

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE SUELO EN
MICROCUENCAS DE LA SIERRA DE VAQUEROS (SALTA, ARGENTINA)
MEDIANTE EL USO DE UN SIG

*Ramona Ignacia Moreno*¹

Universidad Nacional de Salta, Argentina
ramoren@unsa.edu.ar

*Pablo Alejandro Campos*²

Universidad Nacional de Salta, Argentina
pcampos@unsa.edu.ar

*Adrián José Avendaño*³

ajavendao@yahoo.com.ar

*Virgilio Núñez*⁴

Universidad Nacional de Salta, Argentina
nunez@unsa.edu.ar

*Mirian Norma Gil*⁵

Universidad Nacional de Salta, Argentina
mgil@unsa.edu.ar

*Ariela Griselda Judith Salas Barboza*⁶

Universidad Nacional de Salta, Argentina
griselda.salasbarboza@gmail.com

*Eliseo Pedro Joel Medina*⁷

Universidad Nacional de Salta, Argentina
joel_medina99@hotmail.com

Fecha de recepción: 08/02/2017

Fecha de aceptación: 04/07/2017

¹ Magíster en Recursos Naturales y Medio Ambiente con Orientación en Manejo de Cuencas Hidrográficas.

² Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente

³ Máster en Ingeniería y Tecnología Ambiental.

⁴ Especialista en Interpretación de Imágenes de Sensores Remotos aplicada a Levantamientos Rurales. Doctorando en Ciencias Biológicas.

⁵ Licenciada en Recursos Naturales

⁶ Becaria doctoral.

⁷ Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente



RESUMEN

Inmediatamente al norte de la ciudad de Salta, varios arroyos tienen sus nacientes en las laderas orientales de la Sierra de Vaqueros, cuyo piedemonte se encuentra urbanizado. La influencia del hombre sobre el ambiente serrano determina la necesidad de estimar las tasas de erosión, localizar las diferentes clases de pérdida de suelos y llevar a cabo su análisis. Se trabajó con imágenes satelitales, generándose los mapas base y temáticos necesarios de las microcuencas de los arroyos Vaqueros y Los Nogales, mediante la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esto permitió caracterizar las áreas de estudio y lograr la información necesaria para aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). Los factores R, K y LS se obtuvieron mediante adaptaciones del método, en razón de la indisponibilidad de datos establecidos por los autores. El promedio de la pérdida de suelos actual corresponde a una tasa de 47 t/ha/año para la microcuenca Vaqueros y de 45 t/ha/año para la del arroyo Los Nogales. Las diferentes categorías de erosión fueron localizadas y analizadas considerando la interacción de los factores actuantes. Para el logro de una mejor calidad ambiental, se propusieron medidas sencillas con el fin de incidir sobre los factores que pueden ser modificados.

Palabras clave: erosión hídrica, SIG, USLE, microcuencas, Sierra de Vaqueros.

Spatial distribution and analysis of soil loss over micro watersheds of Sierra de Vaqueros (Salta, Argentina) by using a GIS

ABSTRACT

Immediately north of Salta city, several streams have their sources on the eastern slopes of the Sierra de Vaqueros, whose piedemonte is urbanized. The man influence on the mountain environment makes it necessary to estimate erosion rates the location of their different erosion classes and their analysis. The work was carried out with satellite images, generating the base map and thematic maps of the Vaqueros and Los Nogales microbasins, through the use of a Geographic Information System (GIS); this allowed to characterize the study areas and to obtain the necessary information to apply the Universal Equation of Soil Loss (USLE). R, K and LS factors were obtained through adaptations of the method, due to the unavailability of data established by authors. The average of current water erosion showed a rate of 47 t/ha/year for the Vaqueros microbasin and 45 t/ha/year for the microbasin Los Nogales. The different categories of erosion were located and analyzed considering the interaction of the acting factors. For the achievement of a better environmental quality simple measures to influence the possible factors to be modified were proposed.

Keywords: hydric erosion, SIG, USLE, micro-basins, Sierra de Vaqueros.

INTRODUCCIÓN

Al norte de la ciudad de Salta, capital de la provincia homónima del noroeste argentino, se levanta la Sierra de Vaqueros, con una altitud máxima de 1980 m.s.n.m. En sus laderas orientales se originan varios arroyos de carácter torrencial que han formado conos aluviales, los que por coalescencia han generado un amplio piedemonte sobre el que se asienta el pueblo Vaqueros, cuya población es de 4994 habitantes (DGE, 2013).

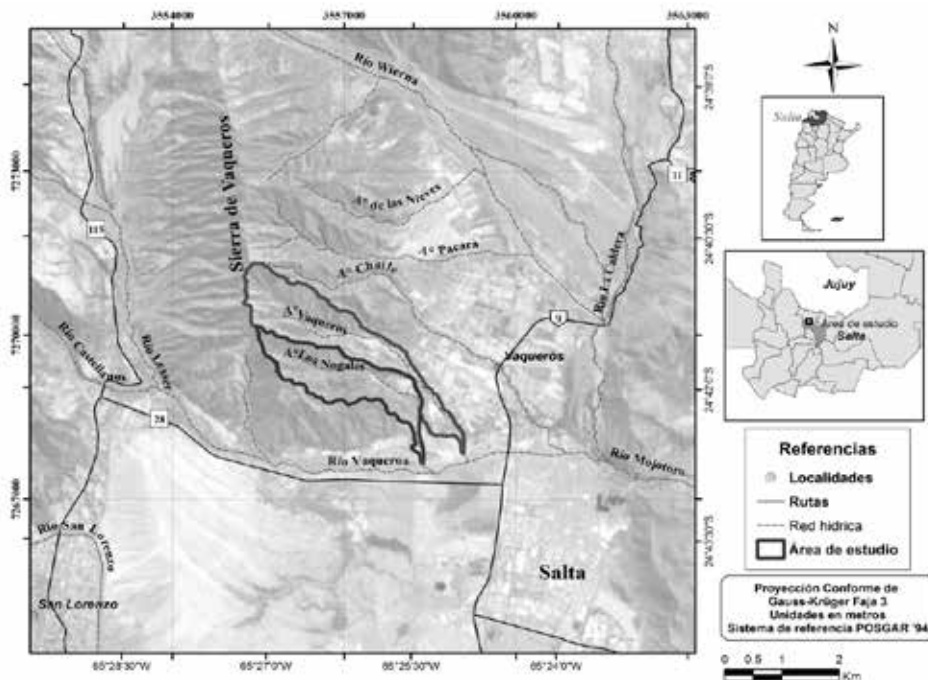
La cercanía a la ciudad de Salta y la posibilidad de morar en un área en contacto con paisajes naturales y rurales ha dado lugar a un permanente incremento de la urbanización, con la consecuente presión sobre los recursos naturales debido a la extracción de la vegetación y del mantillo vegetal, a las prácticas de ganadería extensiva y a las de agricultura en algunos sectores, carentes ambas de técnicas conservacionistas. Estos han sido condicionantes antrópicos que, en su interacción con los condicionantes naturales, han contribuido a que se manifiesten los procesos erosivos.

Los arroyos Vaqueros y Los Nogales, cuyas aguas drenan las laderas de la mencionada sierra (figura 1), entre otros, son torrentes que se manifiestan en toda su magnitud en la época estival, debido a la ocurrencia de las precipitaciones entre los meses de septiembre y marzo. Es en ese período cuando sus microcuencas ponen de manifiesto su dinámica y cuando se produce la mayor parte de la pérdida de suelos. Resulta de interés conocer su comportamiento sobre la base de sus características morfométricas e hidrológicas básicas, íntimamente relacionadas para realizar comparaciones entre cuencas, interpretar la respectiva funcionalidad hidrológica y definir estrategias para la formulación de obras y acciones para el manejo de los suelos (Aguirre, 2007).

Con el objeto de estimar la pérdida de suelos por erosión hídrica, en ambas microcuencas se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) propuesta por Wischmeier y Smith (1978). La determinación de sus parámetros requiere datos específicos fijados por los autores, no todos disponibles en los ambientes que se estudian, por lo que la aplicación de modificaciones regionales en la metodología, realizadas en un entorno SIG, posibilitó la estimación de la tasa de erosión y la localización de las diferentes clases de pérdida de suelos, con su representación espacial en los mapas temáticos pertinentes.

El análisis de los resultados obtenidos con relación a las características de los diferentes sitios de las áreas consideradas permitió elaborar propuestas de acciones y de aplicación de técnicas de mitigación de los efectos de la erosión hídrica o de recuperación de ambientes degradados, mediante el manejo de los parámetros sobre los que es factible actuar para mejorar su condición.

Figura 1. Ubicación del área de estudio



ÁREA DE ESTUDIO

Las microcuencas consideradas, yuxtapuestas entre sí, corresponden a las de los arroyos Vaqueros y Los Nogales, afluentes del río Vaqueros, el que junto con el río La Caldera forma parte de la cuenca alta del río Mojotoro, perteneciente a la megacuenca del río Bermejo.

Las mencionadas microcuencas tienen sus nacientes en las laderas orientales de la sierra de Vaquerós, en el departamento La Caldera de la provincia de Salta: la primera se ubica entre las coordenadas $24^{\circ}40'45,4''$ y $24^{\circ}42'38,3''$ Lat. S; $65^{\circ}24'57,8''$ y $65^{\circ}27'14,4''$ Long. O y la segunda entre $24^{\circ}41'23,5''$ y $24^{\circ}42'43,8''$ Lat. S y $65^{\circ}25'22,9''$ y $65^{\circ}27'11,5''$ Long. O (figura 1).

