

**ESTUDIO DE APORTE DE SEDIMENTOS DEL RÍO SAN FRANCISCO AL EMBALSE DEL
DIQUE LA FALDA**

Carlos Beltramone
INA-CIRSA - CONICET. Medrano 235 Villa Carlos Paz. Córdoba.
E-mail: carlosbeltramone@arnet.com.ar

RESUMEN

La cuenca del río San Francisco tiene una producción de sedimento de $0,023804 \text{ Hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$. Para describir la producción y transporte de sedimento se aplicó el modelo cuantitativo de Gavrilovic, definiendo grados de vulnerabilidad a los procesos erosivos sobre la base de parámetros geológicos, geomorfológicos y climáticos.

Palabras Claves: Producción sedimentos, transporte sedimento, río San Francisco, Dique La Falda.

ABSTRACT

The San Francisco river basin sediment yield is $0,023804 \text{ Hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$. The study involved implementation of a quantitative model the Gavrilovic, defining vulnerability degrees to erosion processes, based on hydrogeomorphology and climatic parameters.

Keywords: Sediment yield, sediment load, San Francisco river, Dique La Falda.

INTRODUCCIÓN

El Dique la Falda fue construido con el propósito de proveer agua a la Localidad de La Falda y el control de crecidas en la cuenca del Río San Francisco. La cuenca de alimentación se ubica al NO de la Provincia de Córdoba, entre los 31° 00' y 31° 07' de latitud sur y los 64° 30' y 64° 32' de longitud oeste, abarcando una superficie de 135 km² cuyo colector principal es el Río San Francisco o Grande.

La cuenca se caracteriza por presentar condiciones de torrencialidad, tales condiciones dependen fundamentalmente de las fuertes pendientes que dominan a toda la cuenca y de un sustrato de rocas impermeables que permite una rápida escorrentía en las laderas, lo que hace que la escorrentía de laderas se concentre rápidamente en los colectores y llegue en forma de pico de crecida al río principal. Desde el punto de vista de su configuración cabe mencionar que es de tipo oval alargada de oeste a este con torrentes que se incorporan al colector principal casi en ángulo recto.

Las características hídricas de esta red de drenaje esta en función de las condiciones climáticas, de allí la presencia de ríos y arroyos de carácter permanente o temporales, es decir que la diferenciación marcada entre periodos secos y húmedos hace que el Río San Francisco sea de régimen muy irregular donde la mayor parte de la masa anual escurre durante la temporada estival.

La producción de sedimentos es indicador de la cantidad de material erodado mecánicamente sobre un área en un periodo de tiempo y promediado para una zona específica la misma puede ser calculada estableciendo una relación entre la carga sólida transportada por un río en un lugar de referencia y el área de drenaje río arriba (Petts, 1985).

La metodología utilizada es la desarrollada por Gavrilovic (1988) -para cuencas de montañas sin datos de aforos-, en función de las características morfológicas, litológicas, vegetación, uso del suelo y distribución de precipitaciones y temperaturas. Esta metodología fue aplicada en nuestro país para ríos de montaña con buen resultado por Spalleti et al. (2000).

Los objetivos del presente trabajo son: calcular el volumen medio anual de sedimento erosionado (m³.año⁻¹) y caracterizar el área fuente de sedimento.

CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

Características geológicas – geomorfológicas

La organización litológica - estructural del área esta representada por afloramientos paleozoicos, desplazados y fracturados, intrusiones graníticas, y terrenos cenozoicos. El zócalo paleozoico está constituido esencialmente por gneises, esquistos tonalíticos-biotíticos, cuarcitas micáceas, anfibolitas, mármoles y filitas, que sufrieron procesos de inyección apliticas-pegmatíticas, ocurridas según Olsacher (1960) con anterioridad a la intrusión granítica. El estilo tectónico del basamento es predominantemente homoclinal con buzamientos de mediano a alto ángulo de 40° a 80° hacia el este (según Gordillo *et al.*, 1979). El Cuaternario esta constituido por los fanglomerados de piedemonte correspondiente al Pleistoceno superior y al Holoceno respectivamente.

