

Predicción de la pérdida de suelos aplicando MUSLE en Aldea Santa María, Entre Ríos.

Ing. Roxana Ramírez¹

Ing. Agr. Marcelo G. Wilson²

Dra. Marta Marizza³

Ing. Agr. Emmanuel Gabioud⁴

¹ Ingeniera Civil. Universidad Tecnológica Nacional.

Facultad Regional Paraná.

E-mail: roxanaguadaluperamirez@yahoo.com.ar

² Ing. Agr. Dr. Ciencias de la Tierra. Grupo Recursos Naturales INTA EEA Paraná

³ Dra. CENEHA. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas.

Universidad Nacional del Litoral.

⁴ Ing. Agr. Grupo Recursos Naturales INTA EEA Paraná

36



RESUMEN

La problemática de la erosión hídrica es relevante en la provincia de Entre Ríos, afectando casi la mitad de la superficie de tierra firme. En el área de influencia de la Aldea Santa María prevalece la actividad agrícola-ganadera y actualmente constituye un área de conservación de suelos obligatoria. En este trabajo se evalúa la producción de sedimentos integrando un modelo de pérdida de suelo y un modelo de escorrentía bajo el medioambiente del SIG. Los resultados indican una importante degradación de los suelos y la necesidad de actuación para la prevención y control de la erosión.

Palabras claves: erosión hídrica, pérdida de suelos, escurrimiento, Entre Ríos

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica constituye la principal limitante para la producción agropecuaria en Entre Ríos, debido al paisaje ondulado y la baja permeabilidad de los suelos en gran parte del territorio, que le confieren una alta susceptibilidad. Se ha demostrado que la erosión hídrica en la provincia afecta una superficie de 3.939.954 ha, lo que representa casi el 50% de la superficie de tierra firme, siendo Diamante, Paraná, Nogoyá, Victoria y Uruguay los Departamentos más afectados [1].

A partir de las investigaciones, desarrollos tecnológicos e innovaciones realizadas en el INTA, el Gobierno provincial y la UNER, y a la visualización del problema de la erosión hídrica por parte de la comunidad, se sanciona una Ley que establece una serie de manejos

conservacionistas respecto a la erosión hídrica. La Ley Provincial N° 8318 de Conservación de Suelos instrumentada y vigente, es una característica distintiva de Entre Ríos. Esta Ley prevé el acceso a estímulos a productores agropecuarios otorgándoles una reducción diferencial en el valor del impuesto inmobiliario rural como una compensación a promover las buenas prácticas para la conservación y manejo del suelo.

Por las características naturales que presenta la provincia, el abordaje del control de la erosión hídrica debe ser a escala de cuenca hidrográfica, poniendo énfasis en su red de avenamiento, conociendo los aportes de agua desde los establecimientos agropecuarios a los tributarios y finalmente desde ellos hacia el cauce principal. En los suelos de paisaje ondulado, el proceso erosivo se inicia levemente en los sectores altos de la loma y crece acumulativamente a lo largo de las pendientes para alcanzar su máximo grado cerca de la costa de los arroyos, por lo que se requiere implementar tecnologías como la sistematización de tierras y la construcción de terrazas de manera tal de conducir y evacuar los excedentes hídricos en forma no erosiva [2].

Uno de los primeros lugares en adoptar este conjunto de técnicas alternativas a la reducción de la degradación de los suelos, se ubicó en la Aldea Santa María. El 4 de julio de 1995 el Ministerio de Gobierno, Justicia y Educación de Entre Ríos declaró según decreto N° 2697 a la Aldea Santa María como Capital Provincial de la Conservación del Suelo y como área de conservación y manejo de suelos obligatoria [3], con un alcance de 10.040 ha. Esta área pertenece a la superficie hidrográfica del Arroyo Las Conchas, que tiene sus nacientes en las estribaciones australes de la cuchilla de Montiel; en donde sus aguas escurren en la dirección sur-suroeste y que se vierten en el río Paraná, a unos pocos kilómetros al norte de la ciudad de Paraná, capital de la provincia de Entre Ríos.