La Sierra de Vaquerós pertenece a la provincia geológica Cordillera Oriental; es un amplio anticlinal conformado por capas de la formación Piquete (González Bonorino & Abascal, 2012), Grupo Orán y Subgrupo Jujuy, en el que afloran sedimentitas terciarias. Los depósitos cuaternarios están representados por un amplio piedemonte y por terrazas fluviales altas y bajas (Chalabe, 1979), aunque estas últimas ocupan prácticamente la llanura aluvial del río Vaqueros.

El clima es cálido subhúmedo, con ocurrencia de lluvias orográficas entre los meses de noviembre y marzo. No existen registros de precipitaciones para una serie apropiada

de años en el área específica de estudio. Según estimaciones realizadas por Belmonte y Núñez (2006) a partir de registros de precipitaciones de Bianchi y Yáñez (1992) para zonas cercanas, en ambas microcuencas las precipitaciones medias anuales varían entre 780 mm y 1315 mm desde el piedemonte hacia las laderas, respectivamente. La temperatura media anual es de 16° C (Bianchi, 1996).

Fitogeográficamente, pertenece a la región neotropical, dominio amazónico, provincia de Las Yungas o selva tucumano-oranense, la que se encuentra mayormente degradada por extracción de vegetación, sobrepastoreo y compactación de suelos.

Sobre el piedemonte existe urbanización de baja densidad, conformada por casas construidas con materiales diversos en importantes lotes y algunos establecimientos en los que se cultiva algo de tabaco y se cría ganado equino, así como algo de ganado vacuno.

También se lleva a cabo la extracción de materiales para la construcción del lecho de los arroyos, particularmente del Vaqueros, lo que resulta muy notable después del período de lluvias.

METODOLOGÍA

La estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en las microcuencas de los arroyos Vaqueros y Los Nogales se realizó mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). La utilización de esta metodología precisó una serie de modificaciones debido a la falta de disponibilidad de la totalidad de los datos necesarios para el cálculo de los parámetros. Para ello se utilizaron los *softwares* de aplicación de sistema de información geográfica (SIG): Idrisi Selva y ArcGis 10.2. La generación de los mapas base se realizó a partir de la imagen satelital del LandSat 8 sensor OLI de órbita y punto 231-077 del 12 de agosto de 2016, de 15 m (pancromática) y 30 m (multiespectral) de resolución espacial y 16 bit en su resolución radiométrica, la que no requirió georreferenciación, ya que el producto cuenta con una corrección geométrica de origen. Para todas las capas se utilizó el sistema de coordenadas Gauss Krüger, faja 3, Sistema de Referencia POSGAR '94. Cada microcuenca fue aislada mediante máscaras booleanas creadas mediante digitalización, con el fin de analizar los datos y la información correspondiente para cada una de manera individual. Para caracterizar el ambiente se determinaron las unidades de cobertura aplicando el método no supervisado —CLUSTER—, utilizando las bandas correspondientes al visible, infrarrojo cercano y medio (multiespectral). Las clases resultantes representan fielmente la distribución de las unidades ambientales identificadas, las que fueron corroboradas en el campo, por lo que no se profundizó el análisis con métodos supervisados, pues no resultaron necesarios.

Las restantes capas temáticas fueron las siguientes: a) mapa de pendientes: se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) registrado por el satélite ASTER provisto por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón y la Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (METI & NASA, 2011); con la aplicación del algoritmo SLOPE se expresó en metro por metro el desnivel existente entre valores de altitud de cada pixel; b) mapa hidrográfico: se digitalizaron los flujos de agua; c) mapas relacionados con las precipitaciones: a partir del Modelo Digital de Precipitaciones Medias Anuales (MDP) para el valle de Lerma (Belmonte & Núñez, 2006) con resolución espacial de 30 m, escala aproximada 1:80.000, se generaron por correlación los MDP mensuales, y d) mapa edáfico: para determinar los suelos de las dos microcuencas se utilizó la cartografía digital de los suelos del NOA (Salta y Jujuy) disponible en formato vectorial (INTA-UNSa, 2009) a escala 1:250.000.

La elección de la USLE como metodología de estimación y análisis de pérdida de suelos obedeció a que, dado que en el área de estudio no se cuenta con todos los datos requeridos por los autores, esta permite la aplicación de adaptaciones metodológicas para el cálculo de los factores R, K y LS. Por otra parte, la USLE se encuentra ampliamente difundida en la región, lo que posibilita que los datos obtenidos sean comparables con los de otras áreas serranas estudiadas.

La descripción general de ambas microcuencas se realizó a partir de las dimensiones básicas obtenidas mediante el uso de los softwares utilizados.

Para determinar la forma, se aplicaron el Índice de Compacidad de Gravelius y la Relación de Elongación de Schumm (Vich, 1996). Con relación al escurrimiento, se calcularon el caudal máximo o escorrentía crítica y el tiempo de concentración con las fórmulas de Füller y Kirpich, respectivamente, tomadas de Mármol (2010), todas ellas desarrolladas en el cuerpo del trabajo.

La erosión actual se obtuvo mediante la USLE, de Wischmeier y Smith (1978), con las modificaciones necesarias, debido a la carencia de datos, como se especifica más adelante:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

A: Pérdida media anual de suelo (t/ha/año)

Factor R: este parámetro representa la energía cinética de la lluvia y expresa su capacidad de provocar erosión, conocida como erosividad. El modelo original requiere registros pluviográficos y valores de máxima intensidad. Ante la carencia de ellos, se aplicó el modelo de Arnoldus (1977), quien toma en cuenta los valores de precipitación de todos los meses, lo cual se conoce como Índice de Fournier Modificado (IFM) o Índice de la FAO. La ecuación general es la siguiente:

$$R = a IFM + b = 4,17 * IFM - 152 \quad (2)$$

$$IFM = \sum_{i=1}^{n=12} \frac{p_i^2}{P} \quad (3)$$

R: factor de erosividad de las lluvias (kg.mm/ha.h); a y b: coeficientes de la recta de regresión que dependen del lugar; p: precipitación media mensual (mm); P: precipitación media anual (mm)

El MDP del valle de Lerma (Belmonte & Núñez, 2006) en el que se encuentra inmersa el área de estudio permitió salvar la carencia de datos de una serie representativa de años. Dado que mediante la aplicación del IFM se obtiene un solo valor para todos los meses del año, se trabajó con los modelos de precipitación media mensual (mdp_i) y el coeficiente pluvial propuesto por Moreno, Campos y Avendaño (2010), el que permite captar las variaciones a lo largo del año sobre la totalidad del área para aplicarlas al MDP, mediante las siguientes fórmulas:

$$R = 4,17 \left[\sum_1^{12} \left(\frac{mdp_i^2}{MDP} \right) \right] - 152 \quad (4)$$

Siendo:

$$mdp_i = \frac{MDP}{12} c_i \quad (5)$$

$$c_i = \frac{p_i}{P/12} \quad (6)$$

mdp_i: modelo de precipitación media mensual; MDP: modelo de precipitación media anual; c_i: coeficiente pluvial correspondiente al mes considerado; p_i: precipitación media mensual del mes considerado; P: precipitación media anual

Factor K: factor de erodabilidad del suelo. La fórmula propuesta por la USLE requiere, entre otros, el porcentaje de arena muy fina, dato difícil de precisar puesto que no se obtiene de los análisis físicos rutinarios en los laboratorios de suelos. El cálculo de este factor se realizó utilizando la curva de determinación, que considera el diámetro medio de las partículas, propuesto por la RUSLE (Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos Revisada). Para su obtención, se aplicó la siguiente expresión plasmada en función de las relaciones establecidas por la Soil and Water Conservation Society (SWCS, 1995, citada por Villanueva, Osinaga & Chávez, 2001):

$$GM = \{[(\% a. \varnothing a)(\% L. \varnothing L)(\% A. \varnothing A)]/100\}^{1/3} \quad (7)$$

M: media geométrica; a: arcilla; L: limo; A: arena; \varnothing : diámetro medio (a = 0,001 mm
L = 0,020 mm, A = 0,10 mm)

Con el valor de la media geométrica de las partículas de cada tipo de suelo, entrando en la gráfica de determinación del factor K de la SWCS (1995, citado por Villanueva et al., 2001), se obtuvo el valor de cada uno de ellos.

Factor topográfico LS (adimensional): para el cálculo combinado de estos factores se obtuvieron los mapas de pendientes en función del MDE; se aplicó la fórmula de Aguiló Bonnin (1984, citado por Gómez Lora, 2012):

$$LS = (\lambda/22,1)^m (S/0,09)^{1,3}$$

LS: factor topográfico; λ : longitud de la pendiente; S: grado de la pendiente expresado en m/m; m: coeficiente influenciado por la pendiente (m = 0,2 si S < 1%; m = 0,3 si S: 1-3%; m = 0,4 si S: 3-5%; m = 0,5 si S: 5-20%; m = 0,6 si S > 20%).

El valor de la longitud de pendiente L se tomó de Castro Mendoza (2013), resultando ser el valor del lado del píxel (30 m), el que constituye la unidad de análisis. A partir del MDE de la microcuenca, el software generó el mapa de pendientes expresado en m/m. Ingresando la fórmula a la calculadora de mapas del programa, se obtuvo el correspondiente con los valores del factor LS para cada uno de los píxeles que lo conformaron.

Factor C: es el factor de cultivo y cobertura vegetal (adimensional). Para su determinación se obtuvo, a partir de las bandas del rojo e infrarrojo cercano de la imagen satelital, el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI); asimismo, se verificaron a campo los tipos de cobertura, las que se valoraron a partir de las tablas de Wischmeier.

Factor P: corresponde a las prácticas agrícolas que se estuvieren realizando en el área de estudio. En terrenos con pendiente, las técnicas de manejo de suelos conservacionistas, tales como cultivos en curvas de nivel, cultivos en terrazas o en franjas, entre otros, contribuyen al control de la erosión (Wischmeier & Smith). Debido a que, consecuentemente, dichas técnicas disminuyen las pérdidas de suelos, P adquiere un valor menor que 1; si no se aplican técnicas de este tipo, a P se le asigna el máximo valor, igual a 1.

