

TESIS DEFENDIDA POR
Erick Roberto Hernández Quezada
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
Director del Comité

Dr. Stephen Vaughan Smith
Miembro del Comité

MC Alejandro Hinojosa Corona
Miembro del Comité

Dr. Rufina Hernández Martínez
Miembro del Comité

Dr. Antonio González Fernández
*Coordinador del programa de
posgrado en Ciencias de la Tierra*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

25 de marzo de 2011.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**EROSIÓN DE SUELOS, APORTE Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
EN LA CUENCA DEL ARROYO SAN CARLOS, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Erick Roberto Hernández Quezada

Ensenada, Baja California, México, marzo de 2011.

RESUMEN de la tesis de **Erick Roberto Hernández Quezada**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA con orientación en GEOCIENCIAS AMBIENTALES, Ensenada, Baja California, marzo de 2011.

EROSIÓN DE SUELOS, APORTE Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL ARROYO SAN CARLOS, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.

Resumen aprobado por:

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar

La cuenca del arroyo San Carlos se localiza al sureste de la ciudad de Ensenada, en la vertiente hacia el océano Pacífico de la península Baja California. Con una orientación Este-Oeste, es una cuenca elongada de 822 km² de superficie, encauza los escurrimientos desde los 1800 metros en Sierra de Juárez hasta la planicie costera y estero de Punta Banda, con formaciones topográficas complejas y valles aluviales intermontanos. El tipo de suelo dominante es Litosol (83%) y la cubierta vegetal en un 70% corresponde a Chaparral.

Utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE) y Sistemas de Información Geográfica, se estimó la tasa de erosión media anual. Para el factor de erosividad de la lluvia (R) se adoptó la climatología de estaciones meteorológica aledañas al área. Se realizaron muestreos del suelo para valorar el factor de erodabilidad del suelo (K) en la ecuación. El factor de cubierta (C) se valoró realizando transectos de la cubierta vegetal a lo largo de sitios representativos. Como complemento se calcularon índices de vegetación a través de algoritmos de programación genética sobre imágenes del satélite LANDSAT 5. Como resultado se obtuvo una tasa de erosión cercana a las 31,200 ton/km²*año. La cuenca San Carlos se segmentó en 15 subcuencas de diferentes superficies y características, donde destaca la subcuenca de la parte baja, por ser donde se presentan pendientes que van de 0 a 15° y con el valor máximo de erosión obtenido.

Se aborda el factor incendios en los procesos erosivos, se valora un incendio forestal ocurrido en agosto de 2009, que afectó una superficie de 74km² en la cuenca. Se calculó su índice de severidad por medio de imágenes de satélite previas y posteriores al incendio. En los resultados del índice de severidad, se destaca la sensibilidad a la temporalidad de las imágenes utilizadas relativas al evento.

Para la estimación del transporte de sedimentos en suspensión, se analizaron los datos de precipitación, caudal y sedimentos suspendidos en la estación hidrometeorológica San Carlos de 1972 a 1982, observando dos años con precipitaciones extremas de 581 mm generando caudales máximos de $29 \cdot 10^6$ m³/día y descargas de sedimentos $>260 \cdot 10^3$ ton/día. Estos datos se incorporaron al modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) mediante la interfaz ArcSWAT para ArcGIS y realizar la simulación correspondiente al aporte de sedimentos. Se describen los resultados obtenidos al aplicarlo a una cuenca de clima mediterráneo con tipo de suelo y cubierta vegetal homogénea.

Palabras Clave: Cuenca, RUSLE, Índices de Vegetación, Programación Genética, Imágenes de Satélite, Índice de severidad de incendio, SWAT.

ABSTRACT of the thesis presented by Erick Roberto Hernández Quezada as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Earth Sciences in Geoenvironmental Sciences oriented, Ensenada, Baja California, Mexico, March 2011.

SOIL EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT IN SAN CARLOS BASIN, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

The basin of San Carlos creek is located South East of the city of Ensenada, in the slope towards the Pacific Ocean from Baja California peninsula. With an East-West orientation, it is an elongated basin of 822 km² in area, directs runoff from 1800 meters in Sierra de Juárez to the coastal plain and Punta Banda estuary, with complex topographical formations and alluvial valleys intermountainous. The dominant soil type is Litosol (83%) and the vegetation cover in 70% corresponds to Chaparral.

Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geographic information systems, the annual average of erosion rate was estimated. Weather climatology of stations surrounding the area was adopted for rain factor erodability (R). Soil factor erodability (K) in the equation was add-on by soil sampling. The soil cover factor (C) was assessed by making transects on representative sites. As a complement, vegetation indices were calculated through algorithms of genetic programming on Landsat 5 TM satellite images. As result we obtained a rate of erosion near the 31,200 ton/km² * year. The San Carlos basin segment in 15 sub-basin of different surfaces and features, which highlights the sub basin of the bottom, as where there are outstanding ranging from 0 to 15° and with the maximum value of erosion retrieved.

Addresses the factor fires in erosive processes, a forest fire in August of 2009, which affected an area of 74 km² in the basin was evaluated for its spectral severity index before and after the event. The results, highlights the sensitivity to the temporary nature of the images used on the event.

For the estimation of transport of suspended sediments, analyzed data from precipitation, flow and sediment suspended in the San Carlos hydrometeorological station from 1972 to 1982, picking up two years with 581 mm extreme precipitation generating maximum flow of $29 \cdot 10^6$ m³/day and discharges of sediments $>260 \cdot 10^3$ ton/day. These data were incorporated into the platform of Soil and Water Assessment Tool (SWAT), through the interface ArcSWAT for ArcGIS and perform the sediment simulation. Results were compared as a basin with mediterranean climate and homogeneous type of soil and vegetation cover.

Keywords: Basin, RUSLE, vegetation índices, satellite imageries, severity index, SWAT.

DEDICATORIAS

**A mis padres Ángeles y Aurelio,
A mis hermanos Emmanuel, Anabel y Jesus Enrique,
A Paola Zareth**

**Por ser la fuente principal de apoyo,
motivación y alegría para mi vida.**

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico proporcionado para la realización del estudio de posgrado.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada CICESE, por las facilidades otorgadas y apoyo económico proporcionado.

Al Dr. Thomas Kretzschmar, por el apoyo y confianza brindada para la realización de este trabajo.

Al Dr. Steven Smith, MC Alejandro Hinojosa Corona y Dr. Rufina Hernández Martínez, por el apoyo, las recomendaciones y observaciones realizadas para mejorar el presente trabajo.

Al Dr. Stephen Bullock, por el apoyo para la obtención de los datos en campo.

A los técnicos de Ciencias de la Tierra, Mario Vega y Gabriel Rendón, por su valiosa ayuda en el laboratorio.

A Cristina Sánchez, y Olaf Cortez, por el gran apoyo durante el trabajo de campo.

Especial mención a Víctor Rodríguez Moreno y Porfirio Avilés Serrano, Miriam Tostado Plascencia, Felipe Vega Guzmán por la amistad, por todo el apoyo y los consejos brindados.

A los compañeros y amigos, Gemma, Xochitl, Karla, Karina, Laura, Cristina, Nancy, Minerva, Olaf, Armando, José, por los gratos e ingratos momentos compartidos.

CONTENIDO (continuación)

III.2. Análisis de la distribución espacial	45
III.3. Incendios Forestales y erosión	46
III.3.1. Índice de severidad de Incendios	47
III.4. Modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	51
III.4.1. Escurrimiento superficial	52
III.4.2. Sedimentos	54
III.4.3. Datos de entrada del modelo	55
III.4.4. Elaboración de la base de datos	55
IV. RESULTADOS	
IV.1 Ecuación Universal de Perdida de Suelos	57
IV.1.1 Factor de erosividad de la precipitación R	57
IV.1.1.1. Analisis de datos de la estación hidrometeorológica San Carlos	60
IV.1.1.1.1. Precipitación y temperatura	60
IV.1.1.1.2.Caudal y sedimentos	62
IV.1.2 Factor de erodabilidad del suelo K	65
IV.1.3 Factor de longitud de pendiente y pendiente LS	66
IV.1.4 Factor de cobertura vegetal del suelo C	68
IV.1.5 Índices de cobertura C por Programación Genética	72
IV.1.6 Estimación de la erosión media anual	75
IV.2. Distribución espacial de erosión media anual	77
IV.3. Incendio forestal en la cuenca del Arroyo San Carlos	83
IV.3.1. Índice de severidad del incendio en la Cuenca del Arroyo San Carlos	85
IV.3.2. Comparativo de erosión estimada en 2007 y 2010	93
IV.4. Modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	94

CONTENIDO (continuación)

IV.4.1. Escurrimiento Superficial	97
IV.4.2. Sedimentos	101
IV.5. Datos LIDAR y vegetación en la cuenca del arroyo San Carlos	105
V. DISCUSIÓN	111
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
VII. LITERATURA CITADA	119
VIII. ANEXOS	128

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Ubicación de la cuenca del Arroyo San Carlos, Baja California, México.	4
2	Mapa Geológico de la cuenca del Arroyo San Carlos.	5
3	Tipos de erosión de suelos en una ladera expuesta, modificado de USDA NRCS, 2002.	9
4	Diagrama de procesos operacionales del modelo SWAT modificado de Neitsch et al. (2005).	23
5	Representación esquemática del ciclo hidrológico. Obtenido de Neitsch et al. (2005).	24
6	(a) Calculo del factor R, basado en la precipitación media anual, (b) Estimación del factor R, basado en la precipitación media anual.	30
7	Distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo del factor R, en la cuenca del arroyo San Carlos.	31
8	Representación grafica de los valores mensuales de precipitación de las estaciones aledañas a la cuenca del Arroyo San Carlos.	33
9	Diferentes tipos de suelos que se presentan en la cuenca del Arroyo San Carlos, el Litosol es el suelo predominante con aproximadamente 83% de la superficie de la cuenca.	36
10	Diagrama de Flujo general de la metodología utilizada para el cálculo del factor C a partir de índices de vegetación sintetizados por programación genética, Puente et al. (2009).	41
11	Estructura de los datos utilizados para el modelo RUSLE e integrarlos al ambiente SIG.	42
12	Mapa de Factor R (erosividad de la escorrentía) generado a partir de datos mensuales de precipitación (mm).	59
13	Histograma y parámetros estadísticos de la imagen raster del factor R.	59
14	Registro de precipitación y temperatura máxima y mínima para el periodo 1972-1982 en la estación hidrometeorológica San Carlos.	61