El objetivo del presente trabajo es conocer la dinámica hídrica y estimar la pérdida

de suelo que se registra en la Cuenca hidrográfica que se encuentra circunscripta al área de conservación de suelos obligatoria de la Aldea Santa María.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en el Distrito Tala, departamento Paraná, en la provincia de Entre Ríos, situado a unos 70 Km de la capital provincial, Paraná; se obtuvo información para el área comprendida entre 31° 39' 28,97" a 31° 36' 47,12" Lat. S y 60° 3' 58,10" a 59° 55' 43,34" Long. O. La ubicación de la zona de análisis se observa en la Figura 1.

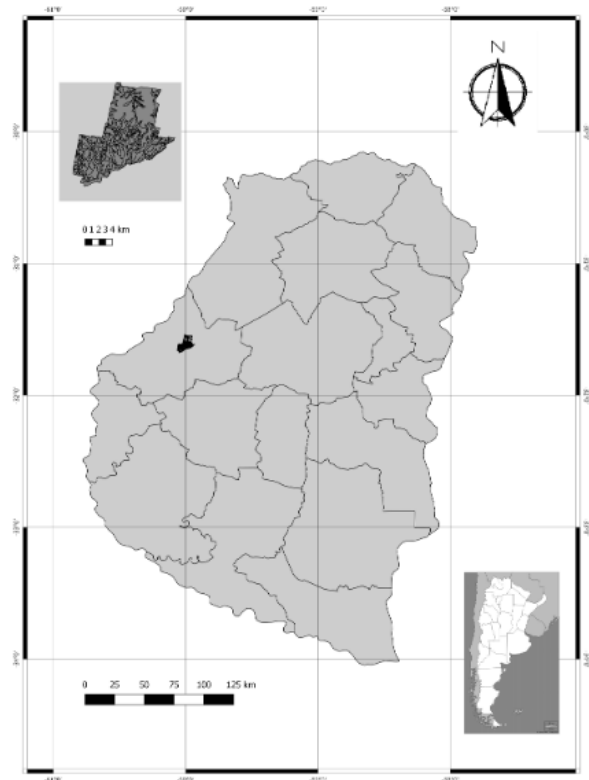


Figura 1: Ubicación geográfica del sitio piloto que comprende a la Aldea Santa María

Registra un clima templado húmedo de llanura, que es favorable para la práctica de cultivos de cereales, oleaginosas y forrajes de secano. La precipitación media anual es de aproximadamente 1200 mm. El régimen térmico es templado; la media diaria anual es de 18,5 °C y varía entre 25,0 °C en enero y 12,0 °C en julio, con una amplitud térmica de 13,0

°C. El período más lluvioso es de septiembre a abril, donde se registra el 83 % del total anual y el menos lluvioso, de mayo a agosto con el 17 % del total, aproximadamente [4].

Los bosques nativos del centro-norte de Entre Ríos, pertenecen a la provincia fitogeográfica del Espinal, correspondiente al Dominio Chaqueño [5]. Actualmente, el área de la Aldea Santa María registra una superficie de 3.273 ha de bosques nativos en donde se pueden identificar distintas categorías de bosques desde renovales, bosques prístinos, sucesiones secundarias y selvas en galerías (Lucas Fanoni, comp. pers.).

Los suelos del área se agrupan en los siguientes órdenes: Alfisoles, Molisoles y Vertisoles. El 69 % de la superficie de los suelos pertenecen al orden Vertisol, le sigue en importancia los Molisoles con 19 % de la superficie y los Alfisoles con el 12 %. La mayoría de estos suelos presentan algún grado de susceptibilidad a los procesos erosivos [4].

Los patrones topográficos prominentes del departamento Paraná dan origen a una amplia densidad de cursos de agua. Este relieve se caracteriza por estar formado por una gran sucesión de lomadas que se encuentran separadas por valles anchos y aplanados, que adicionado a las características de intensidad-duración que presentan las lluvias dan origen al desarrollo de una compleja e importante red hidrográfica. La cuenca del arroyo Las Conchas es la más importante del departamento y contiene a la Aldea Santa María.