DESARROLLO Y RESULTADOS

Características de las microcuencas de estudio

Los arroyos objeto del presente trabajo son de tipo torrencial; depositan sus aguas en épocas de lluvias en el río Vaqueros, el que fluye en sentido O-E (Figura 1). El A° Los Nogales, con igual orientación en su cuenca alta, al encontrarse con el depósito de piedemonte al que contribuye con los sedimentos que acarrea, despliega un amplio giro para tomar rumbo N-S, registrándose pérdida del fluido por insumisión entre sedimentos caóticos gruesos antes de su desembocadura en el río Vaqueros. Por su parte, el A° Vaqueros fluye en sentido NO-SE. Ambos arroyos atraviesan terrazas fluviales altas en sus cuencas medias.

Dimensiones básicas

Los parámetros básicos de las microcuencas en estudio se registran en la tabla 1.

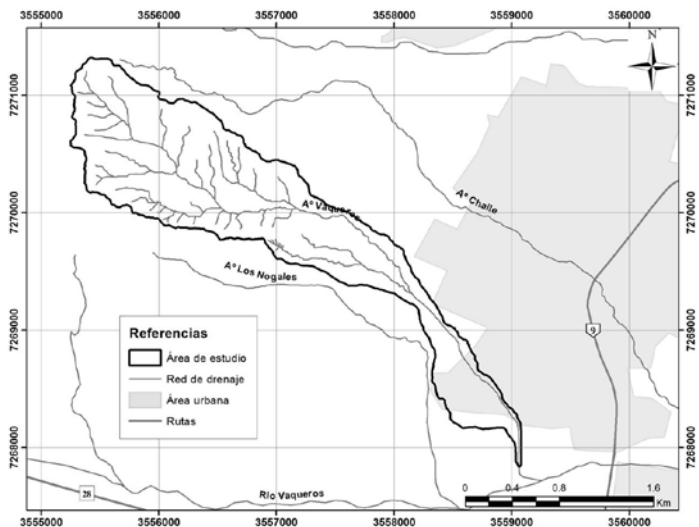
Tabla 1. Dimensiones básicas de las microcuencas de los arroyos Vaqueros y Los Nogales

Parámetro	Microcuenca Vaqueros	Los Nogales
Área (km ²)	2,86	2,22
Perímetro (km)	12,28	11,65
Ancho (km)	0,57	0,58
Longitud de cuerda (km)	4,99	3,83
Longitud del cauce principal (km)	5,76	4,86
Cota máxima (m.s.n.m.)	1.854	1.729
Cota mínima (m.s.n.m.)	1.237	1.250
Desnivel (m)	617	479
Pendiente media del cauce principal (%)	11	10

El parámetro morfológico básico lo constituye el área, que en ambos casos es inferior a 10 000 hectáreas, aspecto que permite definirlos como microcuencas (Sánchez Barrios, 1995).

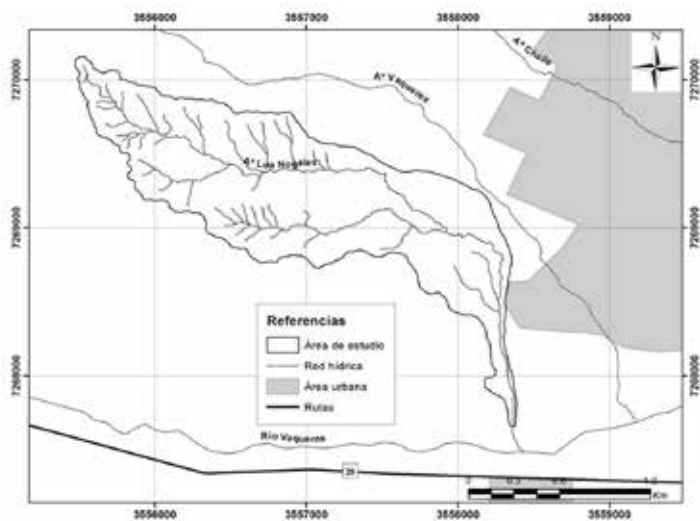
La microcuenca Vaqueros tiene un patrón de drenaje subparalelo dendrítico (figura 2), en tanto que la del arroyo Los Nogales (figura 3) es subparalelo (Aguilera, 2017).

Figura 2. Red de drenaje de la microcuenca del arroyo Vaqueros. Digitalización realizada sobre la imagen satelital



Ambos tipos de drenaje son erosionales y responden a controles estructurales, siendo notable el control topográfico en la microcuenca del arroyo Los Nogales (figura 8, der.)

Figura 3. Red de drenaje de la microcuenca del arroyo Los Nogales, obtenida por digitalización de la imagen satelital



Forma

Los índices morfométricos clásicos permitieron determinar el comportamiento esperable de las microcuencas frente a las crecidas, dando los siguientes resultados:

Tabla 2. Índices morfométricos

Índice	Formulación	Microcuenca Los Nogales		Microcuenca Vaqueros	
		Valor	Forma	Valor	Forma
Kc	$0,2821 \frac{P_u}{\sqrt{A_u}}$	2,21	Rectangular oblonga a casi rectangular	2,05	Rectangular oblonga a casi rectangular
Re	$\frac{1,1284 Au^{0,5}}{L}$	0,35	Muy alargada	0,33	Muy alargada

Kc: índice de compacidad de Gravellius; Pu: perímetro de la cuenca (km), Au: área de la cuenca (km²); Re: relación de elongación de Schumm, L: longitud del cauce principal (km)

Los valores que toman los diferentes índices determinan que las respectivas formas de las microcuencas se corresponden con tiempos de concentración más prologados, comparadas con cuencas cuyas formas tienden a ser circulares.

Escurrimiento

Del total de agua de lluvia que llega al suelo, parte infiltra y parte escurre sobre la superficie, por lo que el agua de escurrimiento constituye el excedente de las lluvias que, al no haber penetrado en el suelo, queda disponible para fluir por sobre el terreno. Ello depende por un lado de la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación, y por otro, de tres condicionantes naturales que pueden predisponer el área para la pérdida de suelos: la topografía, la presencia y características de la vegetación y la permeabilidad y saturación del suelo (FAO, 2013).

Caudal máximo o escorrentía crítica

La máxima escorrentía que puede ocurrir en un área afectada por precipitaciones en un tiempo determinado se conoce como escorrentía crítica o caudal máximo (Suárez de Castro, 1979). Su conocimiento es primordial para realizar obras de ladera con el propósito de mitigar o controlar el escurrimiento superficial y, por lo tanto, la erosión hídrica (Lemus & Navarro, 2003). Para calcularla, se aplicó la fórmula de Füller (Mármol, 2010):

$$Q_{\text{máx}} = N 0,013 A^{0,8} (1 + 0,8 \log T)(1 + 2,66 A_u^{-0,3})$$

Au: área de la cuenca (km²); N: constante igual a 70 para 100 años de retorno e igual a 100 para 1.000 años de retorno; T: número de años de retorno

Para cien años de retorno, el caudal máximo para la microcuenca del arroyo Vaqueros se estimó en 16 m³/s y en 14 m³/s para la microcuenca del arroyo Los Nogales.

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda en llegar una gota de lluvia caída en el punto más alejado hidráulicamente de la cuenca al punto de cierre. A partir de ese momento, toda el agua que drena la cuenca aporta al caudal en el punto de salida. En el caso de una lluvia de intensidad constante, es el tiempo necesario para que se alcance el caudal máximo (Bentancor, Silveira & García Petillo, 2014).

Se supone que la precipitación se distribuye uniformemente en toda la cuenca y que el tiempo de duración de la lluvia es, como mínimo, igual al tiempo de concentración. Para calcularlo, se aplicó la fórmula de Kirpich (Mármol, 2010):

$$t_c = 0,02 L^{0,77} S^{-0,385}$$

tc: tiempo de concentración (minutos); L: longitud del cauce principal (m); S: pendiente (m/m)

Los valores obtenidos fueron de 37 min para la microcuenca del arroyo Vaqueros y de 34 min para la del arroyo Los Nogales.

Erosión hídrica

La erosión hídrica es un proceso mediante el cual se produce la pérdida selectiva de materiales del suelo (FAO, 1977), los que son arrastrados por el escurrimiento superficial.

Para su estimación mediante la aplicación de la USLE se definieron los diferentes factores de la forma que se explica:

Factor de erosividad de las lluvias (R)

A partir del MDP anual y a los mdp mensuales obtenidos para cada microcuenca sobre la base de las ecuaciones (5) y (6), se generaron los mapas del factor R, píxel por píxel (figuras 4 y 5).

Para su cálculo se ingresó la ecuación (4) a la calculadora de mapas del programa utilizado.