LISTA DE FIGURAS (continuación)

15	Valores de precipitación y temperatura mensuales de la estación San Carlos.	62
16	Precipitación y caudal observados durante 1972 a 1982 en la estación San Carlos.	63
17	Precipitación y sedimentos observados durante 1972 a 1982 en la estación San Carlos.	64
18	Caudal y sedimentos observados durante 1972 a 1982 en la estación San Carlos.	64
19	Mapa del Factor K (erodabilidad del suelo) para la cuenca del Arroyo San Carlos	66
20	Mapa del Factor LS (longitud de pendiente y pendiente) calculado según la propuesta de Kinell (s/f).	67
21	Medición en campo de las variables requeridas para la estimación del Factor C en la cuenca del Arroyo San Carlos.	69
22	Distribución de los sitios de muestreo obtenidos en campo para el cálculo del factor C de RUSLE, y rutas de acceso.	70
23	Histograma de frecuencia de valores del factor C obtenidos para la cuenca del Arroyo San Carlos.	71
24	Imagen de satélite Landsat 5 TM, P39-R38, de fecha 24 de junio de 2010, donde se muestra el límite de la cuenca del Arroyo San Carlos y los 24 sitios de muestreo.	72
25	Imagen raster obtenido mediante programación genética para el factor C, los valores del histograma van de 0.0039 a 0.1019.	74
26	Mapa de cubierta vegetal con el promedio de datos obtenidos en campo y áreas de suelos desnudos	74
27	Mapa de la estimación de erosión utilizando un índice de vegetación obtenido por programación genética.	76
28	Mapa de la estimación de erosión utilizando el valor promedio de los datos de C obtenidos en campo.	76
29	Segmentación de la cuenca del Arroyo San Carlos en 15 sub-cuencas.	78
30	Superficie en km ² de las subcuencas del Arroyo San Carlos.	78

LISTA DE FIGURAS (continuación)

31	Gráfica de valores máximos y mínimos del Factor R obtenidos para cada subcuenca del Arroyo San Carlos.	80
32	Pendiente máxima para cada subcuenca del Arroyo San Carlos.	81
33	Erosión máxima obtenida por cada subcuenca utilizando promedio de datos de campo y un índice GPVI.	82
34	Imagen MODIS de fecha 28 de agosto de 2009, en la cual se observa la columna de humo provocada por los incendios forestales aledaño a Ensenada.	84
35	Imagen de satélite LANDSAT 5 de fecha 24 de junio de 2009 (pre-incendio). Se indica la huella del incendio de fecha 29 de agosto de 2009, la extensión abarca. Ambos lados de la ladera en el límite de la cuenca.	84
36	NBR obtenidos para los diferentes conjuntos de imágenes.	87
37	Valores dNBR obtenidos utilizando los NBR de las imágenes post-incendio de 2009 y 2010 respectivamente.	90
38	Índices de severidad del incendio ocurrido en la cuenca del Arroyo San Carlos, con imágenes de satélite de 2010.	91
39	Máximos de erosión por subcuenca utilizando índices de cobertura C obtenidos por programación genética por Puente (2007) sobre imagen de 2007 e índice GPVI-23 de este trabajo sobre imagen 2010.	94
40	Parámetros definidos para el LITOSOL en la base de datos de SWAT.	95
41	Porcentaje del área ocupada por los diferentes intervalos de pendiente y uso de suelo por cada subcuenca del arroyo San Carlos.	96
42	Representación gráfica de los datos de precipitación observados y simulados por SWAT para la estación San Carlos.	98
43	Correlación entre los datos de precipitación observados y simulados para la estación San Carlos.	98
44	Precipitación y Flujo Superficial simulados por SWAT para el periodo de 1972 a 1982.	100
45	Flujo superficial observados y simulados por SWAT para el periodo 1972-1982.	100
46	Porcentaje total de sedimentos anuales (Ton) para las subcuencas 9, 12, 13 y 15 para el periodo de 1972-1977.	102

LISTA DE FIGURAS (continuación)

47	Sedimentos estimados por SWAT para las subcuencas, 9, 12, 13 y 15.	103
48	Sedimentos observados y simulados para la subcuenca 15.	104
49	Modelo digital del terreno (superior) y modelo digital de superficie (inferior) de la parte central de la cuenca del Arroyo San Carlos.	106
50	Distribución de la vegetación por alturas y superficie en porcentaje ocupada en la parte media de la cuenca del arroyo San Carlos.	108
51	Vegetación riparia en las subcuencas 4, 6 y 8 y alturas de un segmento del cauce principal.	109
52	Algunos tipos de vegetación en la cuenca del Arroyo San Carlos.	110

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Modelos de erosión y transporte de sedimentos, obtenida de Merritt (2003).	16
II	Estaciones meteorológicas aledañas a la cuenca del arroyo San Carlos.	31
III	Precipitación media mensual de las estaciones aledañas a la cuenca del arroyo San Carlos.	32
IV	Principales tipos de suelo en la cuenca del arroyo San Carlos.	36
V	Niveles de severidad típicos y ejemplos de rangos de dNBR.	50
VI	Parámetros hidrológicos utilizados para el modelo SWAT.	56
VII	Estaciones meteorológicas aledañas a la cuenca de Arroyo San Carlos con precipitación total anual y estimación del Factor R.	58
VIII	Parámetros estadísticos de las 10 estaciones meteorológicas utilizadas para la estimación del Factor de erosividad.	58
IX	Superficie ocupada por los diferentes rangos del factor R calculado.	59
X	Datos de precipitación y temperatura mensuales de la estación San Carlos.	61
XI	Porcentajes de arena y limo y Erodabilidad del suelo obtenidos para los diferentes tipos de suelo en la cuenca del Arroyo San Carlos.	65
XII	Superficie y porcentaje cubierto de los diferentes intervalos del Factor LS obtenidos para la cuenca del Arroyo San Carlos.	67
XIII	Listado de los 24 sitios de muestreo localizados al interior de la cuenca del arroyo San Carlos.	69
XIV	VARIABLES para el cálculo del Factor C y valor obtenido para el mismo, utilizando la ecuación propuesta por Gonzalez y Bullock (en preparación).	71
XV	Algunos índices de vegetación obtenidos por programación genética.	73
XVI	Índice de vegetación por programación genética 23 utilizado para el cálculo del factor C, en la cuenca del arroyo San Carlos.	73
XVII	Superficie y porcentaje de usos de suelo en la Cuenca del Arroyo San Carlos.	75

LISTA DE TABLAS (continuación)

XVIII	Datos estadístico de erosión media anual obtenidos por dos métodos en la cuenca del Arroyo San Carlos.	75
XIX	Distribución de la superficie de erosión estimada en la Cuenca del Arroyo San Carlos con los dos métodos utilizados.	77
XX	Estadísticas zonales de las subcuencas del Arroyo San Carlos.	79
XXI	Datos estadístico de valores obtenidos para NBR pre y post incendio.	89
XXII	Valores de dNBR obtenidos para la zona de incendio en la cuenca del Arroyo San Carlos.	89
XXIII	Intervalos de severidad del área incendiada en la cuenca del Arroyo San Carlos de la imagen de 2010.	92
XXIV	<i>Comparación de la erosión estimada, utilizando índices de cobertura C obtenidos por programación genética por Puente (2007) y el índice GPVI-23 de este trabajo sobre imagen 2010.</i>	93
XXV	Datos del balance hídrico generado por SWAT.	99
XXVI	Datos de sedimentos anuales por subcuenca para el periodo 1972-1977.	101
XXVII	Datos de sedimentos observado durante el periodo 1972 a 1982 y simulados de la subcuenca 15.	104
XXVIII	Intervalos de altura de la vegetación y área cubierta por cada uno.	108

I. INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de las primeras civilizaciones, se ha tenido la necesidad de conocer y presagiar los procesos de la naturaleza, con la finalidad de utilizar y manejar los recursos naturales. Con el desarrollo de la ciencia y los avances en la tecnología, el estudio y caracterización de los sistemas naturales son cada vez más cercano a la realidad.

El estudio del entorno natural donde el ser humano desarrolla sus actividades cotidianas demanda de un enfoque holístico e interdisciplinario, que permita la convergencia de diversas disciplinas y técnicas para evaluar todas las interacciones presentes. Por lo que cada vez hay mayor interés por el aprovechamiento sostenible de los recursos y crece la atención por los cambios ambientales ya sea de tipo antrópico o natural. Se busca un mayor entendimiento de los procesos claves en la dinámica ambiental y se necesitan herramientas adecuadas para la modelación y predicción de estos cambios (Montoya et al. 2006).

La erosión del suelo es uno de los peligros ambientales más críticos de los tiempos modernos. Vastas áreas de suelo que ahora se está cultivando pueden hacerse económicamente improductivos si la erosión del suelo continúa sin cesar (Jain y Kothyari, 2000).

La erosión por riachuelos y laminar, son dos formas comunes de erosión hídrica que implica el desprendimiento y transporte de las partículas del suelo a partir de capas superficiales, reduciendo la calidad y productividad del suelo afectado. Además, la sedimentación excesiva obstruye los canales de flujo y aumenta los costos de mantenimiento de los medios de transporte de agua. Los sedimentos entregados en los cuerpos de agua también pueden ser una fuente de contaminación, que perjudiquen la biota acuática (Novotny y Olem, 1994).

