuenca
$U_{e\ h=1\ m}$:	velocidad no erosiva para profundidad de flujo $h = 1\ m$
Z_0 :	altura de la margen
α :	ángulo de la margen respecto a la horizontal
γ_{sat} :	peso específico saturado del suelo de margen
ϕ :	ángulo de fricción interna del suelo de margen
τ_{adm} :	tensión de corte admisible sobre el lecho

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Basile, P.A. (2004a). *Geomorfología e Hidráulica Fluvial*. Capítulo 1: “El Sistema Fluvial”, ICD-0303, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA-UNR.

Basile, P.A. (2004b). “Modelo Matemático para Pronóstico de Erosión Superficial Media Anual a Escala de Cuenca: EROSUP-U”. Informe técnico interno ICI-0104, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA-UNR.

Basile, P.A. (2005). “Modelación de la Erosión de Márgenes por Mecanismo de Colapso Masivo Asociado a Falla Plana”. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza. Libro de resúmenes y CD-ROM. ISBN 987-22143-0-1.

Basile, P.A.; Riccardi, G.A. y Stenta, H. (2005). “Modelación de la Producción de Sedimentos a Escala de Cuenca en el Sistema del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina”. XX Congr. Nacional del Agua, Mendoza. Libro de resúmenes y CD-ROM. ISBN 987-22143-0-1.

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de los Canales Abiertos*. McGraw-Hill Interamericana, Colombia.

Osman, A.M. y Thorne, C.R. (1988). “Riverbank Stability Analysis. I: Theory”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, pp. 134-150.

Riccardi, G.A. (2000). “Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes Rurales y Urbanos”. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina. Tomo II, pp.159-168.

Riccardi, G.A.; Basile, P.A.; Stenta, H.; Riesco, G. y Baglietto, P. (2005). “Ajuste Regional de Predictores de Erosión en Lechos Cohesivos”. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza. Libro de resúmenes y CD-ROM. ISBN 987-22143-0-1.

Rossinsky, K. I. y Kuz'min, I. (1950). Vnutrennie Tcheniya Rechhykh Potokov [Corrientes Internas en Ríos]. En *Gidrologicheskie osnovy rechnoi gidrotekhniki*, Akademii Nauk SSSR, Moscú.

Saucedo, I. y Scuderi, C. (2003). “Limpieza del conducto Aliviador 2 y de la platea de desembocadura – A° Ludueña”. Proyecto Final Carrera de Ingeniería Civil, FCEIA, UNR. Tomos I y II.

Van der Knijff, J. M.; Jones, R.J.A. y Montanarella, L. (1999). “Soil Erosion Risk Assessment in Italy”. European Soil Bureau. Joint Research Center of the European Commission.

Wischmeier, W. H. y Smith, D.D. (1978). “Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide for Conservation Planning”. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 537.

Zimmermann, E. (2002). “Informe Anual Carrera de Investigador Científico – CONICET”. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA, UNR.