Figura 4. Distribución de los valores de erosividad de las lluvias (factor R) de la microcuenca del arroyo Vaqueros

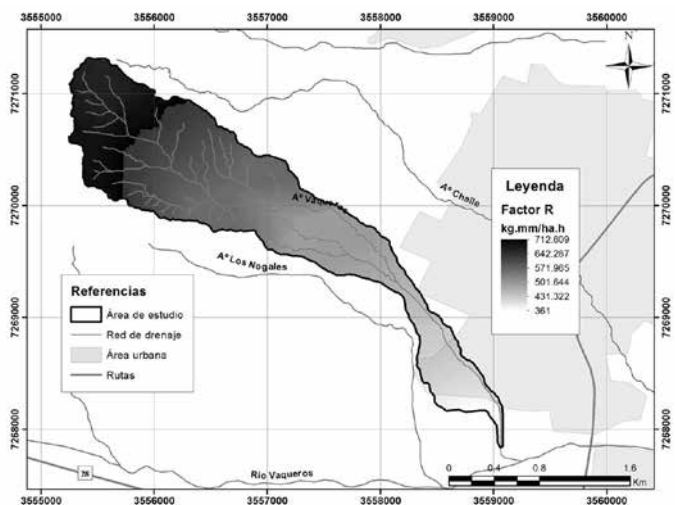
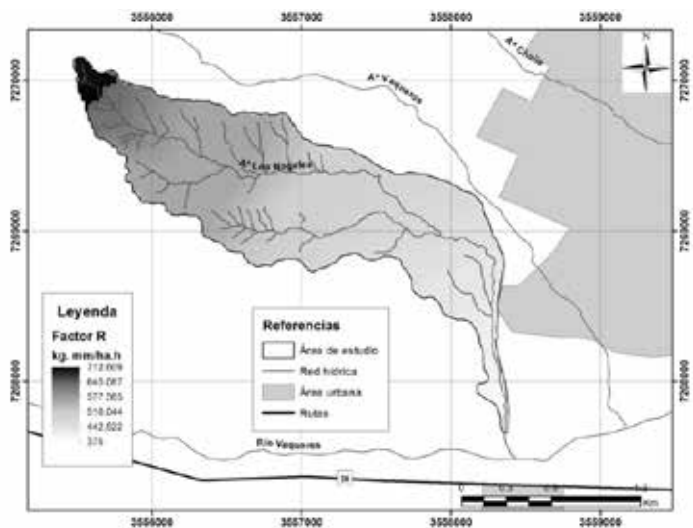


Figura 5. Distribución de los valores del factor R de la microcuenca del arroyo Los Nogales



Según la escala de valoración de la FAO (1980) que se registra en la tabla 3, el 68,2% de la superficie de la microcuenca Vaqueros (figura 4) tiene un alto grado de erosividad de las lluvias, con valores que se distribuyen entre aproximadamente 500 y 713 kg.mm/ha.h; el resto (31,8%) corresponde a un grado moderado, entre 360,8 y 500 kg.mm/ha.h, siendo su promedio ponderado de 599,17 kg.mm/ha.h.

La microcuenca del arroyo Los Nogales (figura 5) presenta una situación semejante. Con un promedio ponderado de 513,50 kg.mm/ha.h, el 50,2% de su superficie tiene un alto grado de erosividad pluvial, con iguales valores que en la microcuenca aledaña (500 y 713 kg.mm/ha.h) y el 40,8%, un grado moderado (entre 381,4 y 500 kg.mm/ha.h).

En ambas microcuencas, la erodabilidad de las lluvias disminuye gradualmente desde las respectivas cabeceras hasta sus desembocaduras.

Tabla 3. Escala de valoración de la erosividad de las precipitaciones (R)

Factor R	Grado
0 - 50	Ligero
50 - 500	Moderado
500 – 1.000	Alto
> 1.000	Muy alto

Fuente: FAO, 1980.

Factor de erodabilidad del suelo (K)

Para determinar la predisposición de los suelos a ser erosionados, se utilizó la cartografía digital georreferenciada de INTA-UNSa (2009).

En ambas microcuencas, las asociaciones de suelos existentes son San Alejo (Saj), Vaqueros (Va) y Mojotoro (Mj), teniendo nombres homónimos los respectivos suelos dominantes. Las clasificaciones internacionales de FAO y de la USDA (Departamento de Agricultura de EE.UU.) se registran en la tabla 4, en tanto que las superficies correspondientes a cada microcuenca, en la tabla 5.

Tabla 4. Valores del factor K para cada tipo de suelo

Suelo	FAO	USDA			
		Orden	Suborden	Gran grupo	Subgrupo
Saj	Regosol éútrico	Inceptisol	Udepte	Distrudepte	Distrudepte Típico
Va	Fluvisol éútrico	Entisol	Orthente	Udorthente	Udorthente Típico
Mj	Fluvisol éútrico	Entisol	Orthente	Ustorthente	Ustorthente Lítico

Fuente: INTA-UNSa, 2009.

Tabla 5. Extensión de cada tipo de suelo en cada microcuenca

Suelo	Microcuenca Vaqueros		Microcuenca Los Nogales	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Saj	248	86,3	214	75
Va	38	13,4	4	1
Mj	1	0,3	4	1

Los suelos Saj son de textura franco arcillosa, con bloques subangulares, finos y débiles, y los suelos Va, de textura francolimoso con presencia de un 5% de gravilla muy fina y bloques subangulares medios, moderados. Por su parte, los suelos Mj tienen textura franca y son friables, no plásticos ni adhesivos. Las profundidades del horizonte superficial son de 26, 21 y 30 cm, respectivamente (figuras 6 y 7).

Aplicando la ecuación (7) se obtuvo el diámetro medio de las partículas para cada suelo (tabla 6). Ingresando con cada valor de la media geométrica al gráfico de determinación del factor K de la SWCS (1995, citado por Villanueva, et al., 2001) se obtuvieron los valores de erodabilidad de los suelos presentes en ambas microcuencas (tabla 6):

Tabla 6. Cálculo de la media geométrica y valor del factor K para cada tipo de suelo

	Suelos Vaqueros (Va)		Suelos San Alejo (Saj)		Suelos Mojotero (Mj)	
	%	% * diám medio	%	% * diám medio	%	% * diám medio
Arcilla	20,6	0,001 mm	35,6	0,001 mm	8	0,001 mm
Limo	45,9	0,020 mm	31,8	0,020 mm	44	0,020 mm
Arena	33,5	0,100 mm	32,6	0,100 mm	48	0,100 mm
Media geométrica	0,08588518		0,09037360		0,06965270	
Factor K	0,25		0,24		0,27	

La incorporación de los valores de K en los mapas de suelos de cada una de las microcuencas generó las siguientes capas (figuras 6 y 7):

Figura 6. Distribución de los valores del factor K de cada tipo de suelo en la microcuenca del arroyo Vaqueros

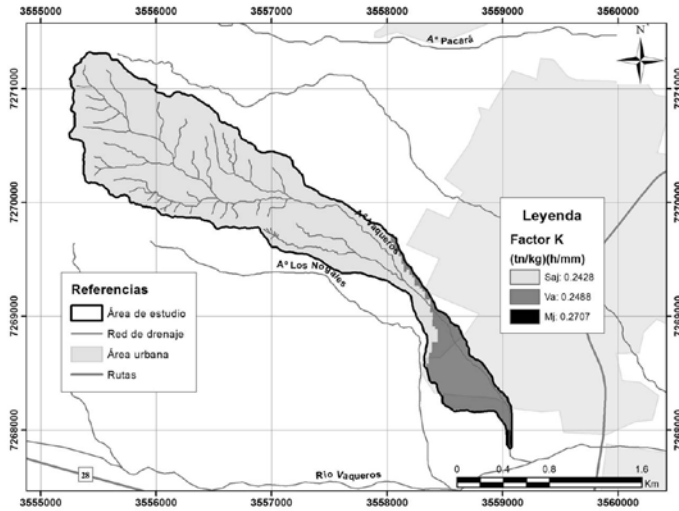
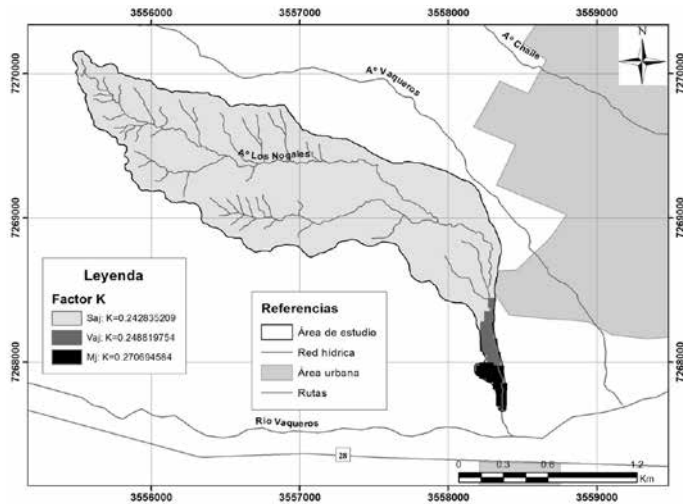


Figura 7. Distribución de los valores del factor K de cada tipo de suelo en la microcuenca del arroyo Los Nogales



Según la tabla 7, los valores obtenidos (0,25-0,45) del factor K se corresponden con las texturas medias en los tres tipos de suelos y pueden verse afectados por un moderado grado de erodabilidad, lo que se manifiesta a través de una también moderada susceptibilidad al escurrimiento.

Tabla 7. Valores de K según las texturas del suelo

Textura	K	Grado	Motivo
Finas (alto cont. de arcilla)	0,05 - 0,15	Bajo	Resistencia al desprendimiento
Gruesas (arenosos)	0,05 - 0,20	Bajo	Escaso escurrimiento
Medias (francos)	0,25 - 0,45	Moderado	Mod. susceptibilidad al escurrimiento
Limosas (alto cont. de limo)	0,45 - 0,65	Alto	Susceptibilidad a la erosión (encostramiento y alto escurrimiento)

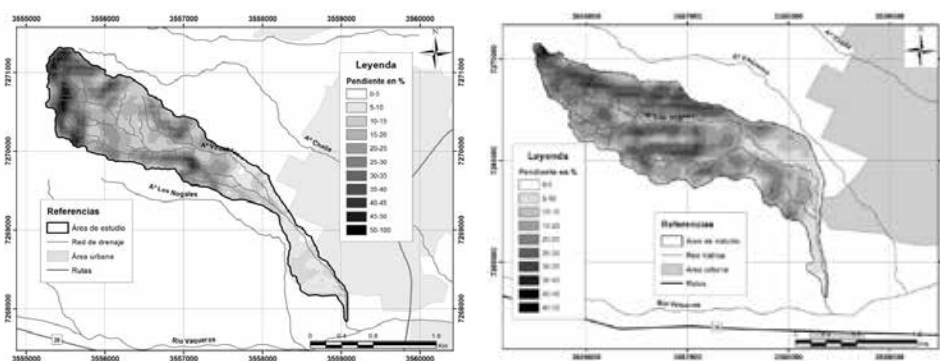
Fuente: SWCS (1995, citado por Villanueva et al., 2001).