METODOLOGÍA

La metodología que se presenta consiste en evaluar la producción anual de sedimentos de las subcuencas comprendidas en el área de estudio, en relación con la cuenca proyectada.

La dinámica hídrica de las subcuencas que se encuentran comprendida en el área de estudio, pueden determinarse integrando un modelo hidrológico HEC HMS [6] y un modelo de producción de sedimentos [7], la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM) (1). Esta ecuación ha sido

estudiada por Williams (1975) y Williams y Berndt (1977) [8] y permite estimar la pérdida de suelo generada a partir de un evento de precipitación aislado. Esta ecuación logra expresar la producción de sedimentos en función del máximo caudal instantáneo y del volumen de escorrentía que se produce en una tormenta.

$$Y = 11,78(V Q_p)^{0,56} K LS C P \quad (1)$$

Donde:

Y: Producción de sedimentos de la cuenca producidos por una tormenta, [Toneladas]

V: Volumen de escurrimiento por tormenta, [m³]

Q_p : Caudal máximo instantáneo, [m³/s]

11,78(V Q_p)^{0,56} : Factor de escorrentía

K: Coeficiente de erodabilidad del suelo, [Ton hr/N ha]

LS: Factor topográfico

C: Factor de cultivo y manejo del suelo

P: Factor de prácticas de conservación del suelo

De acuerdo a la metodología propuesta por Almorox [9], que se basa en que la erosión hídrica, es mucho más activa que el proceso de meteorización ya que provoca la alteración y disgregación de los horizontes superficiales del perfil edafológico del suelo -algunos en mayor grado que otros-. Considera que para obtener la pérdida de suelos por erosión hídrica a lo largo de un año se deben considerar todas las tormentas ocurridas a lo largo de ese año. Para ello se utiliza la ecuación propuesta por Simons [10]:

$$A_s = \frac{V_a(0,01Y_{100} + 0,01Y_{50} + 0,01Y_{25} + 0,06Y_{10} + 0,4Y_2)}{(0,01V_{100} + 0,01V_{50} + 0,02V_{25} + 0,06V_{10} + 0,4V_2)} \quad (2)$$

Donde:

A_s: Producción de sedimentos anual, [Toneladas]

Va: Producción anual promedio de escorrentía, [m³]

Y_i: Producción de sedimentos para *i* años de recurrencia, [Toneladas]

V_i: Escorrentía para los *i* años de recurrencia, [m³]

Siendo *i*: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años

La producción anual promedio de escorrentía de cada subcuenca, Va; se obtiene mediante el Método del Número de Curva, considerando una lluvia media anual a partir de la suma de los promedios de las lluvias registradas en los doce meses del año.

Para este trabajo se dispone del Modelo Digital del Terreno (MDT) a partir del cual se delimitan dentro del sitio de estudio, las subcuencas y respectivas redes de drenaje a partir de la utilización de ARCGIS 10.2 [11] y de la extensión HEC GeoHMS [12]. Se determinan además, otros parámetros morfométricos, tales como área de cada subcuenca, pendiente media y parámetros relativos a la red hidrográfica como la longitud del cauce principal y el tiempo de concentración T_c. Este valor se obtiene a partir de la Ecuación del California Culverts Practice [13]:

$$T_c = 0,954 \left(\frac{L_c^3}{H} \right)^{0,385} \quad (3)$$

Para determinar el factor de escorrentía, se utiliza el modelo hidrológico HEC-HMS 4.1 [7], considerando las curvas de intensidad – duración - frecuencia (IDF) adoptado para el Departamento Paraná [14]. En éste modelo, las intensidades se ajustan a una expresión Sherman de cuatro parámetros:

$$i = \frac{K \cdot T_r^m}{(d + c)^n} \quad (4)$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación [mm/h] ;

T_r: Período de retorno [años];

d: Duración de la precipitación [minutos]

k, *m*, *n* y *c*: Parámetros que se determinan para cada localidad en base a un análisis de regresión lineal múltiple.