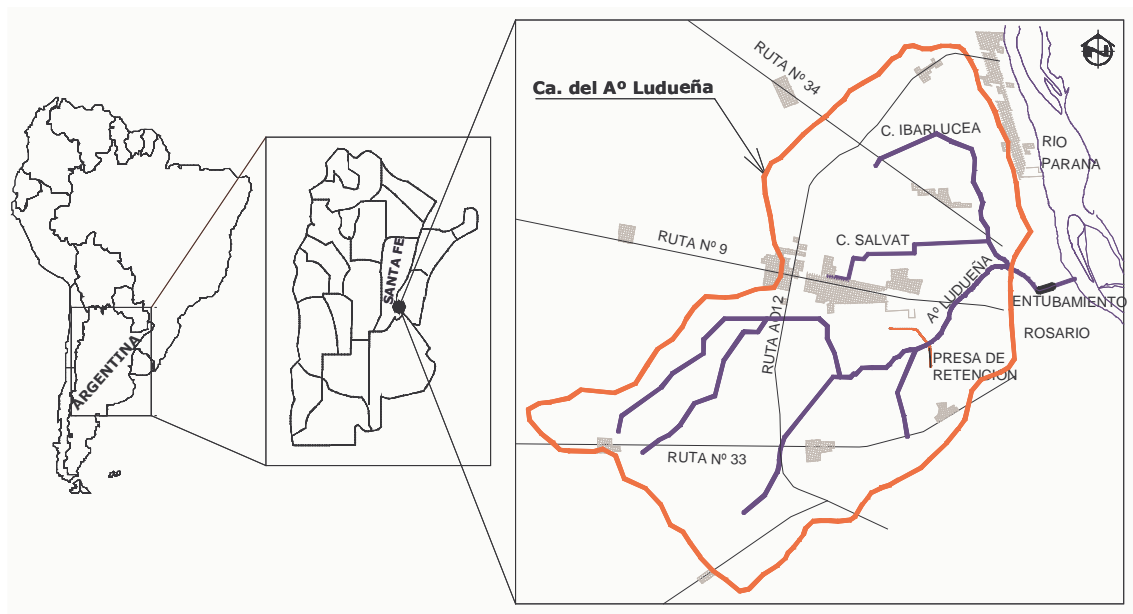


Figura 1.- Sistema Hidrológico del Arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina.



Figura 2.- Delimitación de subcuencas y sub-subcuencas en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña.

Tabla 1.- Resultados de ajuste de predictores de erosión del lecho.

Predictor	Sección Transversal							Valores		
	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	Mín.	Med.	Máx.
Fuerza Tractiva τ_{adm} (Pa)	35,5	25,3	26,7	28,6	35,9	23,9	22,9	22,9	28,4	35,9
Rossinsky $Ue_{h=1m}$ (m/s)	1,54	1,28	1,33	1,40	1,52	1,24	1,24	1,24	1,37	1,54
Lischvan-Lebediev C_{LL}	0,91	0,76	0,78	0,82	0,90	0,73	0,73	0,80	0,91	0,73

Tabla 2.- Características topográficas y geotécnicas de las márgenes.

Sección transversal		Z _o (m)	α (°)	c (kPa)	φ (°)	γ _{sat} (kN/m ³)	p (-)
S17	MI	2,52	26,8	57,8	26,0	17,6	0,502
	MD	2,07	27,4	57,8	26,0	17,6	0,502
S18	MI	2,41	50,3	49,0	22,4	18,1	0,475
	MD	1,90	43,5	49,0	22,4	18,1	0,475
S19	MI	1,44	35,8	35,3	27,3	18,4	0,451
	MD	1,83	42,5	35,3	27,3	18,4	0,451
S20	MI	2,18	36,0	30,4	28,7	18,7	0,431
	MD	2,38	30,8	30,4	28,7	18,7	0,431
S21	MI	2,61	27,6	73,5	25,4	16,8	0,553
	MD	2,12	46,7	73,5	25,4	16,8	0,553
S22	MI	2,89	32,2	82,3	24,2	18,3	0,457
	MD	2,50	39,8	82,3	24,2	18,3	0,457
S23	MI	2,49	31,9	21,6	26,4	17,7	0,498
	MD	2,67	33,7	21,6	26,4	17,7	0,498

Tabla 3.- Factor de seguridad en función de las distintas situaciones planteadas.

Sección transversal		Factor de seguridad (F _s)			
		I	II	III	IV
S17	MI	525,0	536,9	932,9	378,3
	MD	369,2	375,8	645,2	265,9
S18	MI	16,8	17,1	28,8	12,3
	MD	27,1	27,7	46,1	20,0
S19	MI	53,5	55,4	93,6	40,5
	MD	25,2	26,1	44,5	19,0
S20	MI	33,9	35,9	63,0	26,0
	MD	99,9	106,8	191,4	77,1
S21	MI	267,9	266,6	466,5	181,4
	MD	41,2	40,7	69,8	27,8
S22	MI	67,3	69,2	115,6	50,6
	MD	42,9	44,0	72,8	32,3
S23	MI	31,4	33,1	62,2	22,5
	MD	22,7	23,9	45,2	16,2

Tabla 4.- Factor de seguridad en función de ángulos hipotéticos de margen, considerando situación IV.