Factor topográfico (LS)

Este factor está integrado por el desnivel del terreno (S) y su longitud (L), cuyos efectos se manifiestan en conjunto dado que, por un lado, al incrementar la inclinación de la superficie aumenta la velocidad de la escorrentía superficial y, por ende, la energía cinética del agua, y por el otro, al ser mayor la longitud del terreno se intensifica dicha escorrentía, incrementando el volumen de agua, trayendo como consecuencia una mayor cantidad de suelo que se pierde por erosión hídrica (FAO, 2000).

Para la USLE (Wischmeier & Smith, 1978), la tasa de erosión aumenta a medida que aumenta la longitud y el grado de la pendiente.

Figura 8. Mapas de pendientes expresadas en porcentajes de las microcuencas de los arroyos Vaqueros (izq.) y Los Nogales (der.)

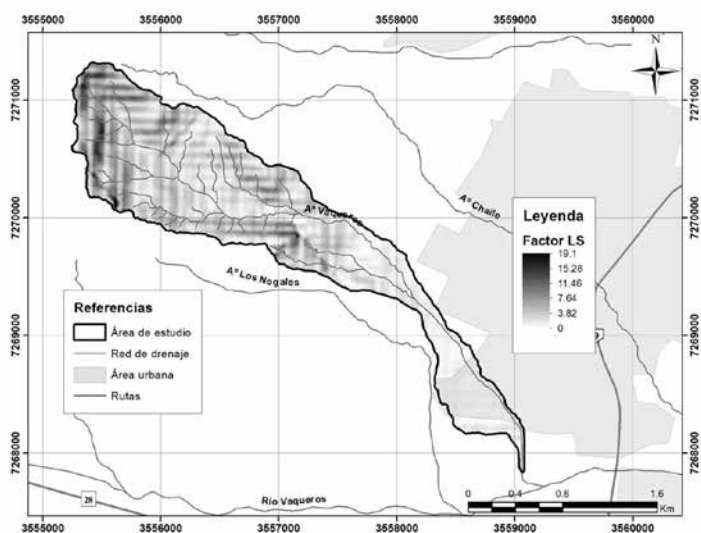


Teniendo en cuenta que con la metodología aplicada se obtiene el factor LS para cada píxel y que, sobre la base de Castro Mendoza (2013) su longitud es constante (30 m en este caso), bajo los conceptos vertidos precedentemente es de esperarse una predisposición topográfica a la erosión en la microcuenca del arroyo Vaqueros algo

mayor que la del arroyo Los Nogales, dado que las pendientes se distribuyen entre 0 y 77% en la primera, en tanto que entre el 0 y el 67% en la segunda, aunque estando escasamente representados los desniveles por encima del 45% (figura 8).

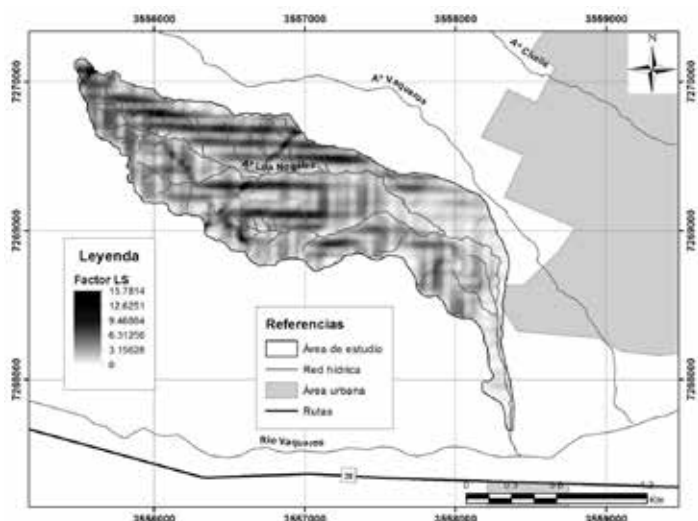
Utilizando los mapas de pendientes de ambas microcuencas se incorporó la fórmula (8) a la calculadora de mapas, con los valores de S expresados en m/m, obteniéndose las figuras 9 y 10.

Figura 9. Valores del factor topográfico (LS) en la microcuenca del arroyo Vaqueros



Con un promedio de 9,55 en la microcuenca Vaqueros (figura 9), los valores del factor varían entre 0 y 19,1, registrando los mayores de estos en su cabecera, la que manifiesta topografía erosiva, sin llegar a ser extrema debido a que los valores muy altos están escasamente representados; por su parte, los bajos se distribuyen en forma continua en la base de las vertientes y en el piedemonte.

Figura 10. Distribución de los valores del factor topográfico en la microcuenca del arroyo Los Nogales



En la microcuenca Los Nogales (figura 10), el factor LS se distribuye entre 0 y 15,78, con un promedio de 7,89. Sobre la mayor extensión de los cauces y en sus márgenes prevalecen los valores bajos principalmente, en tanto que los más altos se concentran en las nacientes del arroyo, en espacios que ocupan principalmente los flancos orientados tanto al norte como al sur de la quebrada atravesada por el cauce del flujo principal, pero con mayor concentración en estos últimos y en los sectores altos del afluente de mayor longitud.

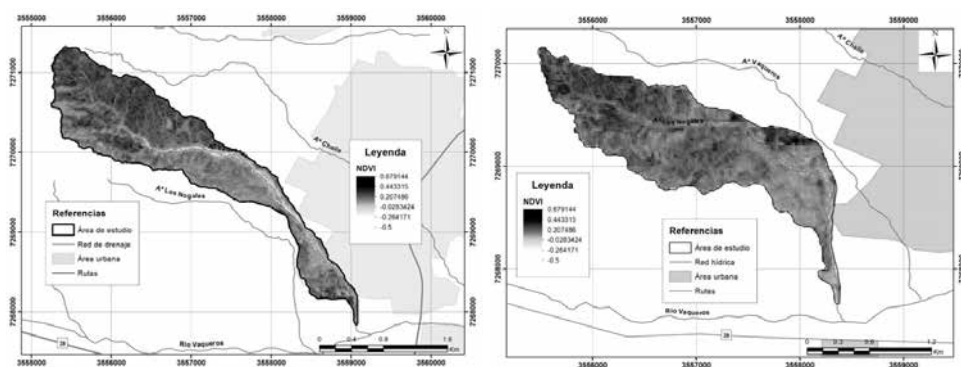
Si se comparan los mapas de distribución del factor LS (figuras 9 y 10) con los respectivos mapas de pendientes de ambas microcuencas (figura 8), se puede inferir la importancia que tiene este último parámetro en la predisposición a la erosión.

Factor cultivo y cobertura vegetal (C)

En las microcuencas estudiadas se desarrollan especies típicas de la provincia fitogeográfica de Las Yungas o selva tucumano-oranense. A raíz de la ocupación del área por el hombre y de su influencia directa o indirecta, hay sectores que se encuentran modificados o deteriorados.

Para elaborar los mapas de este factor, para cada microcuenca se calculó el NDVI, que asume valores dentro del intervalo comprendido entre -1,0 y 1,0, y se generaron las imágenes correspondientes (figura 11).

Figura 11. Distribución de los valores del NDVI en la microcuenca de los arroyos Vaqueros (izq.) y Los Nogales (der.)



El rango de valores del NDVI para ambas microcuencas se encuentra entre -0,5 y 0,68, lo que indica sectores con muy baja o nula cobertura vegetal y espacios con protección vegetal densa, pero en ningún caso del 100%. Los valores negativos son más notables sobre el cauce del arroyo Vaqueros.

El análisis de los mapas incluidos en la figura 11 y los trabajos de campo permitieron diferenciar cinco clases de cobertura vegetal.

Bosque denso. Se desarrolla principalmente sobre laderas húmedas de exposición sur. Con cobertura vegetal de aproximadamente el 70%, está conformado principalmente por nogal criollo (*Juglans australis*), laurel del cerro (*Cinnamomum porphyrium*), cedro (*Cedrela lilloi*), ceibo salteño (*Erythrina falcata*), algunos matos (*Myrciantes sp.*) y cochucho (*Fagara coco*); en algunas áreas, aliso del cerro (*Alnus acuminata*) y ejemplares de sauco (*Sambucus nigra ssp. peruviana*). Es importante destacar el sotobosque constituido por especies de arbustos y árboles de bajo porte, entre las que se destacan el chalchal (*Allophylus edulis*), la falsa papaya (*Carica quercifolia*) y el tala trepador (*Celtis iguanea*); abundantes helechos, hongos, musgos, líquenes y restos vegetales completan la cubierta vegetal del suelo.

En las partes bajas de las microcuencas, las especies son tipa blanca (*Tipuana tipu*), cebil colorado (*Anadenanthera colubrina var. cebil*), horco cebil (*Parapiptadenia excelsa*), escasos pacarás (*Enterolobium contortisiliquum*), algunos jacarandáes (*Jacaranda mimosoidea*), lecherón (*Sapium haemospermum*), guarán amarillo (*Tecoma stans*), con sotobosque conformado por especies características del matorral alto, tales como chalchal, tala blanco (*Duranta serratifolia*), carica, *Schinus sp.* y *Celtis sp.*

Bosque ralo. Constituye un bosque degradado integrado por las mismas especies que la clase anterior, con presencia de ejemplares arbóreos jóvenes que actúan como sotobosque.