En consecuencia, la necesidad de cuantificar la cantidad y distribución espacial de erosión y sedimentos se ha vuelto esencial a escala de cuencas hidrográficas como una aplicación de conservación. La producción de sedimentos de una cuenca hidrográfica es el resultado integrado de la erosión hídrica y el proceso de transporte que ocurren en todas las zonas que aportan (Lane et al. 2000).

En las diferentes regiones geográficas de México, cada una con sus propias características hidrológicas es común la ocurrencia de estos procesos, el Estado de Baja California no es la excepción, se presentan tasas de erosión de suelos por escurrimientos superficiales moderadas, que se asocian a los cambios de uso de suelo, deforestación y malos manejos agropecuarios, teniendo como consecuencia el deterioro ambiental de la zona y el impacto en las actividades sociales y económicas de la región.

En el análisis de erosión de suelos, aporte y transporte de sedimentos en la cuenca del Arroyo San Carlos (CASC), Baja California, serán estimadas las tasas de cada uno de estos procesos, apoyados en diferentes modelos de erosión hídrica y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para identificar aspectos tales como la localización de zonas de pérdida de suelos, fuentes de sedimentos en las laderas, y los efectos de los cambios de uso de suelo.

Mediante los SIG, el usuario puede analizar los escenarios y producir diferentes alternativas antes de seleccionar la más adecuada. La percepción remota, los SIG, los modelos topográficos digitales y los sistemas de posicionamiento satelital se ha convertido en herramientas útiles que proporcionan información básica para el reconocimiento, evaluación y planeación espacial y multitemporal de los recursos naturales y socioeconómicos en una amplia gama de resoluciones, de las cuales, el usuario deberá adoptar la más adecuada para su aplicación en particular.

I.1 Localización.

El área de interés de la presente investigación se localiza en el municipio de Ensenada, Baja California, México, donde la red hidrológica está conformada por arroyos intermitentes y el principal aprovechamiento del agua es para uso doméstico, sin dejar fuera las actividades agropecuarias e industriales.

La cuenca del arroyo San Carlos, localizada al sureste de la ciudad de Ensenada, se encuadra entre los 31°42' a 31°57' Lat. N. y 115° 53' a 116°37' Long. W., con una superficie de 822 km² (Fig. 1). Las condiciones topográficas en esta cuenca permiten que haya una variación de elevaciones que van desde nivel del mar a mayores de 1800 msnm en la parte alta de la cuenca.

Smith et al. (2007) menciona que el área es topográficamente compleja, se presentan fuertes pendientes, grandes valles aluviales e intermontanos, depósitos aluviales en cauces y una llanura costera aluvial. El clima es mediterráneo, con inviernos fríos y húmedos y veranos cálidos y secos. La precipitación media es de 315 mm/año (el 85% entre noviembre y abril). No hay flujo superficial significativo ni corrientes perennes. La temperatura media anual es de 16°C ($\pm 6^\circ\text{C}$ de variación para la cuenca).

Gran parte de la zona costera y la llanura aluvial media fue autorizada para el desarrollo urbano y agrícola a finales del siglo XIX. Dos tipos de vegetación son los predominantes en la cuenca: chaparral y matorral costero. El primero (arbustos esclerófilos de hoja perenne) cubre las laderas más altas de las colinas costeras y del interior (Minnich y Franco-Vizcaíno 1997), el segundo (arbustos de hoja caduca y de hoja perenne por la sequía y suculentas; Zippin Vanderwier y 1994) se produce a lo largo de un cinturón, 50 km hacia el interior y/o 500 m de altitud.

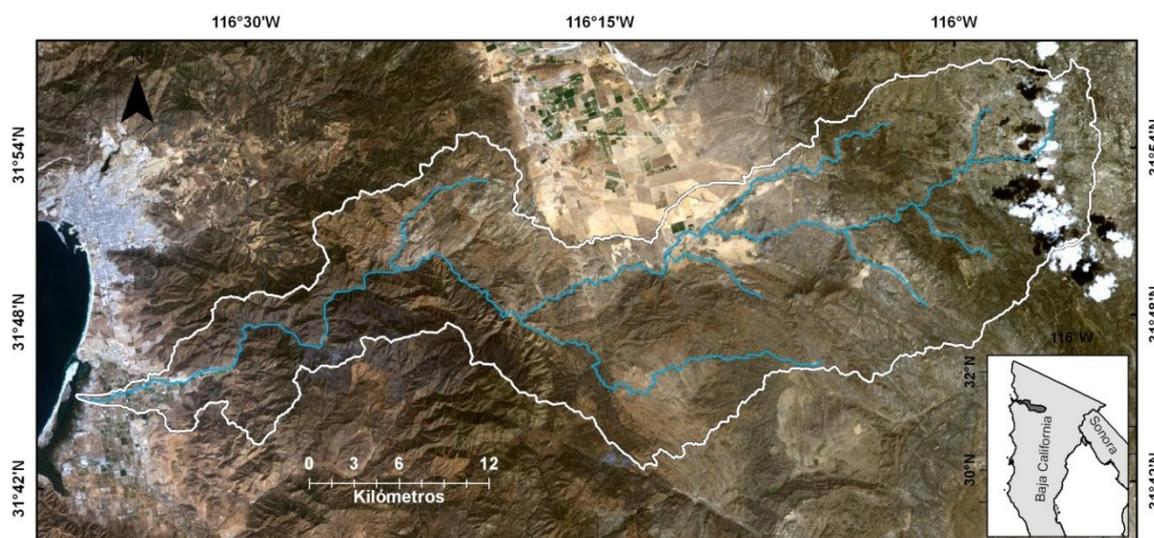


Figura 1: Ubicación de la cuenca del Arroyo San Carlos, Baja California, México.

Estos dos tipos de matorrales nativos se intercalan entre sí con otras plantas de complejos patrones anuales dependiendo de la altitud, aspecto, historia de incendios, y otros factores (Peinado et al. 1995). En el límite superior de la cuenca se presenta una meseta, la cual alberga bosques de pinos y prados de montaña.

I.2 Aspectos Geológicos Regionales.

La topografía actual de la península de Baja California refleja la historia y estructura geológica. El área se puede subdividir en cuatro regiones de carácter topográfico distinto y éstas se pueden subdividir en provincias geomórficas bien definidas: la costa Pacífica, la sierra costera, la meseta alta norteña, el valle alto, la meseta alta sureña y el Golfo de California (Gastil et al. 1975).

La región de Ensenada forma parte de la Provincia de la Costa Pacífica y se incluye dentro del Bloque de Santo Tomás/Planicie Costera de Todos Santos, aunque también se considera parte de la Provincia de la Sierra Costera conocida como el Bloque de Ensenada. El Bloque de Ensenada se caracteriza por su topografía accidentada y se extiende del Valle de Guadalupe a la falla de Agua

Blanca en el sur. Al este, una serie de picos altos marca el límite oriental de este bloque (Fig. 2). El área es disectada por el Río Guadalupe que fluye al oeste, el Río Santa Clara, el Cañón de la Chispa y el Arroyo Santo Tomás, los cuales forman cañadas de hasta 1000 m de profundidad (Gastil et al. 1975).

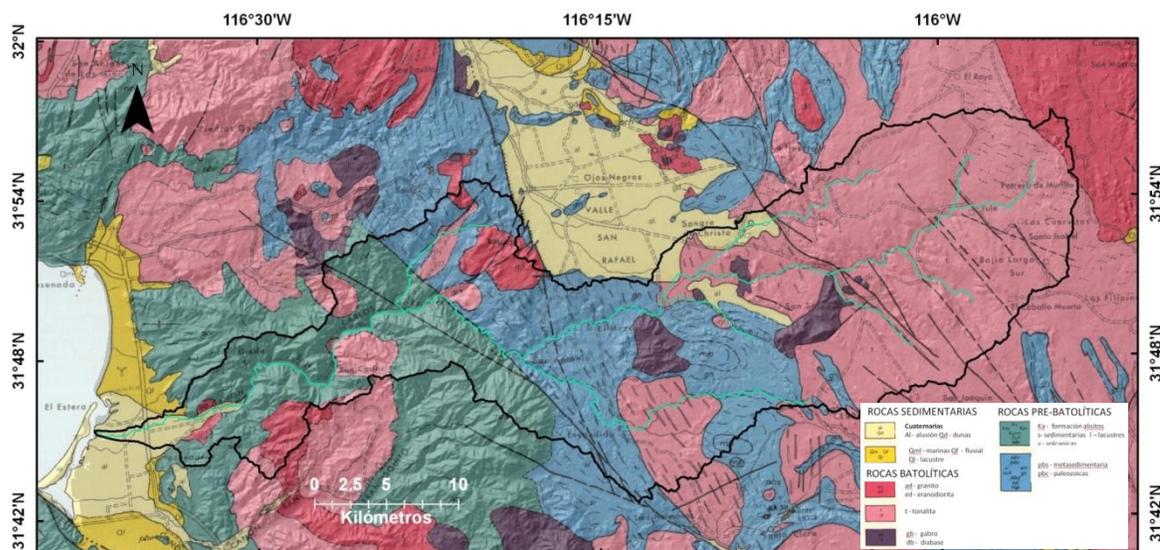


Figura 2: Mapa Geológico de la cuenca del Arroyo San Carlos.

El bloque Ensenada se encuentra a 500 m sobre el nivel del mar (en promedio), con poca evidencia de una superficie preexistente del Terciario temprano. Un depósito remanente de un conglomerado fluvial se encuentra esparcido sobre una meseta de 400 m de altura en la esquina noroccidental del bloque. La Planicie Costera de Todos Santos cubre un área de 150 km² ocupada por la ciudad de Ensenada, el Valle de Maneadero y la Bahía de Todos Santos. El área es un semigraben controlado por la falla de Agua Blanca como límite sur Gastil et al. (1975).