Para el departamento Paraná los parámetros adimensionales son:

m = 0,23 , *n* = 0,69 , *K* = 555,7 y *c* = 6

$$i = \frac{555,7 \cdot (T_r)^{0,23}}{(d + 6)^{0,69}} \quad (5)$$

A partir de este modelo, se generan los hietogramas acumulados para las recurrencias Tr: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, considerando una tormenta de 24 horas de duración.

Para la modelación hidrológica, los valores de Número de Curva (CN) se obtienen utilizando las curvas de escorrentía y el grupo hidrológico del suelo (USDA – SCS, 1964) [15] considerando la condición media de humedad antecedente en el suelo. Como método de transformación lluvia-caudal se utiliza el hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). No se considera el flujo base o subterráneo, dado que interesa conocer el flujo superficial que es el que aporta mayor volumen de agua en una crecida.

A partir del Mapa de Suelos de Entre Ríos (Escala 1:20.000) y los usos del mismo, establecidos para el sitio piloto de la Aldea Santa María [4] se obtiene el coeficiente de erodabilidad del suelo *K*, ponderado por áreas en cada subcuenca. Este coeficiente representa la susceptibilidad a la acción de agentes erosivos y es función de la acción individual y/o combinada de sus propiedades físicas, químicas y biológicas y del manejo [16].

El factor topográfico *LS*, combina el subfactor longitud de la pendiente (*L*) y el subfactor gradiente de la pendiente (*S*), según Wischmeier [17] se puede estimar:

$$LS = \left(\frac{\ddot{e}}{22,1} \right)^m (0,0065p^2 + 0,0454p + 0,065) \quad (6)$$

$$\text{Siendo: } L = \left(\frac{\ddot{e}}{22,1} \right)^m \quad (7)$$

Donde:

\bar{e} : Longitud estimada de la pendiente, [m]
 m : Exponente influenciado por la interrelación entre la longitud y la inclinación de la pendiente. En este trabajo $m = 3$, para inclinaciones comprendidas entre el 1% y el 3%.

$$Y S = 0,0065p^2 + 0,0454p + 0,065 \quad (8)$$

p : Pendiente media del área de aporte, [%]
 Las pérdidas de suelo son menores cuando éste está cubierto por vegetación permanente, bosques o prados, y son mayores cuando el suelo está desnudo, particularmente, si ha sido labrado para cultivos. El factor C, de cultivo y manejo del suelo, estima en función de los valores obtenidos de cobertura vegetal que ofrece la tabla de Wischmeier y Smith (1978) [17] ponderado por la superficie de la cuenca que ocupa cada cultivo o vegetación.

RESULTADOS

La metodología se aplicó sobre el área de estudio, Aldea Santa María, en el Departamento Paraná. Se dispuso del Modelo Digital del Terreno (MDT) que el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey) tiene disponible para América del Sur (formato grid, paso de malla de 90 m, coordenadas geográficas con datum WGS84), se hizo la proyección al sistema oficial de pro-

yección plana POSGAR94-Faja 5. Todo el procedimiento se realizó con el software ARCGIS [11]. Se trazaron 6 subcuencas con sus respectivas redes de drenaje (Figura 2).