El relieve de la región esta controlado principalmente por la constitución litológica y por la estructura, de carácter policíclico, representado por un paisaje de tipo tectónico, caracterizado por bloques de montañas separados por cuencas longitudinales del tipo "basin and range landscape" dado a oriente por el bloque de la Sierra Chica a occidente por las estribaciones de la Sierra Grande separados por la depresión tectónica de Punilla.

En la dinámica de vertiente tienen incidencia dos conjuntos de procesos relacionados directamente con la producción de sedimentos, a) los relacionados a movimientos de remoción en masa y b) los relacionados con la acción de la escorrentía superficial. Entre los primeros se han identificado deslizamientos, caídas y flujos lentos. En laderas con fuerte pendiente y sustrato impermeable predominan los efectos de la escorrentía superficial capaz de arrastrar gran cantidad de material a los fondos de los cauces.

Principales características fisiográficas de la cuenca

La cuenca del río San Francisco en su tramo superior muestra una red de drenaje bien jerarquizada donde la tectónica ha tenido una importancia decisiva, los cursos más importantes están regidos por líneas fracturadas.

Desde el punto de vista de su configuración cabe mencionar que la cuenca que es de tipo triangular a oval alargada de oeste a este con torrentes que bajan de la cumbre siguiendo la línea de mayor pen-

diente y que se incorporan al colector principal casi en ángulo recto.

De acuerdo a las condiciones orográficas generales de la cuenca la red hidrográfica ha alcanzado mayor desarrollo en la pendiente occidental correspondiente a las estribaciones del bloque de la Sierra Grande, mientras que en la pendiente oriental de la Sierra

Chica esta poco integrada y de menor caudal tendiéndose a desarticularse al salir al piedemonte.

Según la clasificación de Strahler (1964) la cuenca de drenaje es de quinto orden siendo su curso principal el río San Francisco o Grande, estando formada por ocho cuencas tributarias de cuarto orden (Figura 1).