Matorral alto. Está constituido por arbustos altos. Se encuentran varias especies del género *Eupatorium*; también se encuentran tala blanco (*Duranta serratifolia*), alfilerillo (*Barnadesia odorata*), cabello de ángel (*Clematis haenkeana*), varias especies de *Solanum* sp., entre ellas, revientacaballos (*Solanum sisymbriifolium*); sobre las laderas, *Cnicothamnus lorentzii* (azafrán del cerro); sobre las márgenes del cauce, *Tessaria integrifolia*; también elementos chaqueños como *Acacia caven*, *Acacia aroma*, además de *Celtis* sp, *Schinus* sp. Como especies invasoras se encuentran trementina *E. bupleuiriifolium* y como exóticas, pasto cubano (*Tithonia tubaeformis*). En algunos sitios de las partes altas hay bosquesillos aislados de nogal criollo con laurel del cerro, ceibo salteño, cochucho, chalchal; en las partes bajas son de tipa blanca con cebil colorado, horco cebil, lecherón, chalchal, yuchán (*Ceiba chodatii*), uña de gato (*Macfadyena unguis-cati*) como elementos de selva de transición y en las márgenes de los arroyos sauce criollo (*Salix humboldtiana*) y *Eucaliptus* sp., esta última, también como especie exótica.

Matorral bajo. Se encuentran especies como *Solanum hieronymi*, *Solanum* sp., *Conyza* sp., *Solidago* sp., *Clematis haenkeana*, *Cestrum parquii* (hediondilla), *Zinnia peruviana* (chinita), *Bidens pilosa*, pastizales de los géneros *Aristida*, *Setaria*, *Paspalum*, *Panicum*, entre otros.

Entre los arbustos altos, con menor frecuencia que en la clase anterior, *Eupatorium* sp., *Baccharis* sp. y alfilerillo; como exponentes chaqueños que ocupan áreas degradadas, *Acacia caven* (churqui) y *Acacia aroma* (tusca). Asimismo, se encuentran individuos arbóreos aislados.

Cauce de arroyo o suelo desnudo. Son áreas con cobertura vegetal muy escasa o ausente.

En los diferentes espacios, la cubierta vegetal intercepta las gotas de lluvia, disminuyendo su energía cinética y, por ende, su impacto sobre el suelo, lo cual depende de la altura desde la que cae (García-Fayos, 2004). En cualquiera de las unidades de vegetación, toda materia orgánica que se desarrolla o está depositada sobre el suelo forma una alfombra protectora muy importante.

En el caso de los bosques, es importante destacar que además de la masa arbórea, cubren también los suelos arbustos, hierbas, enredaderas, helechos, musgos, pastos y, además, partes o remanentes de vegetación, tales como hojarasca, ramas de diversos tamaños, materia orgánica en descomposición, etc., todo lo cual amortigua la caída del agua, favorece la infiltración y disminuye la escorrentía.

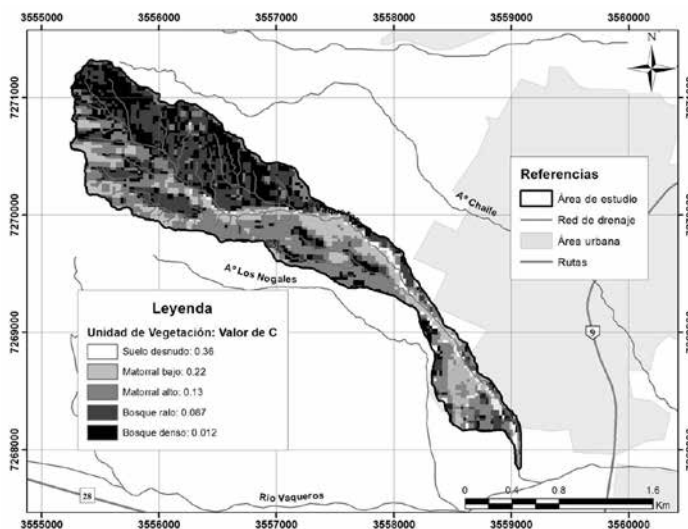
A partir de los valores propuestos por Wischmeier y Smith (1978), el estudio, la caracterización y el análisis de la vegetación realizada en ambas microcuencas, se determinó que el factor C adquiriese los valores que se registran en la tabla 8.

Tabla 8. Valores del factor C

Cobertura vegetal	Valor de C
Cauce de arroyo o suelo desnudo	0,36
Matorral bajo con pastizal	0,22
Matorral alto con bosque ralo	0,13
Bosque ralo	0,09
Bosque denso	0,01

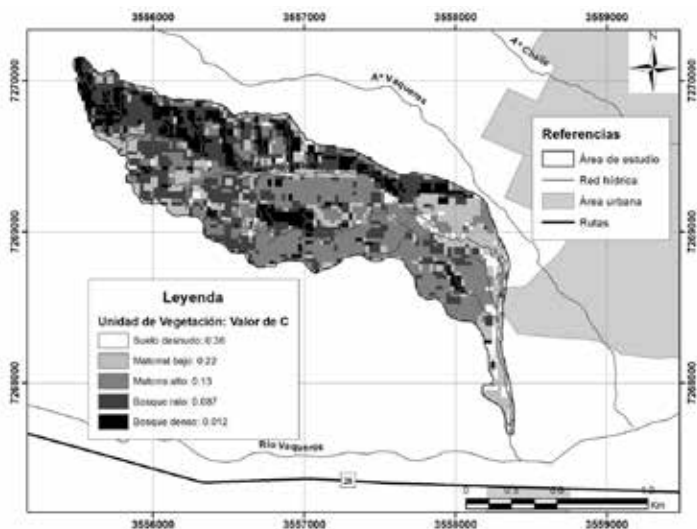
La reclasificación de los respectivos mapas de cobertura del suelo con los valores asignados arrojó las figuras 12 y 13.

Figura 12. Distribución de los valores de erosividad de los suelos en función de la vegetación en la microcuenca del arroyo Vaqueros



En el 31% del área de la microcuenca Vaqueros (figura 12) se desarrolla el matorral alto; el bosque denso ocupa el 24%, distribuido mayormente sobre laderas de exposición sur en la parte alta de la cuenca y el bosque ralo, derivado del anterior; el 25%, en espacios contiguos a este último. En el 16% del total de la superficie se distribuye el matorral bajo, en tanto que solo el 3% corresponde a suelo desnudo o a escasa cubierta vegetal.

Figura 13. Distribución de los valores del factor C en la microcuenca Los Nogales



En forma bastante semejante, en la microcuenca Los Nogales (figura 13) el matorral alto cubre el 34% de ella; el bosque denso, desarrollado sobre laderas de exposición sur, ha sido objeto de una importante reducción, ocupando solo el 15% del área total, en tanto que el bosque ralo se manifiesta en el 27% y el matorral bajo en el 20%. El 4% restante corresponde a la clase más desprotegida, sobre el cauce del arroyo.

Factor prácticas agrícolas (P)

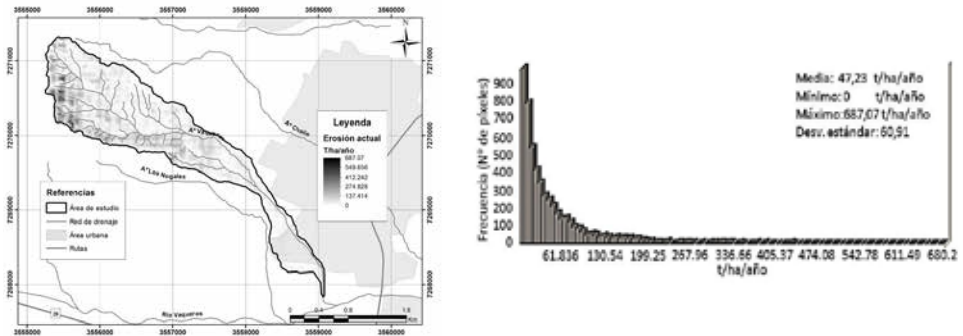
En el área de estudio, las actividades agrícolas que se llevan a cabo carecen de técnicas conservacionistas; consecuentemente, el factor P no contribuye a disminuir los valores de pérdida de suelos generada por el resto de los parámetros actuantes, por lo que se le asignó el valor 1.

Erosión actual

El producto de los seis factores que conforman la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos dio como resultado los valores que se consignan en las figuras 14 y 15, píxel por píxel.

En la microcuenca Vaqueros (figura 14, izq.) la tasa de erosión se distribuye en un rango de 0 a 687 t/ha/año, correspondiendo este valor a un solo píxel.

Figura 14. Izq.: distribución de los valores de erosión en la microcuenca del arroyo Vaqueros; der.: histograma que representa la distribución de la tasa de erosión en t/ha/año (eje x) en función de la frecuencia (número de píxeles; eje y)



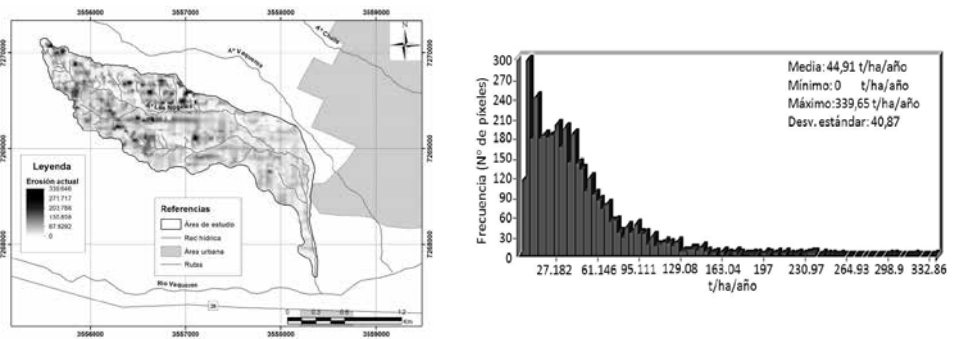
En la figura 14 (der.) puede observarse el histograma generado por la capa de erosión actual en la que se visualiza que no todos los valores elevados están representados en el terreno o lo están muy escasamente.