Sección transversal		Factor de seguridad (Situación IV)					
		α=35°	α=40°	α=45°	α=60°	α=75°	α=90°
S17	MI	37,8	25,5	19,4	11,5	8,0	5,9
	MD	45,9	31,0	23,6	13,9	9,7	7,1
S18	MI	24,8	18,5	14,9	9,4	6,6	4,9
	MD	31,4	23,4	18,8	11,8	8,4	6,2
S19	MI	44,3	28,2	21,0	12,0	8,3	6,1
	MD	34,9	22,3	16,6	9,5	6,5	4,8
S20	MI	29,8	17,5	12,7	7,0	4,8	3,5
	MD	27,3	16,1	11,6	6,4	4,4	3,2
S21	MI	45,9	31,6	24,3	14,5	10,1	7,5
	MD	56,4	38,8	29,9	17,9	12,5	9,2
S22	MI	38,7	27,6	21,7	13,2	9,3	6,9
	MD	44,6	31,9	25,0	15,3	10,7	8,0
S23	MI	15,0	10,0	7,6	4,5	3,1	2,3
	MD	14,0	9,3	7,1	4,2	2,9	2,1

Tabla 5.- Características texturales de las series básicas de suelos en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña.

Serie	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo (%)	MO (%)
Monte Flores (MF)	54,6	2,6	40,8	2,0
Gelly (Ge)	41,3	4,6	51,1	3,0
Zavalla (Za)	55,6	2,0	40,4	2,0
Peyrano (Py)	49,6	4,3	43,1	3,0
Roldán (Rd)	50,7	2,2	45,1	2,0

Tabla 6.- Valores estimados de erosión actual y potencial por subcuencas en el Sistema Hidrológico A° Ludueña.

SB (i)	F _i (km ²)	Erosión superficial actual				Erosión superficial potencial			
		A _i (T/km ² /año)	A' _i (T/año)	SY _i (T/km ² /año)	SY' _i (T/año)	A _i (T/km ² /año)	A' _i (T/año)	SY _i (T/km ² /año)	SY' _i (T/año)
1	40,5	38,6	1562,4	11,4	462,3	3214,8	130200,7	951,3	38528,2
2	25,7	55,5	1425,4	17,4	446,5	3081,3	79189,7	965,1	24804,2
3	26,3	62,9	1653,9	19,6	516,5	2517,7	66215,1	786,3	20680,5
4	6,8	47,7	324,1	17,6	119,9	2844,1	19339,6	1051,9	7152,9
5	19	130,4	2477,7	42,4	806,0	2215,1	42086,2	720,5	13689,7
6	18,8	154,2	2898,7	50,2	944,1	2458,0	46210,7	800,6	15051,2
7	29,9	198,7	5941,8	61,1	1826,2	2265,1	67726,9	696,2	20816,1
8	46,2	176,8	8168,9	51,5	2377,8	2640,2	121977,4	768,5	35505,6
9	9,4	45,9	431,5	16,3	153,2	2738,7	25743,7	972,7	9143,8
10	25,5	271,4	6920,5	85,1	2169,8	2983,6	76082,6	935,5	23854,2
11	9,4	138,7	1303,9	49,3	463,1	2636,5	24782,8	936,4	8802,5
12	37,8	348,3	13165,7	104,0	3929,7	2946,3	111370,1	879,4	33241,5
13	22,5	250,9	5646,1	79,9	1798,2	2681,0	60321,6	853,8	19210,9
14	21,6	235,3	5081,9	75,3	1626,7	2385,7	51530,2	763,7	16495,0
15	16,6	167,5	2780,9	55,4	919,9	2288,1	37982,4	756,9	12565,1
16	9,2	163,4	1503,6	58,2	535,5	2287,8	21048,0	814,8	7496,1
17	6,4	107,7	689,4	40,1	256,9	2063,2	13204,5	768,9	4920,9
18	10,3	110,4	1137,0	38,8	399,3	2629,4	27083,3	923,3	9510,3
19	10	168,6	1686,3	59,4	594,3	2342,1	23420,8	825,5	8254,7
20	34,8	250,2	8708,4	75,5	2626,3	2575,9	89640,0	776,8	27033,5
21	52,3	183,8	9613,6	52,7	2755,3	2639,5	138044,2	756,5	39564,3
22	12,1	152,6	1846,7	52,5	635,5	2853,9	34531,8	982,2	11884,2
23	16,9	191,4	3233,8	63,2	1067,4	2724,1	46037,4	899,2	15195,8
24	34,7	127,2	4413,0	38,4	1331,3	2912,2	101052,3	878,6	30486,2
25	76,8	188,8	14497,9	51,6	3960,3	3201,7	245886,9	874,6	67168,1
26	68,8	314,7	21650,2	87,2	5996,0	3462,1	238195,8	958,8	65968,0
27	4,8	142,9	685,9	55,2	265,0	2348,9	11274,6	907,4	4355,6
28	23,9	136,9	3272,4	43,3	1034,3	2845,9	68016,4	899,5	21498,7