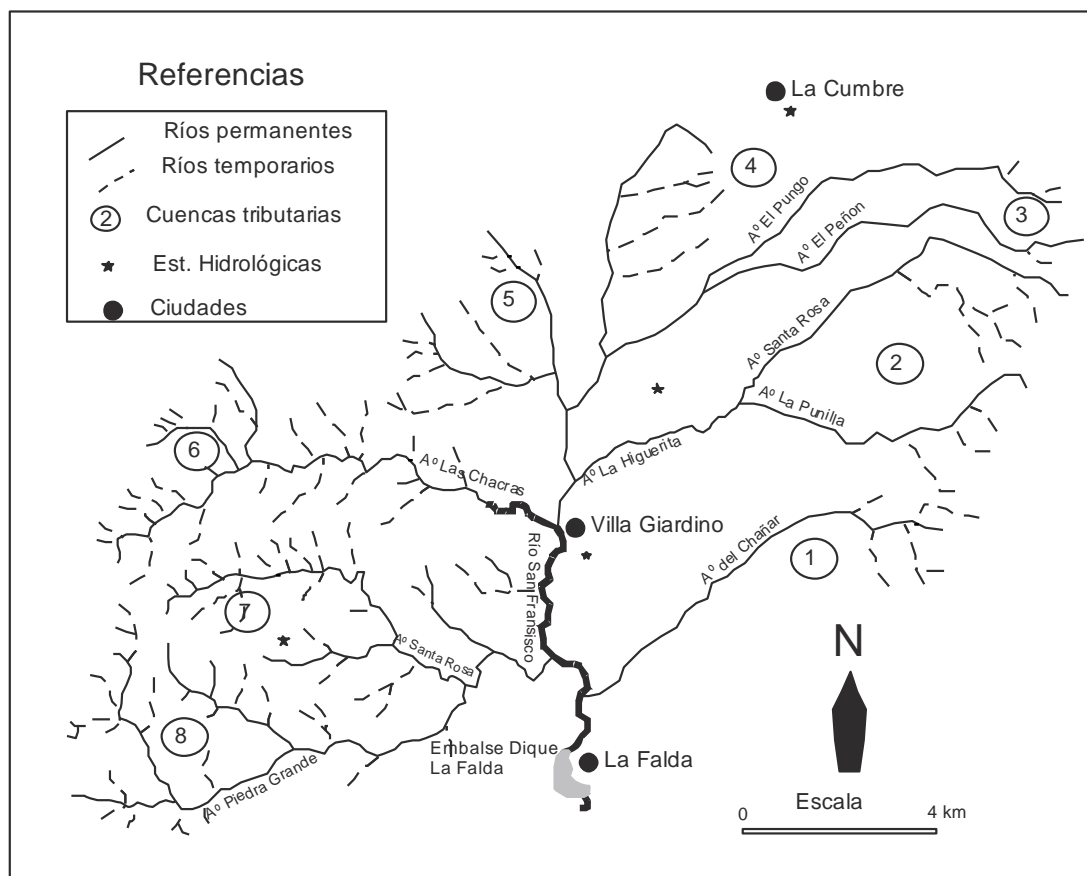


Figura 1. Cuenca del Río San Francisco, incluyendo subcuencas y estaciones hidrológicas.

Los principales parámetros morfométricos desde las nacientes hasta la presa se expresan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros morfométricos.

Área (Km ²)	132
Longitud del cauce principal (Km)	15.5
Dens. drenaje	4.07
Índice de compacidad	1.36
Nº de orden de la red (Adim.)	5
Perímetro (km)	53.70
Relación de bifurcación (Adim.)	3.58
Frec. de cursos	12.56

Las condiciones de torrencialidad se manifiestan en las respuestas hidrológicas ante la ocurrencia de lluvias de cierta intensidad y duración estando caracterizada por flujos rápidos y de gran poder de arrastre de materiales.

Datos Climáticos

Los datos de precipitación y temperaturas fueron obtenidos del Sistema Telemétrico de Mediciones Hidrometeorológicas que opera el Centro de la Región Semiárida-INA.

- Precipitación: Se utilizaron las series de lluvias mensuales y anuales comprendidas entre los años hidrológicos 1975/1976, dando una precipitación media areal para la cuenca a nivel anual de 653 mm.

- Temperatura: Se procesaron los registros térmicos para un periodo de 4 años comprendidos entre 1995-1999 dando una media anual de 15.4 °C.

EL EMBALSE DEL DIQUE LA FALDA

La presa se construyó con el propósito de provisión de agua a la localidad de La Falda y control de crecidas, se sitúa en el curso medio del río San Francisco o Grande en un estrechamiento del valle con laderas inclinadas, formando un vaso que cubre un área de 20 Ha a cota embalse máximo, con un volumen máximo de 1 Hm³ constituyéndose como el segundo de mayor capacidad de la cuenca del Río Primero.

Las principales características de la presa según el Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Córdoba son:

- Altura de la presa: 25 m
- Volumen cota vertedero: 0.8 Hm³
- Longitud de coronamiento: 236 m
- Modulo anual: 0.80 m³.seg⁻¹
- Tipo de presa: Mixta – Hormigón - contra fuerte materiales sueltos
- Naturaleza del terreno sobre el que se apoya la presa: Basamento cristalino
- Superficie lago a cota vertedero: 15 Ha
- Cota embalse máximo: 16 m
- Cota de fundación: 4.67 m sobre cero proyecto
- Cota fondo de cauce: 10 m sobre cero proyecto
- Obra de descarga de fondo: reja

SEDIMENTACIÓN EN EL EMBALSE

Área fuente de sedimentos

De acuerdo a las características litológica y geomorfológica de la cuenca puede afirmarse que las áreas con presencia de movimientos en masa y de incisión en cárcavas en las cabeceras de los cursos son las principales áreas fuente de sedimentos, los que llegan a los cauces principales a través de una red de cauces con pendientes empinadas y marcadas rupturas de pendientes. Si se tiene en cuenta que más del 75% de la cuenca se instala sobre

litologías resistentes (granito y gneis) y dadas las condiciones morfoclimáticas actuales se meteorizan principalmente por procedimientos mecánicos (Figura 2 y Figura 3), esto hace que predomine la producción de sedimentos gruesos en los cauces que tienen sus nacientes en las estribaciones de la Pampa de Olaen y Sierra Chica, mientras que la producción de finos es más escasa y se limita a la presencia de arcillas derivadas de la meteorización de las rocas esquistosas aflorantes en la ladera occidental de la Sierra Chica.