Proyección de las subcuencas sobre el Sitio Piloto

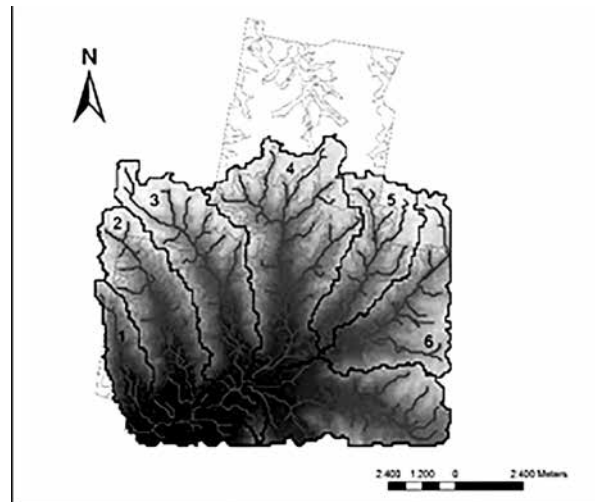


Figura 2: Esquema de la cuenca delimitada en seis subcuencas proyectadas sobre el sitio piloto de la Aldea Santa María

Se estimaron los parámetros morfométricos de las mismas, relativos a la red hidrográfica, y el parámetro Número de Curva (CN), tal como se muestra en la Tabla 1. En función de los valores obtenidos se puede establecer que todas las cuencas poseen buen drenaje.

Tabla N° 1: Parámetros de las subcuencas y relativos a la red de drenaje

Subcuencas	A (Km²)	I (%)	Tc (horas)	CN	Lc (Km)
1	7,467	2,76	2,33	89	7,405
2	18,448	2,42	3,28	87	10,126
3	21,453	2,18	4,31	86	12,917
4	26,447	1,93	3,92	87	11,232
5	12,188	2,38	2,98	87	8,236
6	14,828	2,62	3,41	84	9,357

Donde:

- A: Área de las subcuencas, [Km²];
- I: Pendiente media de las subcuencas, [%]
- CN: Número de Curva ponderado;

- L_c : Longitud del cauce principal, [Km];
- T_c : Tiempo de concentración, [horas];
- Los valores de K, C, L, S y LS para cada subcuenca se observan en la Tabla 2.

Tabla N° 2: Parámetros de la ecuación MUSLE

Subcuencas	K (T*Hora/Newton*Ha)	C	L	S	LS
1	0,446	0,33	3,09	0,240	0,740
2	0,454	0,33	2,46	0,213	0,522
3	0,441	0,35	2,57	0,195	0,502
4	0,417	0,34	2,47	0,177	0,436
5	0,421	0,33	2,63	0,210	0,551
6	0,430	0,30	2,49	0,228	0,570

Como en la zona de análisis hay cultivos en terrazas sembrables y no sembrables, se considera el supuesto que existen prácticas conservacionistas para el control de la erosión, por lo tanto el valor asignado a P es 0,40 [18].

Según el modelo de precipitaciones intensas adoptado y considerando una duración de 24 hs, se obtienen los montos de precipitaciones acumulados que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Hietogramas acumulados. Tormentas de 24 horas de duración (mm).

TR (años)	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h
2	2,40	5,19	8,56	12,95	19,74	55,93	66,07	71,35	75,15	78,20	80,77	83,03
5	2,96	6,40	10,57	15,99	24,37	69,05	81,57	88,09	92,78	96,54	99,72	102,50
10	3,48	7,51	12,39	18,76	28,59	80,99	95,67	103,32	108,82	113,23	116,96	120,22
25	4,29	9,27	15,30	23,16	35,29	99,99	118,11	127,55	134,35	139,79	144,40	148,42
50	5,03	10,88	17,95	27,16	41,39	117,27	138,53	149,60	157,57	163,95	169,36	174,08
100	5,90	12,76	21,05	31,85	48,55	137,54	162,47	175,45	184,80	192,29	198,63	204,16

TR (años)	13 h	14 h	15 h	16 h	17 h	18 h	19 h	20 h	21 h	22 h	23 h	24 h
2	85,15	87,16	89,07	90,90	92,65	94,33	95,94	97,49	99,00	100,45	101,86	103,22
5	105,12	107,61	109,97	112,22	114,38	116,45	118,45	120,37	122,22	124,01	125,75	127,44
10	123,29	126,21	128,98	131,62	134,15	136,58	138,92	141,17	143,34	145,45	147,49	149,46
25	152,22	155,81	159,24	162,50	165,62	168,62	171,51	174,29	176,97	179,57	182,09	184,53
50	178,53	182,75	186,76	190,59	194,25	197,77	201,15	204,41	207,56	210,61	213,56	216,42
100	209,38	214,33	219,03	223,53	227,82	231,95	235,92	239,74	243,43	247,01	250,47	253,83