La Planicie Costera de Todos Santos está rodeada por la Formación Alisitos del Cretácico temprano (Aptiano-Albiano), compuesta de andesitas y material piroclástico. La parte al ENE de la Planicie Costera de Todos Santos está delimitada por un plutón de tonalita-granodiorita de 120 a 110 Ma del batolito

peninsular (Ortega, 1997). Al oestenoeste, las rocas intrusivas están en contacto con la Andesita Alisitos que aflora en las colinas de Chapultepec, así como al norte de ellas. Al norte de la ciudad de Ensenada y en el área de El Sauzal, la Formación Alisitos está en contacto con la Formación Rosario del Cretácico tardío. Esta formación está bien representada en el suroeste de California y noroeste de Baja California y se caracteriza por una secuencia gruesa de material clástico acuñada contra la Formación Alisitos.

I.3 Justificación.

El deterioro de los recursos naturales es cada vez más grave, a este deterioro generalizado se le ha denominado desertificación, y uno de los principales procesos es la erosión de los suelos. Por lo tanto, todas las acciones tendientes a prevenir y/o controlar ese problema adquieren gran importancia, ya que el suelo la base para la producción de alimentos, reserva genética, así como regulador y transformador de diversas sustancias, entre otras funciones.

El problema de la escasez de agua ha inducido a la realización de estudios hidrológicos a nivel mundial. El uso de los sistemas computacionales e informáticos es una herramienta muy importante para la agilización de los estudios hidrológicos.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 1990), nuestro país no cuentan con suficiente infraestructura hidrométrica para la medición en cauces, ríos y cuencas y solamente las cuencas hidrológicas de mayor importancia poseen ésta. Por lo que una alternativa para evaluar erosión sedimentos y cantidad de agua en las cuencas que no cuentan con la suficiente infraestructura de medición de caudales y otras variables, es el empleo de modelos hidrológicos de simulación, debido a su fácil operación, a su bajo costo y a la confiabilidad de los resultados que arroja.

I.4 Objetivos.

General

- Estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica, el aporte y transporte de sedimentos en la cuenca del arroyo San Carlos, Baja California, México.

Específicos

- Aplicar técnicas de modelaje en SIG para estimar la tasa de erosión de suelo, y el aporte y transporte de sedimentos, utilizando la ecuación RUSLE
- Identificar mediante imágenes de satélite los efectos que generan los incendios forestales para la estimación de la tasa de erosión de suelos, producción y transporte de sedimentos.
- Estimar la tasa de transporte de sedimentos en la cuenca del Arroyo San Carlos, Baja California, México.
- Analizar la distribución espacial de la erosión, el aporte y transporte de sedimentos a escala de cuenca hidrográfica.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El proceso de erosión puede describirse en tres fases: desprendimiento, transporte y deposición. El desprendimiento de los sedimentos de la superficie del suelo fue considerado originalmente como el resultado del impacto de las gotas de lluvia (Hudson, 1975), aunque la magnitud de flujo superficial como agente erosivo ha sido reconocido. El desprendimiento de lluvia es causado por la fuerza cortante y las tensiones generadas en la superficie del suelo por el impacto de las gotas de lluvia (Loch y Silburn, 1996). Del mismo modo, el flujo del suelo provoca una tensión tangencial a la superficie del suelo que, si se excede la fuerza de cohesión del suelo, llamado esfuerzo de corte crítico, resulta en el desprendimiento de sedimentos.

II.1. El proceso de erosión.

Hay cuatro tipos principales de los procesos de erosión: laminar, en surcos, cárcavas y erosión de la corriente (Fig. 3). La erosión laminar se refiere a la separación uniforme y eliminación del suelo, sedimentos o partículas de la superficie del suelo por escorrentía superficial o el impacto gota de lluvia distribuida uniformemente a través de una pendiente (Hairsine y Rose, 1992). Junto con la erosión en surcos, la erosión laminar se clasifica a menudo como erosión de "flujo superficial", donde el desprendimiento de sedimentos es solamente de la superficie del suelo. Por motivos de simplificación, los dos procesos son a menudo considerados conjuntamente en el modelado de la erosión.

La erosión en surcos ocurre cuando el flujo de agua se mueve sobre la superficie del suelo a lo largo de vías preferenciales que forman un canal fácilmente

reconocible (Rose, 1993). Estos surcos son generalmente características de erosión pequeña, y han sido definidos por Loch y Silburn (1996) como "canales de flujo que pueden ser ocultados por la labranza. La iniciación de los riachuelos es controlada por la fuerza de cohesión del suelo y los esfuerzos cortantes ejercidos sobre este. En los arroyuelos el flujo actúa como agente de transporte removiendo los sedimentos pendiente abajo, aunque si el esfuerzo cortante en el riachuelo es lo suficientemente alto como el flujo que también puede desprender grandes cantidades de suelo (Nearing et al. 1994).

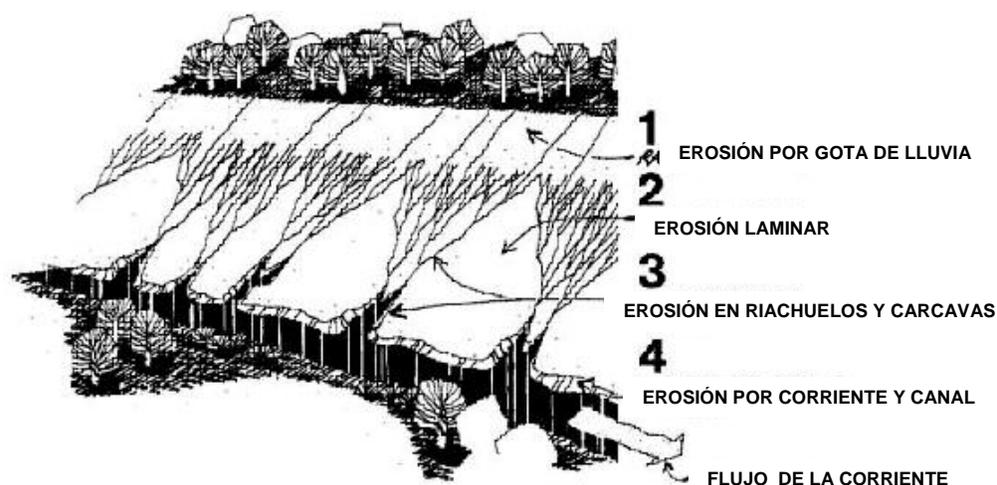


Figura 3: Tipos de erosión de suelos en una ladera expuesta, modificado de USDA NRCS, 2002.

En la erosión en cárcavas, en contraste con la erosión en surcos, los canales de flujo concentrado son demasiado profundos para ser ocultados por el cultivo (Rose, 1993; Loch y Silburn, 1996). En los flujos en cárcavas a diferencia de la erosión laminar y los flujos de riachuelo, el impacto de las gotas de lluvia, no es un factor importante en términos de resistencia al flujo o en el desprendimiento de partículas de sedimento (Bennett, 1974). Se considera que el desarrollo de cárcavas esta controlados por los umbrales, como en los arroyos, aunque los

umbrales se han relacionado con la pendiente y el área de captación en lugar de los flujos erosivos (Loch y Silburn, 1996).

La erosión por corriente consiste en la extracción directa de sedimentos de los bancos (erosión lateral) o en el lecho de un arroyo. Los sedimentos también entran en la corriente debido al flujo resultante de la erosión de las orillas del arroyo. Durante los períodos de alto flujo, una gran parte de los sedimentos que se transporta a través de la red de arroyos pueden provenir del canal del arroyo.

Estos tipos de erosión no necesariamente se producen en forma aislada unos de otros. Están influenciados por los factores del paisaje, así como las características de las precipitaciones. Loch y Silburn (1996) expresan que el desarrollo de la erosión en surcos y cárcavas requiere una concentración de flujo y descargas que superen un determinado umbral crítico, y como tales, se presentaran cuando la longitud de la pendiente aumenta. Por lo tanto, el proceso de erosión dominante se espera que siga una secuencia de la pendiente descendente de splash-laminar-riachuelo- cárcava.

II.2. Modelos de erosión y transporte de sedimentos.

Merritt et al. (2003), mencionan que la mayoría de los modelos de erosión tienden a predecir uno de estos tipos de erosión, o a lo mucho un par de los mencionados anteriormente. En un ejercicio de modelación a escala de cuenca, se plantea la posibilidad de que en determinadas zonas de la cuenca los procesos considerados por el modelo que se utiliza no son realmente representativos de los procesos que ocurren realmente en la cuenca.

Existe una amplia gama de modelos usados para la simulación de transporte de sedimentos y contaminantes asociados. Estos modelos se diferencian en términos de complejidad, los procesos considerados, y los datos necesarios para la

calibración y uso del modelo. En general no hay "mejor" modelo para todas las aplicaciones (Merritt et al. 2003). El modelo más adecuado dependerá del uso previsto y las características de la cuenca que se considere. Otros factores que afectan la elección de un modelo de aplicación incluyen:

- La exigencia de datos del modelo, incluye la variación espacial y temporal de los datos del modelo y los resultados;
- La exactitud y la validez del modelo incluyendo sus supuestos subyacentes;
- Los componentes del modelo, lo que refleja la capacidad del modelo;
- Los objetivos del usuario del modelo (s), incluyendo la facilidad de uso del modelo, las escalas en que los resultados del modelo son necesarias y su forma (como la concentración vs carga), y
- Los requisitos de hardware del modelo.

En general, los modelos se dividen en tres categorías principales, dependiendo de los procesos físicos simulados, los algoritmos utilizados y los datos dependientes del modelo:

- Empíricos o métrico/estadísticos;
- Conceptual, y
- de Base Física

II.2.1. Modelos empíricos.