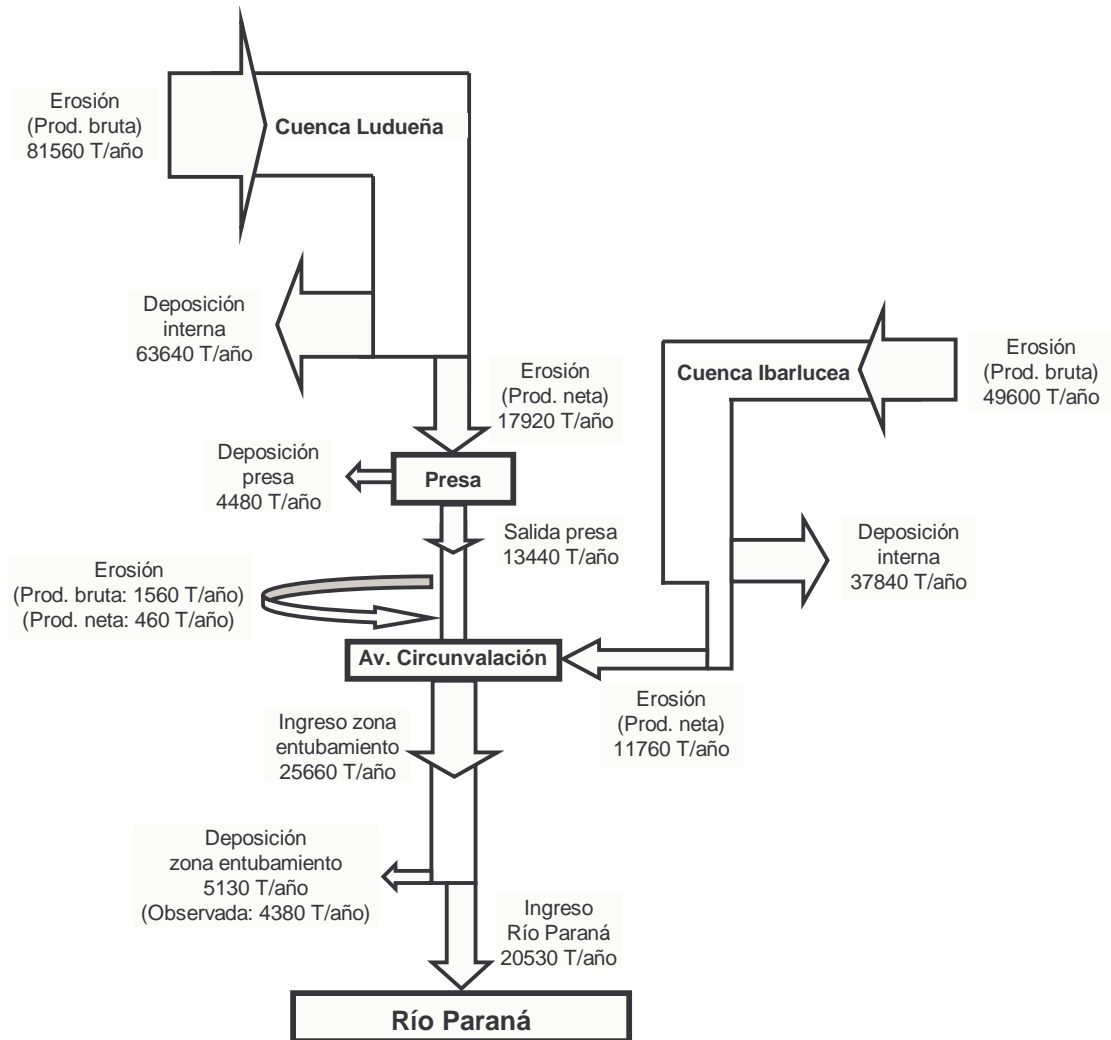


Figura 3.- Balance medio anual de sedimentos en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña considerando erosión actual.