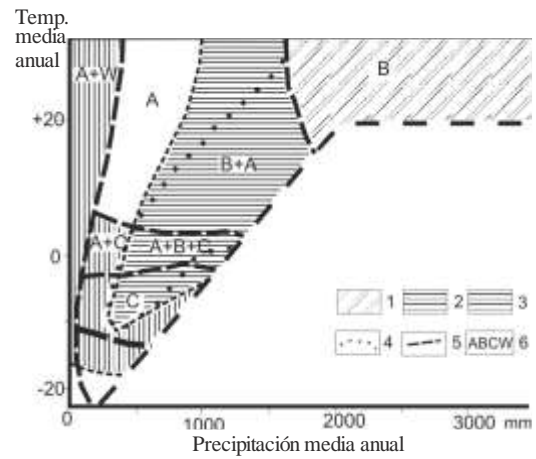


Figura 2. Clasificación de eventos extremos en regiones morfoclimáticas: 1- muy alta meteorización química; 2 - alta meteorización química; 3- alta meteorización física; 4- límite del bosque; 5- límite de áreas de diferentes eventos; (A- lluvias bajas; B- lluvias continuas; C- fusiones nivales; W- vientos fuertes). Según Starkel (1976).

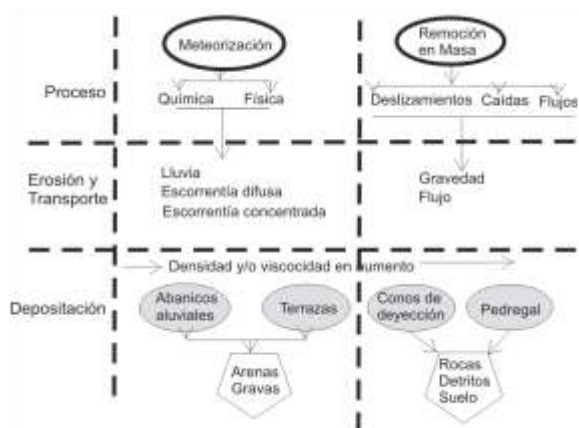


Figura 3. Esquema de producción de sedimentos.

Las laderas entre los 600 y 1100 m. se caracterizan por su amplia densidad de drenaje y con torrentes de fuerte pendiente longitudinal, y es en este sector donde se produce la principal fuente de aporte de sedimentos a los cauces fluviales.

Sobre el manto de derrubio que cubre las laderas actúan principalmente dos tipos de procesos que son los encargados de transportar el material ladera abajo; en primer termino está la escorrentía superficial a través de cauces con fuertes pendientes capaz de evacuar rápidamente material poco seleccionado que son depositados en forma de conos de deyección, estos sedimentos son redepositados aguas abajo en el momento que se producen grandes crecientes.

En segundo lugar en forma más puntual intervienen los movimientos en masa, caracterizados principalmente por caídas de rocas como en el caso de los ríos que tienen sus cabeceras en la Pampa de Olaen, este proceso, también se da en laderas donde la cobertura superficial se halla en equilibrio precario las que son desestabilizadas por la acción del agua subcortical. Varios autores tales como Selby (1981), Hayward (1980) y Garcia Ruiz (1985) justifican la producción de sedimentos dado por una actividad geomorfológica muy activa dentro del proceso de remoción en masa. Algunos de ellos como Ergenzinger (1988) ha dado pruebas de la gran actividad que tienen estos procesos en la producción de sedimentos gruesos.

Los torrentes que bajan desde la Sierra Chica, presenta un funcionamiento hidrogeomorfológico diferente ya que se tratan de torrentes cortos y de carácter intermitentes, esto hace que al salir al piedemonte con menor energía exporten sedimento hacia el colector principal en forma más localizada y de materiales más finos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología a aplicar para la determinación de la producción de sedimentos se basa en que los procesos erosivos son el resultado de la interacción de varios factores: clima, litología, geomorfología, uso del suelo y topografía. Por tal motivo se han recopilado los datos de distintas variables utilizadas (extraídas de mapas temáticos, imágenes satelitales, fotos aéreas, etc.) las que han sido digitalizadas tales como:

- El mapa de elevación del terreno se elaboró a partir de la cartografía del Instituto Geográfico Militar a escala 1:50.000.