Los modelos empíricos son generalmente los más simples de los tres tipos de modelos. Se basan principalmente en el análisis de las observaciones y tratan de caracterizar la respuesta de estos datos (Wheater et al. 1993). El cálculo y los requisitos de datos para este tipo de modelos suelen ser menores que el de los modelos conceptuales y los de base física, a menudo siendo susceptible de ser apoyados por medidas secundarias. Jakeman et al. (1999) afirmaron que la

característica de este tipo de modelos es su alto nivel de agregación espacial y temporal y a la incorporación de un pequeño número de variables causales. Muchos modelos empíricos se basan en el análisis de datos utilizando técnicas de captación estocásticas, y como tales son herramientas ideales para el análisis de los datos en las cuencas (Wheater et al. 1993).

Los valores de los parámetros en los modelos empíricos se pueden obtener mediante calibración, pero son a menudo transferidos de los sitios experimentales, y son particularmente útiles como un primer paso para identificar las fuentes de sedimentos y la generación de nutrientes.

Los modelos empíricos son a menudo criticados por emplear suposiciones poco realistas sobre la física del sistema de captación, haciendo caso omiso de la heterogeneidad de los insumos de captación y características, tales como las precipitaciones y los tipos de suelo, así como ignorar las no linealidades inherentes en el sistema de captación (Wheater et al. 1993). Aunque estas críticas son válidas, la insuficiencia de las redes meteorológicas y de la heterogeneidad espacial de los suelos, por ejemplo, a menudo significa que los modelos más complejos y dinámicos son, en este sentido, no más superiores que los modelos empíricos.

Los modelos empíricos también tienden a no dar respuesta por eventos, haciendo caso omiso a los procesos de precipitación-escorrentía en la cuenca que está siendo modelada. Sin embargo, los modelos empíricos se utilizan con frecuencia en lugar de modelos más complejos ya que pueden ser aplicados en situaciones con pocos datos y entradas de parámetros, y son especialmente útiles como un primer paso para identificar las fuentes de sedimentos y la generación de nutrientes. Prosser et al. (2001a) señala que, especialmente a nivel regional, "los patrones de descarga de sedimentos y tiempo de residencia de sedimentos siguen siendo poco conocidas. Por lo tanto, la predicción de la descarga de sedimento a

estas escalas se basa en general en los métodos empíricos que se aplican de manera uniforme en una región.

II.2.2. Modelos conceptuales.

Los modelos conceptuales se basan normalmente en la representación de una cuenca como una serie de almacenes de interior. Por lo general, incorporan los mecanismos de transferencia de sedimentos subyacentes y la generación de escorrentía en su estructura, lo que representa las líneas de flujo en la cuenca como una serie de almacenes, cada uno requiere algún tipo de caracterización de su comportamiento dinámico.

Los modelos conceptuales tienden a incluir una descripción general de los procesos de captación, sin incluir los detalles específicos de las interacciones del proceso, lo que requiere información detallada de captación (Sorooshian, 1991). Esto permite a los modelos proporcionar una indicación de los efectos cualitativos y cuantitativos de los cambios de uso del suelo, sin necesidad de grandes cantidades de datos de entrada, distribución espacial y temporal.

Tradicionalmente, los modelos conceptuales engloban procesos representativos a lo largo de la escala a la que son simuladas las salidas (Wheater et al. 1993). Recientemente se han desarrollado modelos conceptuales que proporcionan resultados de distribución espacial. Por otra parte, los modelos conceptuales agrupados se pueden aplicar de una manera semi-distribuida mediante la desagregación de una cuenca en subcuencas vinculadas, a los que se aplica el modelo.

Los parámetros de valores para los modelos conceptuales han sido típicamente obtenidos a través de la calibración con los datos observados, tales como la descarga de corriente y las mediciones de concentración (Abbott et al. 1986).

Debido a la exigencia de que los valores de parámetros se determinan mediante la calibración con los datos observados, los modelos conceptuales tienden a sufrir de problemas relacionados con la identificación de los valores de los parámetros (Jakeman y Hornberger, 1993).

II.2.3. Modelos de base física.

Los modelos basados en la física se fundamentan en la solución de ecuaciones de física que describe el caudal, los sedimentos y la generación asociada de nutrientes en una cuenca. Las ecuaciones estándar utilizadas en estos modelos son las ecuaciones de conservación de la masa y el impulso para el flujo y la ecuación de conservación de la masa de sedimentos (Bennett, 1974).

En teoría, los parámetros utilizados en los modelos de base física se pueden medir porque son "conocidos". En la práctica, la gran cantidad de parámetros que intervienen y la heterogeneidad de características importantes, especialmente en las cuencas, significa que estos parámetros a menudo deben ser calibrados con los datos observados (Beck et al. 1995; Wheater et al. 1993).

Esto crea una incertidumbre adicional en los valores de los parámetros. Cuando los parámetros no se pueden medir en la cuenca, deben determinarse a través de la calibración con los datos observados. Incluso en situaciones en las que los parámetros pueden ser "medidos", los errores en la medición de características importantes, y las diferencias entre la escala en que se aplican los algoritmos del modelo y la escala en que se efectúa la medición, va a crear una incertidumbre adicional acerca de la veracidad de los resultados de este (Bloschl y Sivapalan, 1995).

La derivación de las expresiones matemáticas que describen los procesos individuales en los modelos basados en la física están sujetas a numerosas

suposiciones que pueden no ser relevantes en muchas situaciones del mundo real (Dunin, 1975). En general, las ecuaciones que rigen los procesos en estos modelos son derivados a pequeña escala y en condiciones muy específicas (Beven, 1989). En la práctica, estas ecuaciones se utilizan regularmente en escala mucho mayor y bajo diferentes condiciones físicas. Se derivan para su uso con datos espaciales continuos y temporales, sin embargo, los datos utilizados en la práctica son a menudo datos de fuentes puntuales que representan una celda de toda la cuenca.

La viabilidad de agrupar la escala física a la escala de la red espacial utilizado en muchos de estos modelos es cuestionable (Beven, 1989). Lane et al. (1995) afirmaron que "los parámetros del modelo derivado de esta forma solo representan coeficientes distorsionados más allá de cualquier significado físico", mientras Seyfried y Wilcox (1995) señalaron que "los parámetros que se utilizan para los modelos a pequeña escala puede perder significado físico a escalas más grandes".

Merrit (2003), realizó la revisión de diferentes modelos a escala de cuenca, (Tabla 1), en los que se muestran los modelos dentro de la corriente, de suelo superficial o, en algunos casos, tienen tanto el suelo superficial y los componentes de la corriente. Mencionó también que la predicción a escala de cuenca de la generación de sedimentos y el transporte requiere la consideración de los procesos de la superficie y los procesos dentro de la corriente.

II.3. Los SIG en la modelación de erosión e hidrológica.

El incremento en la disponibilidad de datos y programas de cómputo, para el procesamiento espacial de la información, está cambiando la manera que se tenía

Tabla 1: Modelos de erosión y transporte de sedimentos, obtenida de Merritt (2003).

MODELO	TIPO	ESCALA	ENTRADAS/SALIDAS	REFERENCIAS
Calidad del agua				
AGNPS	Conceptual	Cuencas pequeñas	Altos requerimientos de entrada, Salidas: volumen de escurrimiento, concentraciones de SS, N, P y COD	Young, et al. (1987)
ANSWERS	Físico	Para cuencas de 40-400 Ha	Altos requerimientos de entrada, Salidas: sedimentos y nutrientes	Beasley, et al. (1980)
CREAMS	Físico	Cuenca	Altos requerimientos de entrada Salidas: erosión y deposición	Knisel (1980)
EMSS	Conceptual	Cuenca	Bajos requerimientos de entrada Salidas: volumen de escurrimiento, cargas de sedimento, nitrógeno y fósforo.	Vertessey, et al. (2001)
HSPF	Conceptual	Cuenca	Altos requerimientos de entrada Salida: volumen de escurrimiento, caudal, carga de sedimentos y concentración de nutrientes	Johanson, et al. (1980)
IHACRES-WQ	Empírico	Cuenca	Bajos requerimientos de entrada Salidas: volumen de escurrimiento, sedimentos y nutrientes	Jakeman, et al. (1990, 1994a,b),
IQQM	Conceptual	Cuenca	Requisitos de entrada: moderado Salidas: muchos contaminantes como nutrientes, sedimentos, oxígeno disuelto, sal.	DLWC (1995)
LASCAM	Conceptual	Cuenca	Altos requerimientos de entrada Salidas: escorrentía, los sedimentos, los flujos de sal	Viney and Sivalapan (1999)
SWRRB	Conceptual	Cuenca	Altos requerimientos de entrada Salidas: el rendimiento del caudal, sedimentos, nutrientes y pesticidas	USEPA (1994)
Erosión				
GUEST	Físico	Parcela	Altos requerimientos de entrada Salidas: la escorrentía, concentración de sedimentos	Yu, et al. (1997) Rose, et al. (1997)
LISEM	Físico	Cuencas pequeñas	Altos requerimientos de entrada Salidas: escorrentía, producción de sedimentos	Takken, et al. (1999) De Roo and Jetten (1999)
PERFECT	Físico		Altos requerimientos de entrada Salidas: escurrimiento, erosión y rendimiento del cultivo	Littleboy, et al. (1992b)
SEDNET	Empírico/ Conceptual	Campo	Moderados requerimientos de entrada Salida: sedimentos suspendidos, contribuciones relativas de flujo superficial y procesos de erosión de las orillas y en cárcavas	Prosse,r et al. (2001c)
TOPOG	Físico	Laderas	Altos requerimientos de entrada Salidas: riesgo de erosión, transporte de solutos	CSIRO Land and Water, TOPOG Homepage; Gutteridge Haskins and Davey (1991)
USLE	Empírico	Laderas	Altos requerimientos de entrada Salida: erosión	Wischmeier and Smith (1978)
WEPP	Físico	Laderas/Cuencas	Altos requerimientos de entrada Salidas: escorrentía, características del sedimento, forma de captación de la pérdida de sedimentos	Laflen, et al. (1991)
Transporte en corriente				
MIKE-11	Físico	Cuenca	Altos requerimientos de entrada Salidas: el aporte de sedimentos, escorrentía	Hanley, et al. (1998)

de los sistemas hidrológicos. Los avances en la computación y el crecimiento en la disponibilidad de bases de geodatos han hecho posible describir con más precisión las características físicas de una cuenca hidrográfica, especialmente cuando se requiere determinar la respuesta del escurrimiento a la entrada de la precipitación (ASCE, 1999).