La aplicación del modelo HEC-HMS [7] se basó en un modelo de cuenca obtenido a partir de la aplicación de HEC GeoHMS [12] sobre la base del MDT, considerando a cada subcuenca con un valor propio de CN ponderado y aplicando los modelos meteorológicos correspondientes a las precipitaciones de la Tabla 3.

Se obtuvieron los hidrogramas de crecida de donde se desprenden los valores de Volumen de escorrentía (V) y caudal pico (Qp) para recurrencias T= 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, como muestra la Tabla 4.

Tabla N°4: Resultados del modelo hidrológico HEC-HMS

Subcuencas	TR2		TR5		TR10	
	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)
1	30,60	0,5272	40,70	0,6939	50,20	0,8481
2	57,60	1,2131	78,20	1,6134	97,20	1,9854
3	54,10	1,3382	73,90	1,7923	92,40	2,2155
4	73,50	1,7104	99,70	2,2785	124,00	2,8065
5	40,10	0,7999	54,20	1,0649	67,60	1,3112
6	39,40	0,8691	54,80	1,1788	69,20	1,4690

Subcuencas	TR25		TR50		TR100	
	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)
1	65,40	1,0963	79,20	1,3236	95,30	1,5915
2	127,80	2,5860	155,70	3,1375	188,50	3,7889
3	122,10	2,9005	149,40	3,5307	181,50	4,2759
4	163,10	3,6597	198,80	4,4434	240,80	5,3694
5	89,00	1,7090	108,50	2,0743	131,50	2,5059
6	92,60	1,9409	114,20	2,3766	139,90	2,8930

Las precipitaciones intensas generan crecidas de gran magnitud que movilizan importantes cantidades de sedimentos que se depositan en la parte inferior del sistema de

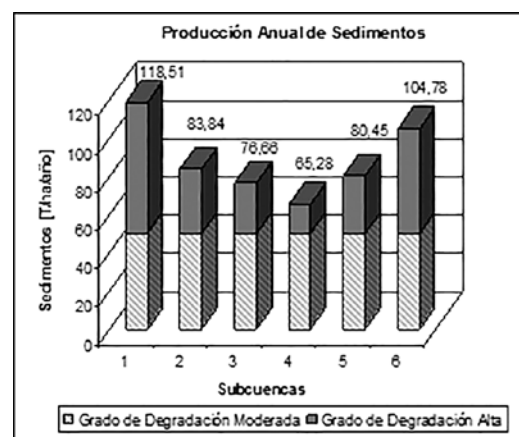
cuencas. La cantidad de sedimentos producido por cada subcuenca para las tormentas consideradas se detallan en la Tabla 5.

42

Tabla N° 5: Producción de sedimentos en toneladas/hectárea (T/ha) para distintas frecuencias.

Subcuenca	y2 (T/ha)	y5 (T/ha)	y10 (T/ha)	y25 (T/ha)	y50 (T/ha)	y100 (T/ha)
1	7,47	10,22	12,87	17,23	21,31	26,21
2	4,94	6,87	8,72	11,78	14,66	18,14
3	4,29	6,02	7,68	10,43	13,04	16,19
4	3,78	5,27	6,69	9,05	11,27	13,95
5	4,73	6,57	8,35	11,30	14,08	17,43
6	3,87	5,52	7,12	9,80	12,34	115,78

La producción anual de sedimentos se observa en la Figura 3. Si se comparan estos valores con la clasificación del grado de degradación por erosión hídrica establecido por la FAO (1980) [19], se observa que las subcuencas analizadas superan las 50 T/ha/año, presentando un grado de degradación alta.

**Figura 3: Producción anual de sedimentos en las subcuencas analizadas**