- El Mapa de la red de drenaje se ha realizado a partir de las fotos aéreas a escala 1:25.000.

- El mapa litológico se elaboró a partir del mapa geológico de Lucero et al. (1995) mediante la asignación de una clase litológica predominante a cada formación.

- El mapa uso del suelo, se ha establecido a partir del Mapa de Suelo de la Provincia de Córdoba (Los Suelos Recursos Naturales de la Pcia. de Córdoba - Nivel de reconocimiento).

- El mapa de pendiente fue preparado a escala 1:20.000, en el que se representaron cuatro áreas según las pendientes comprendidas entre los siguientes intervalos a las que se la asignaron un valor relativo; 1) 0° a 10°, 2) 10° a 20°, 3) 20° a 30° y 4) mayor de 30°.

Cálculo estimativo de la producción anual de materiales gruesos

Los volúmenes de sedimentos producidos por una cuenca hídrica pueden ser evaluados para cuencas sin aforos de materiales sólidos como el caso de la cuenca del Río San Antonio mediante el cálculo estimativo de producción anual de materiales gruesos a partir de información hidrológica, litológica, geomorfológica y uso del suelo.

Existen varias formulaciones para estimar la producción de sedimentos entre ellas y más conocida es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) mediante esta se puede obtener cantidad de cobertura superficial que puede ser removida por erosión hídrica. Otra formulación muy difundida en Europa es el método de Gavrilovic (1988), siendo utilizada en nuestro país y con buenos resultados para cuencas de montañas por Spalletti et al. (2000).

En este trabajo se adoptara la metodología de Gavrilovic (1988) la cual estima el volumen de sedimento en $m^3.año^{-1}$ por erosión superficial (W) y del coeficiente de retención (R) a través de variables tales como: topografía, clima tipo de suelo, uso de suelo, vegetación, características litológicas y geomorfología a las que se le asignan un valor (peso) relativo adecuado de acuerdo a la experiencia que tiene el profesional del área de estudio.

De esta manera, puede presentarse la siguiente relación funcional para la estimación del volumen de sedimento producido a nivel de cuenca en un año:

$$G = W \cdot R \quad (1)$$

donde:

W = volumen promedio anual erosionado de sedimento ($m^3 \cdot a\tilde{n}o^{-1}$);

R = coeficiente de redepositación o de retención de sedimento.

Determinación del parámetro W

La expresión para determinar el volumen promedio de sedimento erosionado está dada en la siguiente ecuación:

$$W = T h \pi Z^{3/2} F \quad (2)$$

donde:

T = parámetro función de la temperatura media anual;

h = representa la precipitación media anual ($mm \cdot a\tilde{n}o^{-1}$);

Z = coeficiente de erosión;

F = superficie de la cuenca (km^2)

Para el cálculo del parámetro T se utiliza la siguiente ecuación:

$$T = [(t/10) + 0.1]^{1/2} \quad (3)$$

siendo:

t = temperatura promedio anual

Mientras que la ecuación correspondiente al coeficiente de erosión Z es:

$$Z = X Y (\varphi + l)^{1/2} \quad (4)$$

siendo:

X = coeficiente de uso del suelo;

Y = coeficiente de resistencia del suelo a la erosión;

φ = coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados;

l = gradiente de la pendiente superficial

Los valores de estos coeficientes X, Y y φ , fueron calculados de acuerdo a las características locales. Para su determinación se utilizaron los planos digitalizados de geomorfología y vegetación.

Por su parte el valor R se obtiene de:

$$R = [(O D)^{1/2} (L_c + L_i)] / (L_c + 10) F \quad (5)$$

donde:

O = perímetro de la cuenca (km);

D = diferencia de nivel media en la cuenca (km);

L_i = longitud total de los afluentes fluviales laterales (km);

L_c = longitud de la cuenca por talweg del cauce principal (km)

Finalmente se calcula el valor de volumen promedio (G_c) como:

$$G_c = W R \quad (6)$$

Resultados Iniciales

La aplicación de esta técnica produjo los siguientes resultados (Tabla 2).