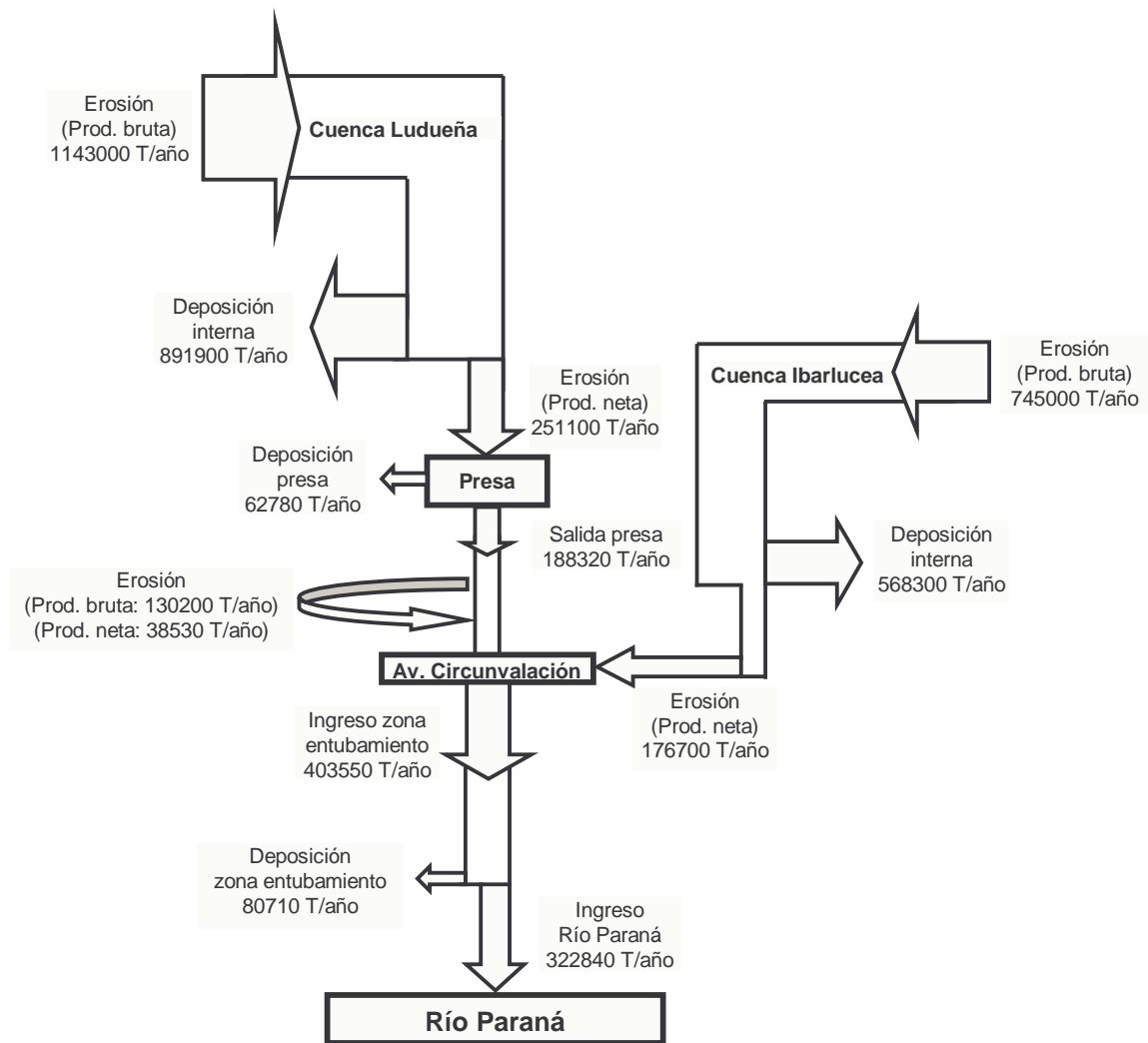


Figura 4.- Balance medio anual de sedimentos en el Sistema Hidrológico del A° Ludueña considerando riesgo de erosión potencial.