Un SIG, se define como todo un sistema para la recolección, almacenamiento, análisis y despliegue de datos geográficos asistido por computadora. La base de datos espaciales es la parte central del sistema y está formada por una colección de mapas e información relacionada en formato digital (Eastman, 2004).

Los SIG han sido utilizados por más de diez años, para el preprocesamiento y posprocesamiento de datos espacialmente distribuidos en el modelado hidrológico. Además, la hidrología y los SIG comparten intereses en común, por ejemplo: el análisis de los procesos y características físicas de una región geográfica delimitada por la cuenca hidrográfica. Debido a esto, la construcción de modelos hidrológicos emplean los SIG (especialmente los distribuidos), particularmente cuando se requiere una representación espacial de las redes de drenaje en una cuenca (Morad y Treviño, 2001).

La estimación de parámetros es un área en la que los SIG ayudan a la hidrología para determinar y cuantificar parte de los mismos, que serán utilizados como datos de entrada en los modelos hidrológicos (Ogden et al. 2001). Los beneficios comúnmente asociados a los SIG incluyen: mayor precisión, menos duplicado, fácil almacenamiento de la información (mapas); gran flexibilidad en el manejo de la información, mayor capacidad de compartir datos, ahorro de tiempo y aumento en la eficiencia. (ASCE, 1999).

Maidment (2002), identifica cuatro aplicaciones generales de los SIG en hidrología: evaluación hidrológica, determinación de parámetros hidrológicos, ajuste del modelado hidrológico usando SIG y modelado hidrológico dentro de los SIG. Los SIG se han utilizado para la extracción de las redes de drenaje en una cuenca, delimitación de cuencas hidrográficas, ubicación de estaciones hidrometeorológicas y en la obtención de algunos parámetros de los modelos como la ocupación del suelo, altitud media, entre otros.

Entre los principales paquetes de SIG que se emplean en el modelado hidrológico se encuentran: Arc GIS y ArcInfo GIS (ESRI, 1996). ArcInfo fue desarrollado como

un SIG vectorial en 1980 utilizando el lenguaje ARC Macro Language (AML). Posteriormente, se le agregó la capacidad de manejar datos de tipo raster, contiene un módulo con funciones como flow direction, flow accumulation, watershed, slope, aspect, que son aplicadas en el análisis hidrológico.

El ArcView GIS se desarrolló en el lenguaje de computación Avenue en la década de 1990. Inicialmente servía como visualizador de datos espaciales, y posteriormente se expandió para soportar análisis y modelado hidrológico, entre otros, mediante el uso de “extensiones”. Actualmente el ESRI (Environmental Systems Research Institute) ha desarrollado el módulo ArcHydro en el lenguaje Visual Basic para realizar análisis hidrológicos más completos mediante un conjunto de herramientas específicas (Maidment, 2002).

Con la llegada de los Sistemas de Información Geográfica y su aplicación en la modelación hidrológica, se encontró una forma de automatizar y eficientar los análisis que se llevaban a cabo. Las ventajas con las que ahora cuenta son:

- a) Cálculo más preciso de los parámetros fisiográficos de la cuenca que se utilizan en los modelos hidrológicos.
- b) Aumento en la resolución espacial de trabajo en todos los niveles.
- c) Análisis de la variación espacial de algunos factores hidrológicos como los coeficientes de escurrimiento ligados al cambio y uso de suelo.
- d) Análisis de series de datos temporales como la precipitación que anteriormente se consideraba como estática y constante sobre toda la cuenca.
- e) Desarrollo de modelos hidrológicos totalmente distribuidos.

II.4. Los incendios forestales y la erosión.

La ocurrencia de un incendio forestal produce destrucción de la vegetación, modificación de la permeabilidad del suelo y las propiedades de erosionabilidad, por lo que el paso de un fuego modifica los procesos de escorrentía y la erosión. Aunque el fenómeno no se entiende completamente, DeBano, et al. (1970) indican que el fuego causa la vaporización completa de materia orgánica presente en la superficie del suelo y las capas de basura. La materia orgánica quemada es en parte vaporizada a la atmósfera y parte se transfiere, en forma de vapor, hacia las capas más profundas del suelo donde se condensa, si la temperatura está en el rango 175°-205° C. En estas capas, el suelo se vuelve más hidrofóbico que en las anteriores. El consumo de contenido de materia orgánica del suelo y la disminución de la permeabilidad, causada por la hidrofobicidad del suelo, aumentan la erosionabilidad del suelo.

La cantidad de materia orgánica volatilizada en la superficie y, en consecuencia, la cantidad de sustancias hidrofóbicas e hidrofílicas depende tanto de la intensidad del fuego, la duración del incendio y las sustancias orgánicas, más o menos descompuesta, que están presentes en la superficie. Las sustancias hidrofóbicas probablemente vienen de los hidrocarburos alifáticos, integrados por diferentes grupos carbonilo con un porcentaje de oxígeno (DeBano, 2000).

La formación y el espesor de las capas hidrofóbicas dependen de diferentes factores y sus interacciones (Savage et al. 1972; DeBano et al. 1970, 1976; Giovannini y Lucchesi 1983; Giovannini et al. 1987) tales como la temperatura del fuego, la cantidad y tipo de materia orgánica, y la granulometría del suelo. La cubierta vegetal representa el material combustible por lo que influye directamente en el fuego alcanzado temperaturas en las capas del suelo. La vegetación determina el tipo de materia orgánica en la capa de superficie y dar lugar a diferentes sustancias hidrofóbicas. Por otra parte, las diferentes cubiertas vegetales producen diferentes condiciones de humedad del suelo en la capa

superficial. La textura del suelo inicial es un factor importante en el control de la formación de la capa hidrofóbica. Las partículas de arena preferentemente absorben la materia orgánica que se evapora de la superficie del suelo durante un incendio. La pequeña superficie específica de un suelo arenoso permite la creación de una capa continua de sustancias hidrofóbicas que tienen muy baja permeabilidad al agua.

Los suelos hidrofóbicos no son permanentes y después de un intervalo de tiempo, llamado el tiempo de restauración, las características hidrológicas perturbadas pueden ser restablecidas. Después de este período, la respuesta hidrológica y erosiva de un área vuelve a su estado no perturbado.

El fuego produce la completa destrucción de la capa orgánica de un suelo rico en materia orgánica, mientras que para suelos menos ricos en materia orgánica, el aumento de los procesos de erosión es principalmente debido a la destrucción de la cubierta vegetal y su función de protección (Inbar et al. 1998).

Después de un incendio en un matorral que afectó a tres cuencas en California, se observó un retorno a condiciones normales de respuesta de la cuenca erosiva después de un año, dado que el tiempo de restauración de la vegetación es de alrededor de cinco años, el papel de la capa hidrofóbica fue considerado como el principal factor en el control de los procesos de erosión (Rulli, 2000). Por el contrario, Díaz-Fierros, et al. (1987) encontraron un incremento en la producción de sedimentos en tres años. El paso del fuego también causa un cambio en la estabilidad de agregados. Sin embargo, la disminución de materia orgánica en la capa superficial no siempre coincide con una disminución de la estabilidad de los agregados. La modificación térmica inducida por el fuego puede, causar otros tipos de cementación de los agregados del suelo.

II.5. El modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

En la actualidad, las herramientas existentes permiten conocer de manera más detallada los procesos hidrológicos en la naturaleza. Procesos físicos considerados en el ciclo hidrológico de una cuenca hidrográfica, pueden ser visualizados y analizados a través de modelos matemáticos que los representan adecuadamente.

El trabajar con un modelo para simulación hidrológica y la posibilidad de reproducir todos los componentes del ciclo hidrológico con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica, permite a los investigadores crear escenarios tanto para condiciones presentes y/o futuras, determinando cómo afectará el cambio de una u otra variable en la producción de caudales y sedimentos en determinada cuenca.

De entre los modelos hidrológicos de simulación que existen, se escogió el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), gratuito y disponible en línea (<http://swatmodel.tamu.edu/>) cuyo propósito es el predecir el impacto que originan las prácticas del manejo del suelo en el recurso agua y en la generación de sedimentos en una cuenca hidrográfica.

El modelo SWAT es un programa de modelado hidrológico diseñado por Neitsch, Jeff Arnold, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. Este modelo permite simular de manera continua la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el impacto que las prácticas del manejo del suelo en el recurso agua, la generación de sedimentos, las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizante tienen en una cuenca hidrográfica.

Para cumplir con este objetivo, el modelo se basa en principios físicos, es decir, en lugar de integrar ecuaciones regresivas para describir la relación entre las variables de entrada y de salida, SWAT necesita datos específicos acerca del clima, propiedades físicas del suelo, topografía, vegetación, y prácticas de manejo

del suelo, que ocurren en la cuenca. Los procesos físicos relacionados con el movimiento de agua y de sedimentos, desarrollo del cultivo, ciclo de nutrientes, entre otros, son modelados directamente por SWAT empleando los datos de entrada arriba mencionados.

Para el modelado, SWAT divide al espacio geográfico de estudio en subcuencas, de manera que los cálculos que se realicen se obtengan con la mayor exactitud posible. Este modelo trabaja con el cruce de 2 coberturas temáticas: uso del suelo y cobertura vegetal y el tipo de suelo dando como resultado las denominadas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). La Fig. 4, muestra el esquema general de los procesos operacionales utilizados por el modelo SWAT.