Tabla 2. Valores calculados.

R	W ($m^3 \cdot a\tilde{n}o^{-1}$)	G ($m^3 \cdot a\tilde{n}o^{-1}$)
0.088	24.568	23.804

El volumen de sedimento producido a nivel de cuenca por año es de G ($Hm^3 \cdot a\tilde{n}o^{-1}$): 0,023804.

El total de material que ingresó al embalse del Dique La Falda en el periodo 1980 – 1998 es de aproximadamente de $0.71412 Hm^3 \cdot a\tilde{n}o^{-1}$.

Estado de colmatación del vaso a cota máxima es de: 71.41%, si consideramos la cota a nivel de vertedero la colmatación es de: 88.75%.

De acuerdo a los valores obtenidos se estima una vida útil de la presa a nivel de vertedero de 34 años.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente cálculo de sedimento no considera la retención de sedimentos que realizan las pequeñas presas o azudes de retención (Morecabo, Molino de Thea y otros) cuenca arriba del embalse ni los volúmenes de entradas de sedimento por arroyos que ingresan directamente al embalse.

El Río San Francisco es un río con características torrenciales que precisaba una presa con un sistema de purga muy eficiente, para la evacuación sistemática de sedimentos.

No existe un Plan de Manejo de Cuenca sustentable, lo que condiciona todo tipo de obra para control de erosión.

Para contrarrestar la colmatación acelerada del embalse es mediante la evacuación (desbarrado) del material sedimentado por medios a investigarse en lo inmediato.

Ejecución de obras de prevención y control de erosión para reducir ingreso de sólidos al sistema fluvial.

REFERENCIAS

- Ergenzinger, P. 1988. Regional erosion: rates and scale problems in the Buonamico Basin, Calabria. *Catena Suplemento*, 13, 97-107.
- García Ruiz, J. M. 1985. Movimientos en masa en los conglomerados del contacto Depresión del Ebro. Sistema Ibérico en la Rioja. *Actas 1 Coloquio sobre Geografía de la Rioja*, Logroño. 69-80.
- Gavrilovic, S. 1988. The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. England.
- Gordillo, C. y Lencinas, A. 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En: Leanza, A. F. (Ed.): *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba. 1-39.
- Hayward, J. A. 1980. Hydrology and stream sediments from Torlesse stream catchments. *Tussock Grassland and Mountain Lands Institute*, Canterbury. 236p.
- Lucero Michaut, H. Gamkosian, A. Jarsun, B. Zamora, E. Sigismondi, M. Miro, R. Caminos, R. 1995. Mapa Geológico de la Provincia de Córdoba. Secretaría de Minería. Dirección Nacional del Servicio Geológico. Buenos Aires.
- Olsacher, J. 1960. Descripción geológica de la Hoja 20h, Los Gigantes, Córdoba. *Carta Geológica - Económica de la República Argentina*, Dirección Nacional de Geología y Minería. Boletín 12. Buenos Aires.
- Petts, G. Foster, I 1985. *Rivers and landscapes*. Hodder & Stoughton, London. 274p.
- Selby, M. 1981. Slopes and weathering. In K. Gregory and D. Walling (Eds.): *Man and Environmental processes*, London. 105-122.
- Spalletti, P y Brea, J. D. 2000. Producción de sedimentos en el noroeste argentino. 19 Congreso Nacional del Agua. Villa Carlos Paz, Córdoba. Actas: 185-187.
- Starkel, L. 1976. The role of extreme (catastrophic) meteorological events in contemporary evolution of slopes. In: Derbyshire, E (Ed.): *Geomorphology and Climate*. John Wiley & Sons, Chichester, Brisbane, Toronto.
- Strahler, A. N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow, V (Ed.): *Handbook of applied Hydrology*, Mc. Graw Hill, 4-2. New York.

Artículo recibido el 03/2009 y aprobado para su publicación el 05/2009.