El promedio de pérdida de suelos es de 47 t/ha/año.

En la microcuenca del arroyo Los Nogales la erosión toma valores de entre 0 y 399,6 t/ha/año (figura 15, izq.); la tasa de erosión en promedio es de 45 t/ha/año.

En el histograma generado (figura 15, der.) puede observarse la elevada frecuencia de pérdida de suelos entre 10 y 50 t/ha/año, siguiéndole en importancia el rango de entre 50 y 100 t/ha/año.

Figura 15. Izq.: Distribución de los valores de pérdida de suelos en t/ha/año en la microcuenca del arroyo Los Nogales; der.: Histograma en el que puede observarse la distribución de la tasa de erosión en t/ha/año (eje x) en función del número de píxeles (eje y). Obsérvese la elevada frecuencia entre 10 y 50 t/ha/año



Las diferentes clases de erosión se distribuyen según la tabla 9.

Tabla 9. Evaluación de la degradación de suelos

Pérdida de suelos (t/ha/año)	Nivel de degradación
<10	Ninguna o ligera
10 - 50	Moderada
50 - 100	Acusada
100 - 200	Alta
>200	Muy alta

Fuente: FAO - PNUMA - Unesco (1980).

La reclasificación realizada con los valores de la tabla 6 en cada una de las áreas de estudio dio como resultado la zonificación de las diferentes categorías de erosión (figuras 16 y 17).

La superficie en la que ocurre cada clase de pérdida de suelos se registra en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Distribución de las clases de erosión hídrica por superficie en la microcuenca del arroyo Vaqueros

Erosión actual	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Ninguna o ligera	75,66	26
Moderada	123,76	43
Acusada	50,25	18
Alta	29,16	10
Muy alta	7,79	3

Erosión alta y muy alta. En la cabecera de la microcuenca Vaqueros (figura 16) y sobre vertientes norte del sector serrano, estas clases de erosión abarcan el 13% del espacio físico y se encuentran favorecidas por la elevada erosividad de las lluvias y el también elevado factor topográfico en áreas en las que la vegetación presenta media y baja cobertura vegetal.

Erosión acusada. Se registra en el 18% del área, en espacios aledaños a los de elevada erosión. Esta clase responde a altos valores de erosividad de las precipitaciones y de la topografía en terrenos ocupados por matorrales con vegetación arbórea dispersa y con cubierta vegetal inferior al 50%. Es de esperarse que, de no frenar el deterioro, las condiciones de esta categoría empeoren, pasando a ampliar los terrenos ocupados por las clases altas de pérdidas de suelos.

Erosión moderada. Corresponde al 43% del área. En la cabecera y en algunos sectores aislados, los efectos altamente erosivos de los factores R y LS son menguados por la presencia de bosques densos desarrollados sobre suelos franco arcillosos; a menores altitudes, aún altos valores de erosividad pluvial se encuentran compensados por una topografía menos agresiva pero fundamentalmente por la existencia de bosques que, aunque ralos o jóvenes, tienen una cobertura del orden del 50% al 70%. Su función protectora frente al impacto de la gota de lluvia tiene gran relevancia.

Erosión nula o ligera. Se localiza en el 26% de la microcuenca. En la parte alta, sobre laderas de exposición sur, frente a valores altos de los factores R y LS y moderado grado de erosividad del factor K, la protección del suelo por los bosques densos manifiesta su efecto positivo. La parte baja de la cuenca se encuentra favorecida por pendientes nulas a suaves, con moderados valores de erodabilidad del factor pluvial.

Tabla 11. Distribución de las clases de erosión hídrica por superficie en la microcuenca del arroyo Los Nogales

Erosión actual	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Ninguna o ligera	32,53	14,66
Moderada	118,29	53,30
Acusada	52,08	23,46
Alta	16,35	7,37
Muy alta	2,71	1,22

En la microcuenca Los Nogales (figura 17), la interacción de los factores actuantes determina lo siguiente:

Erosión alta y muy alta. Las pérdidas de suelos de entre 100 y más de 200 t/ha/año se registran en el 8% de la superficie, ocupando pequeños y aislados espacios, siendo mínima la segunda clase mencionada. Sin embargo, es importante considerar la ocurrencia de estas categorías, ubicadas mayormente sobre laderas de exposición norte.

Erosión acusada. Con relación a la cuantía de la pérdida de suelos, le sigue en importancia a la categoría anterior, abarcando el 23% del espacio total y siendo su localización dispersa. Este tipo de pérdida de suelos es el resultado de la combinatoria de altos y moderados valores del factor R y medios del factor LS sobre suelo de textura franco arcillosa, en el que se desarrollan matorrales con bosquecillos aislados de especies arbóreas con cubierta vegetal dentro de un rango de 30% a 50%.

Figura 16. Distribución espacial de las clases de erosión en la microcuenca del arroyo Vaqueros

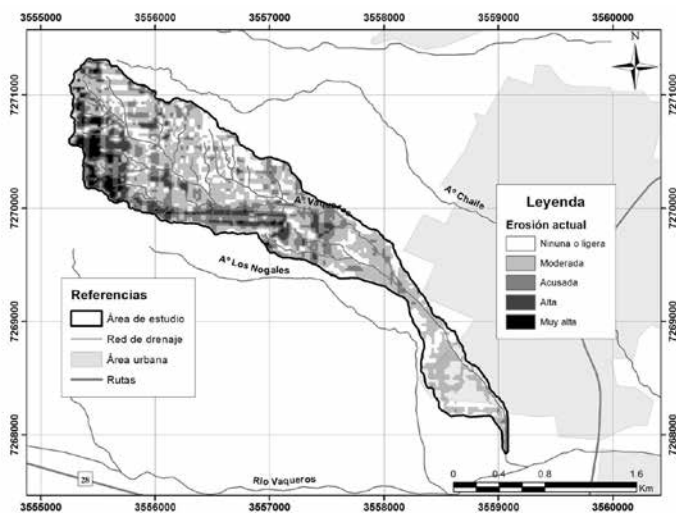
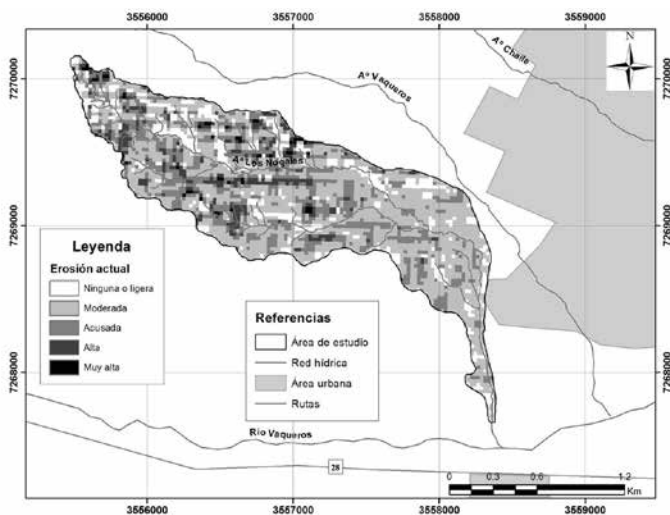


Figura 17. Distribución de las clases de erosión en la microcuenca del arroyo Los Nogales



Erosión moderada. Abarca el 53% del área. Si bien la vegetación está conformada por matorrales altos en algunos sitios y bajos en otros, con vegetación arbórea dispersa y cobertura vegetal inferior al 50%, la combinación de alta o moderada erosividad de las lluvias y bajos valores del factor topográfico favorece a los suelos. Esta clase se distribuye en las partes media y baja de la cuenca.

Erosión nula o ligera. Se concentra en el 15% del área, fundamentalmente en los espacios ocupados por bosques densos que se desarrollan sobre laderas de exposición sur, sin que el efecto negativo de valores del resto de los factores intervinientes sea significativo.

En ambas microcuencas predomina la erosión moderada, con pérdidas de entre 10 y 50 t/ha/año.

PROPUESTAS DE MEDIDAS CORRECTORAS

Considerando los parámetros morfométricos e hidrológicos obtenidos para las microcuencas y la proximidad entre ellas, se puede inferir que existe un comportamiento similar, por lo que para frenar los avances de la erosión o para tratar de mitigar o revertir sus efectos las propuestas de manejo se pueden aplicar en ambas áreas de estudio, pudiéndose actuar directamente a través de medidas no estructurales sobre los factores C y P, con medidas estructurales y no estructurales, de carácter ingenieril, sobre el factor LS y con acciones sobre el factor K.

Se debe tener en cuenta que en la microcuenca del arroyo Vaqueros, las pérdidas de suelos de las clases alta y muy alta se encuentran concentradas al O-SO del arroyo, sobre los flancos de exposición norte de su cabecera y en aquellos de los que se originan arroyuelos y regueros que alimentan a su afluente principal por la margen derecha. En el arroyo Los Nogales estas categorías de erosión tienen una distribución dispersa, abarcando la clase muy alta espacios correspondientes a escasos píxeles, principalmente en los contrafuertes orientados al sur.

Con el objeto de realizar mejoras ambientales, es importante la elaboración de un plan previo de manejo que incluya objetivos a corto, mediano y largo plazo y monitoreo periódico.