Sin importar el tipo de problema analizado, con SWAT, el balance hídrico es la fuerza impulsora detrás de todo lo que sucede en la cuenca. Para predecir con precisión el movimiento de los plaguicidas, sedimentos y nutrientes, el ciclo hidrológico simulado por el modelo debe ajustarse a lo que está sucediendo en la cuenca.

El modelo SWAT tiene sus bases en los conceptos del Balance Hídrico (Neitsch et al. 2005) que permite determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en una cuenca hidrográfica. El movimiento del agua en la cuenca llega al suelo, forma los flujos de infiltración y escorrentía. La escorrentía es el agua que fluye más rápido hasta los drenajes de la cuenca, mientras que la infiltración es la vía por la cual se recargan los acuíferos, aunque también existen flujos subterráneos que son más lentos y descargan en los canales de drenaje.

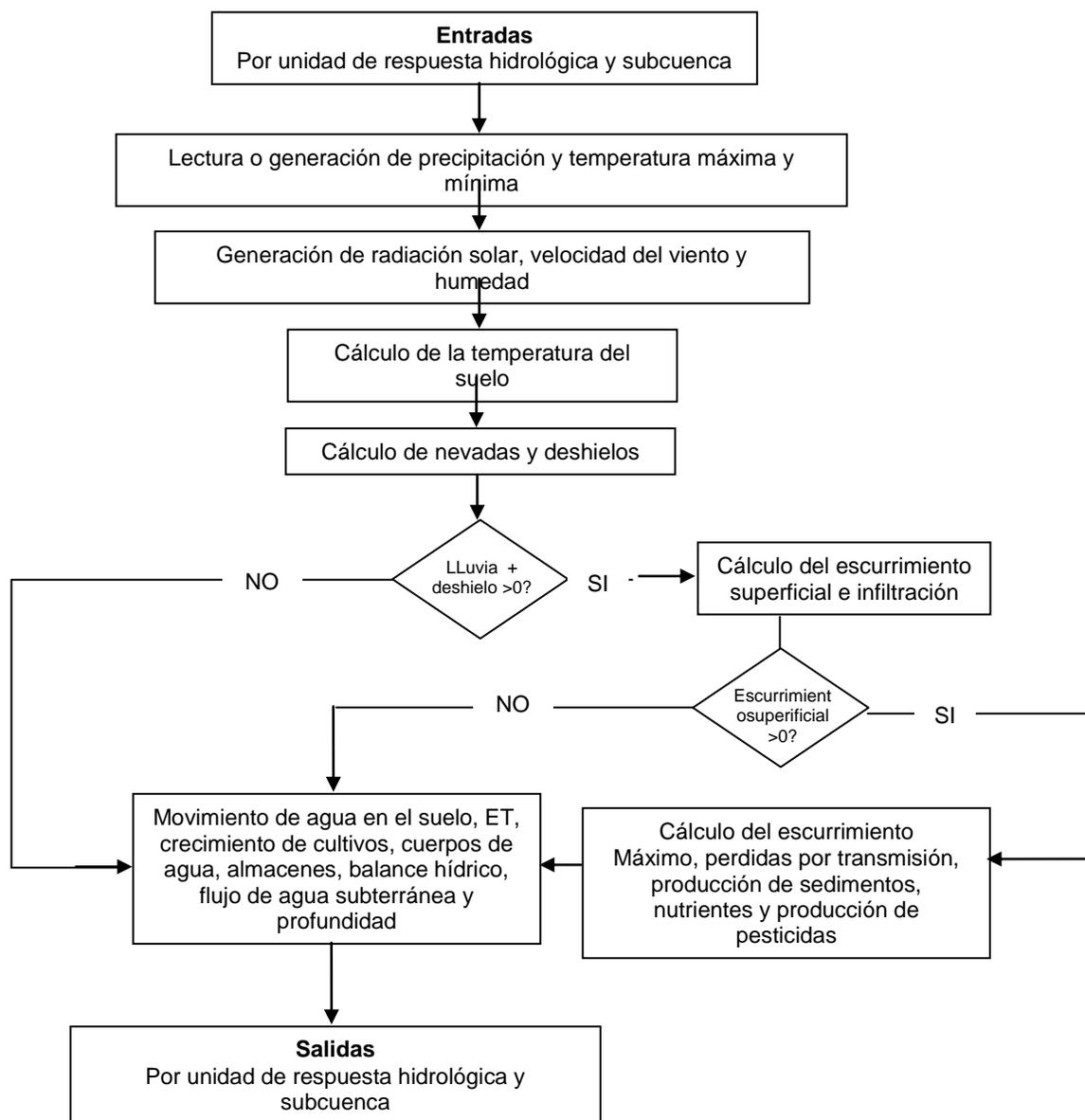


Figura 4: Diagrama de procesos operacionales del modelo SWAT, modificado de Neitsch et al. (2005).

La simulación de la hidrología de una cuenca puede ser dividida en dos grandes divisiones. La primera división es la fase terrestre del ciclo hidrológico (Fig. 5), que controla la cantidad de carga de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas en el canal principal de cada subcuenca. La segunda división es la fase de enrutamiento

del agua que se puede definir como el movimiento del agua, sedimento, entre otros, a través de la red de canales a la salida de la cuenca.

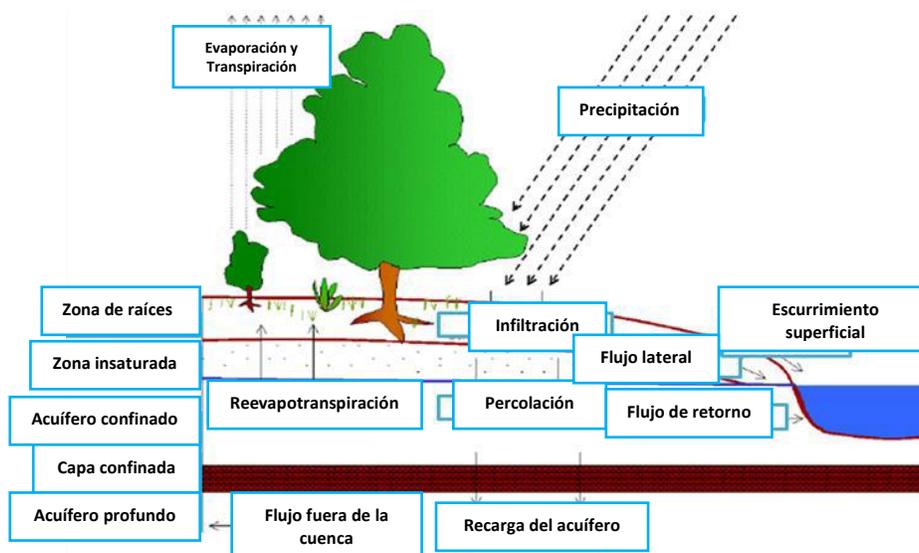


Figura 5: Representación esquemática del ciclo hidrológico. Obtenido de Neitsch et al. (2005).

Los componentes del modelo se agrupan en ocho divisiones: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos.

II.5.1. Beneficios del modelo.

SWAT es un modelo de simulación continua esto es, de rendimiento a largo plazo, por lo que no hace simulaciones detalladas de una ruta de inundación eventual y única. SWAT incorpora características de varios modelos del ARS (Agricultural Researchs Service) y es el resultado directo del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams et al. 1985; Arnold et al. 1990).

Entre los principales beneficios del software están:

1. Se pueden simular las cuencas sin datos de control (escurrimientos máximos).
2. El impacto relativo de los datos de entrada alternativos (variaciones en prácticas del manejo, clima, vegetación, etc.), u otras variables de interés se pueden cuantificar.
3. Computacionalmente es eficiente. La simulación de cuencas muy grandes o una variedad de estrategias de manejo, se puede realizar sin invertir demasiado tiempo o dinero.
4. Permite el estudio de impactos a largo plazo. Generalmente muchos de los problemas examinados por los usuarios incluyen la incorporación gradual de contaminantes y el impacto en cuerpos de agua río abajo.
5. Se basa en procesos físicos (su calibración no es posible en microcuencas sin estaciones de monitoreo)
6. Usa información disponible (actual)
7. Es eficiente desde el punto de vista computacional para operar grandes cuencas en un tiempo razonable.
8. Es continuo y capaz de simular largos períodos para evaluar los efectos de los cambios en el manejo del agua, sedimentos y carga de químicos agrícolas

II.5.2. Interfaz con Sistemas de Información Geográfica.

En años recientes ha habido considerables esfuerzos encaminados a utilizar SIG para obtener datos de “entrada” y ser utilizados en modelos de simulación integrales y para el despliegue espacial de los datos de salida de un modelo.

Muchas de estas investigaciones inicialmente fueron encaminadas a unir modelos de cuadrículas para un solo evento con SIG basados en formato raster.

Actualmente ha sido desarrollada una interfaz para SWAT usando el software ArcGIS. La interfaz de datos de entrada automáticamente subdivide una cuenca en subcuencas y después extrae los datos de entrada al modelo a partir de mapas y bases de datos asociados para cada subcuenca. Los datos de suelos, uso del suelo, clima, manejo y topografía se obtienen y escriben en un archivo de entrada con formato *.dbf.