Entre las medidas más inmediatas a llevar a cabo, se plantea como imprescindible en primer lugar, evitar la práctica de la ganadería extensiva. Esto incidirá positivamente sobre el factor C, posibilitando la recuperación, desarrollo y conservación de la vegetación y sobre el factor K, frenando la desprotección y compactación del suelo y contribuyendo a su estructuración. Con relación a la actividad económica pecuaria, se aconseja la práctica de algún sistema de pastoreo en particular o en forma combinada, en armonía con el ambiente, resultando interesante el sistema Voisin de rotación, basado en los requerimientos de los animales y en el respeto a la fisiología de los pastos (Rúa Franco, 2009).

Otra acción sobre los factores antes mencionados es la repoblación, mediante la implantación de especies arbóreas, en principio de rápido crecimiento, pudiendo considerarse como típicas de los ambientes estudiados a: *Alnus acuminata* (aliso del cerro), *Podocarpus parlatorei* (pino del cerro), *Salix humboldtiana* (saucillo criollo), *Allophylus edulis* (chalchal), *Tecoma stans* (guarán amarillo), entre otras. En las áreas bajas, se pueden considerar a *Anadenanthera macrocarpa var. cebil* (cebil colorado), *Enterolobium contortisiliquum* (pacará), *Jacaranda mimosifolia* (jacarandá). Cabe destacar la importancia de la inclusión de estas especies en los viveros forestales de la zona, incluido el de la Universidad Nacional de Salta, y en los trabajos de investigación; asimismo, que el vivero municipal de la ciudad de Salta (Secretaría de Ambiente y Servicios Públicos, 2016) cuenta con plantines de guarán y jacarandá y de otras especies nativas de los ambientes estudiados, como *Myrcianthes* sp. (mato), *Erythrina falcata* (ceibo salteño), *Handroanthus impetiginosus* (lapacho rosado).

Entre las obras de corrección de torrentes, por mencionar una, con doble propósito, tanto para actuar sobre el factor LS como sobre el C, se pueden disponer empalizadas a modo de diques transversales a los flujos que bajan de las vertientes y alimentan los arroyos, utilizando esquejes de los géneros *Alnus* y *Sáliz*, entre otros, con el objeto de contener las laderas y favorecer la regeneración de especies vegetales (Mintegui Aguirre & Robredo Sánchez, 2008); para ello será importante considerar la escorrentía crítica, entre otros parámetros hidrológicos.

Otras medidas son las que se pueden realizar para actuar directamente sobre el factor P, relacionadas con la elección de las especies cultivables y con las técnicas de manejo apropiadas para las actividades agrícolas, para lo cual se debe considerar la extensión ambiental como estrategia.

CONCLUSIONES

En la microcuenca del arroyo Vaqueros, de 286 hectáreas, el agua de precipitación tarda unos 37 minutos en alcanzar su caudal máximo o escorrentía crítica, de 16 m³/s. Tiene una tasa de pérdida de suelos cuyo promedio ponderado es de 47 t/ha/año, concentrándose las clases alta y muy alta de erosión hídrica en el extremo sur de la franja occidental, en espacios de elevado factor topográfico sobre los que se desarrollan matorrales de media y baja cobertura vegetal y sobre los que actúan lluvias también de elevada erosividad en la época estival. El tipo de erosión alta también tiene lugar sobre vertientes norte del sector serrano a lo largo de la cuenca alta. Estas categorías de erosión se distribuyen en el 13% de la superficie total. El 18% del espacio físico está sujeto a erosión acusada, la que rodea a las categorías mencionadas anteriormente.

En lo que respecta a la microcuenca del arroyo Los Nogales, cuya extensión es de 222 hectáreas, la escorrentía crítica, de 14 m³/s se logra al cabo de 34 minutos de

comenzada la lluvia. Con un promedio ponderado de 45 t/ha/año, las clases alta y muy alta, con pérdidas de suelos de 100 a más de 200 t/ha/año, ocupan pequeños y aislados espacios ubicados principalmente sobre vertientes orientadas al norte, los que totalizan el 8% del área. Algo más de la quinta parte de la microcuenca está sujeta a erosión acusada, generada por una cobertura vegetal inferior al 50%, constituida por matorrales que crecen sobre una topografía de mediana erodabilidad dentro de un rango de moderados y altos valores del factor R.

Es necesario actuar sobre los factores acerca de los cuales es posible la acción directa o indirecta, restringiendo la presión antrópica sobre los bosques y llevando a cabo repoblación vegetal con especies nativas de rápido crecimiento, control de la ganadería extensiva, aplicación de técnicas apropiadas de manejo agropecuario y obras sencillas de corrección de torrentes, entre otras medidas planteadas como propuestas; de concretar medidas sencillas como estas, las categorías mayores de pérdidas de suelos pueden ir disminuyendo paulatinamente su extensión, en favor de una mejor calidad ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, N. (2017). Comunicación personal. Profesor adjunto, cátedra Fotogeología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.
- Aguirre M., N. (2007). *Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Arnoldus, H. M. J. (1977). Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. *FAO Soil Conservation Guide, 1*, 99-124. Roma.
- Belmonte, S. y V. Núñez (2006). Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. *Geofocus* (6), 15-27. https://www.researchgate.net/publication/28141512_Desarrollo_de_modelos_hidrologicos_con_herramientas_SIG
- Bentancor, L. S., L. Silveira y M. García Petillo (2014). Incidencia de la intensidad de lluvia en el tiempo de concentración de microcuencas del Uruguay. *Agrociencia Uruguay, 18*(2), 106-116.
- Bianchi, A. R. y C.E. Yáñez (1992). *Las precipitaciones del noroeste argentino*. 2ª ed. Salta: INTA EEA SALTA.
- Bianchi, A. R. (1996). *Temperaturas medias estimadas para la Región Noroeste de Argentina*. Salta: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Castro Mendoza, I. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 34* (2), La Habana. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v34n2/riha01213.pdf>
- Chalabe, E. (1979). *Estratigrafía y tectónica de la Sierra de Vaqueros (entre los ríos Wierna y Vaqueros) Dpto. La Caldera, Prov. de Salta*. Salta: Universidad Nacional de Salta.

- DGE (Dirección General de Estadísticas) (2013). *Anuario estadístico - Provincia de Salta. Año 2012 - Avance 2013. Gobierno de la Provincia de Salta*. Salta: Cartoon SA.
- FAO (1977). Assessing soil degradation. *FAO Soils Bulletin* N° 34. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/018/ar114e/ar114e.pdf>
- FAO, PNUMA, Unesco (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO (2000). Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. *Boletín de Tierras y Aguas de la FAO*, 8. Roma. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/lw8s.pdf>
- FAO (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/i3247s/i3247s.pdf>: FAO-FIDA-Cooperación Suiza.
- García-Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. En Valladares, F., *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (pp. 309-334). Madrid: EGRAF S. A.
- Gómez Lora, W. (2012). *Mapa de vulnerabilidad*. Universidad Nacional Federico Villarreal. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/112480481/EROSION>
- González Bonorino, G. y L. del V. Abascal (2012). Orogénesis y drenaje en la región del Valle de Lerma (cordillera oriental, Salta, Argentina) durante el Pleistoceno Tardío. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69 (1), 127-141. Buenos Aires.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Salta) - UNSa (Universidad Nacional de Salta). (2009). Adecuación a un Sistema de Información Geográfica del estudio *Los Suelos del NOA* (Salta y Jujuy), Nadir A.-Chafatinos T., 1990. [Dvd]. Convenio INTA-UNSa. Salta: INTA.
- Lemus V. M y V. G. Navarro (2003). *Manual para el desarrollo de obras de conservación de suelos*. Corporación Nacional Forestal, Gobierno de Chile. Recuperado de <http://www.oasification.com/archivos/Manual%20de%20Mauco.pdf>
- Mármol, L. A. (2010). Introducción al manejo de cuencas hidrográficas y corrección de torrentes. Salta: Universidad Nacional de Salta.
- Mintegui Aguirre, J. A. y J. C. Robredo Sánchez (2008). *Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques de las cuencas de montaña*. Documento técnico del PHI-LAC 13. Unesco. Montevideo. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001592/159245s.pdf>
- METI (Ministry of Economy, Trade, and Industry) of Japan & NASA (National Aeronautics and Space Administration) (2011). Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Global Digital Elevation Model Version 2* (GDEM

- V2) released on October 17, 2011. Recuperado de <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- Moreno, R. I., P. A. Campos y A. J. Avendaño (2010). Estimación de la erosión hídrica de una microcuenca perteneciente a las Sierras de Mojotoro (Salta, Argentina) mediante la utilización de herramientas SIG y de un coeficiente pluvial para el cálculo del factor R. En *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA* (pp. 340-345). San Salvador de Jujuy: EdiUNJu.
- Rúa Franco, M. (2009). Las leyes universales de André Voisin para el pastoreo racional. *Cultura Empresarial Ganadera. Sitio Argentino de Producción Animal*, pp. 1-7. http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/15-Voisin.pdf
- Sánchez Barrios, S. F. (1995). *Una aproximación al proceso de planificación de cuencas hidrográficas*. Ibagué: Universidad del Tolima.
- Suárez de Castro (1979). *Conservación de suelos*. San José: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.
- Secretaría de Ambiente y Servicios Públicos (2016). *El vivero municipal cuenta con más de 12 mil especies de árboles y arbustos. Municipalidad de la Ciudad de Salta*. Recuperado de <https://goo.gl/KXedPE>
- Vich, A. I. J. (1996). *Aguas continentales. Formas y procesos*. Mendoza.
- Villanueva, G. H., R. G. Osinaga y A. P. Chávez (2001). *Manual de tecnología de los suelos agrícolas (el uso sustentable de los suelos)*. Salta: Universidad Nacional de Salta.
- Wischmeier, W. H. & D. D. Smith (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington, DC: USDA, Agriculture Handbook 537. U.S. Government Printing Office.