La interfaz de salida permite el despliegue de mapas y datos de salida en forma gráfica seleccionando una subcuenca a partir de un mapa de un SIG. La interfaz ArcSWAT está diseñada para facilitar el uso del modelo mediante la combinación de datos geográficos digitales. Su entrada base es una celda DEM (Digital Elevation Model); la interfaz integra bases de datos relacionados con mapas que describen las propiedades de los suelos y de la cubierta vegetal, así como bases de datos de estaciones climatológicas y prácticas de manejo para crear una descripción de la cuenca del área en estudio y combinar datos de suelo y datos de cobertura del terreno con datos de manejo de la cuenca. Por tanto la interfaz es capaz de relacionar los diferentes manejos de una cuenca y crear bases de datos específicos para facilitar la integración de los datos de entrada de SWAT para que éstos puedan relacionar datos espaciales o trazo de mapas. El proceso de modelado del SWAT es a menudo de carácter cíclico, esto es, que varias de las rutinas se repiten.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Para dar cumplimiento a los objetivos de la investigación, el trabajo y análisis desarrollado se dividió en dos partes: gabinete y campo. En el primer caso, se tuvo la necesidad de realizar consulta bibliográfica, retomar, analizar y procesar información de diferentes estaciones meteorológicas, descargar y procesar imágenes de satélite, búsqueda de información disponible en línea referente a datos raster y vectoriales tales como modelos digitales de elevación, vegetación, tipos de suelo, carreteras, entre otros. Para el trabajo de campo, previo análisis, se identificaron sitios de muestreo en la zona de estudio a los cuales se acudió para obtener muestras de suelo (que se analizaron en el laboratorio para obtener la textura) y efectuar mediante transectos de 30 metros de longitud en cada sitio de muestreo, para obtener los parámetros requeridos para la estimación del factor de cubierta vegetal tales como altura, diámetro y especie de las plantas; la rugosidad, tipo y porcentaje de cobertura en la superficie a lo largo del transecto.

Todos estos datos, tanto de gabinete como los obtenidos en campo, se procesaron e integraron al SIG ya que de acuerdo con la literatura consultada, el uso de SIG en la modelación hidrológica colabora en el manejo de la información georeferenciada, así como para la obtención de características físicas de las cuencas. Otra potencialidad de los SIG es que permiten el desarrollo de módulos hidrogeomáticos, que son utilizados en la extracción de la información requerida por los modelos hidrológicos, especialmente en los distribuidos.

Además, en la actualidad, se cuenta con bases de datos que permiten su manejo y tratamiento en los SIG. Ejemplo de lo anterior es la información de la ocupación del suelo disponible en la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO), las cartas topográficas digitales editadas por el Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática (INEGI) y otras fuentes.

En esta investigación se utilizó principalmente el software ArcGIS como Sistema de Información Geográfica, para llevar a cabo procesos de generación y manejo de las bases de geodatos, manejo de imágenes o archivos de tipo raster, también se empleó información en formato vectorial (redes hidrográficas, delimitación de cuencas, ubicación de estaciones hidrometeorológicas, entre otros).

III.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada.

Métodos simples tales como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978), la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE) (Williams 1975) o la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) (Renard et al. 1991), son frecuentemente utilizados para la estimación del importe bruto de erosión en superficie en cuencas hidrográficas (Williams y Berndt, 1972; Griffin et al. 1988; Ferro et al. 1998; Jain y Kothyari 2000; Kothyari et al. 2002; Onyando et al. 2005; Pandey et al. 2007, Smith et al. 2007).

USLE y RUSLE cuantifican la erosión de suelos por el producto de seis factores y se expresa de la siguiente manera:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Donde:

A: es la pérdida media anual de suelo en $t \text{ km}^{-2}\text{año}^{-1}$

R: representa la erosividad de la precipitación en $\text{MJ mm km}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$

K: la erodabilidad del suelo $t \text{ h}^{-1} \text{ MJ mm}$

L: longitud de pendiente (adimensional)

S: pendiente en la ladera (adimensional)

C: cobertura vegetal del suelo (adimensional)

P: practica de conservación (adimensional)

III.1.1. Factor de erosividad de la precipitación R.

En RUSLE el método utilizado para calcular el factor R requiere datos de la frecuencia de tormentas por 10 años, para obtener el valor del índice EI_{10} . Gran parte de estos datos de precipitación a largo plazo no están disponibles para todos los sitios de aplicación. Por lo que Renard y Freimund (1994) utilizando la base de datos CITY de RUSLE e *isoerodent map*, identificaron 155 estaciones continentales en los Estados Unidos Americanos. Utilizaron los datos de precipitación mensual (mm), durante el período 1951-1980, para obtener la precipitación media anual.

Los datos de estas estaciones se caracterizaron por el promedio anual de precipitaciones que van de 67 hasta 1640 mm, y los valores del factor R varían entre 85 y 11,900 MJ mm/ha h año. Una función de potencia le dio el más alto coeficiente de determinación cuando se compara con otros seis análisis de regresión simple del factor R ya sea frente a la precipitación media anual (P) o el índice de Fournier modificado (F). Sin embargo, el análisis gráfico indica que el ajuste óptimo de las líneas de las dos funciones cuadráticas tiende a subestimar los valores del factor R en los valores más altos de la variable independiente (Fig. 6).

La ecuación de regresión obtenida con la precipitación media anual (P) (mm) y el factor R ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ año^{-1}$) ($n=32$) son las siguientes:

$$\text{Factor } R = 0.04830P^{1.610} \quad (2)$$

$$\text{Factor } R = 587.8 - 1.219P + 0.004105P^2 \quad (3)$$

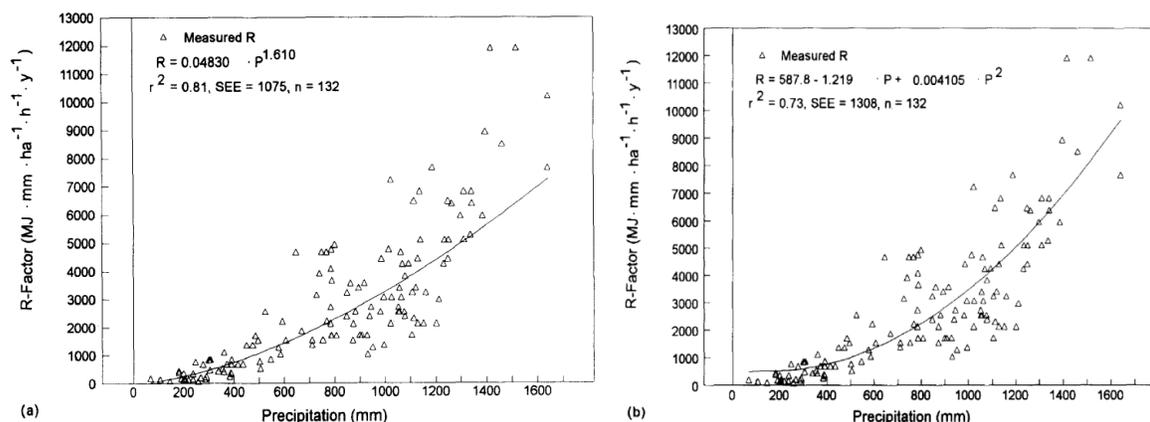


Fig. 6: (a) Calculo del factor R, basado en la precipitación media anual (b) Estimación del factor R, basado en la precipitación media anual.

El coeficiente de la ecuación 2 es 0.81 y RM (error medio) de 1075, para la ecuación 3, 0.73 y 1308 respectivamente.

Cada una de las relaciones tiene limitaciones en la predicción de los valores del factor R, puede ser considerada un compuesto de relación. Se sugiere que la ecuación 2 se utilice para sitios con una precipitación media anual inferior a 850 mm y la ecuación 3 sea utilizada para los sitios con una precipitación anual media superior a 850 mm. El umbral de 850 mm fue seleccionado porque se opone a una gran discontinuidad si los valores de R compuesto son graficados.

Para la estimación del factor R en la cuenca del Arroyo San Carlos, se retomaron los datos de precipitación se han obtenido de registros diarios de 10 estaciones meteorológicas a cargo de la CONAGUA que están aledañas a la cuenca, las cuales tienen diferentes periodos de tiempo (Tabla II), la distribución espacial de dichas estaciones se presenta en la Fig. 7.

Tabla II: Datos de estaciones meteorológicas aledañas a la cuenca del arroyo San Carlos.

CLAVE	ESTACIÓN	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD	PERIODO	PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL (mm)
2035	OJOS NEGROS	-116.27	31.91	700	1948 – 2007	235.1
2045	SAN CARLOS	-116.46	31.78	170	1962 – 2006	325.2
2054	SAN RAFAEL	-116.20	31.90	750	1979 – 2006	241.2
2062	SANTA ISABEL	-115.81	31.87	1480	1968 – 1983	204.3
2065	SANTO TOMAS	-116.40	31.55	160	1948 – 2007	256.4
2066	SIERRA JUAREZ	-115.95	32.00	1600	1961 – 1986	376.8
2072	PRESA EMILIO LÓPEZ ZAMORA	-116.60	31.89	49	1948 – 2007	301.6
2104	EL CIPRES	-116.59	31.79	16	1976 – 2007	202.1
2106	MANEADERO	-116.60	31.71	12	1977 – 2007	206.2
2153	EJIDO URUAPAN	-116.44	31.62	197	1982 – 2006	258.8



Figura 7: Distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo del factor R, en la cuenca del arroyo San Carlos.

La estación ubicada en la Presa Emilio López Zamora, cercana a la ciudad de Ensenada, presenta la mayor cantidad de registro de datos con 60 años, con una

precipitación total anual de 301.6 mm, seguida de la estación Santo Tomas con 59 años. La estación San Carlos, la cual se localiza en la parte baja de la cuenca, con registro de 41 años de datos y una precipitación total anual de 325.2 mm.

En la zona de estudio el régimen de precipitación es de invierno, el periodo con mayor precipitación es de noviembre a marzo (Tabla III). Para las estaciones Santa Isabel y Sierra Juárez en los meses de mayo y junio la precipitación mínima registrada es <1 mm y en los meses de verano se tienen precipitaciones entre 20 y 40 mm, incrementa en invierno a 50 mm en la estación Sierra Juárez, para las dos estaciones marzo es el mes con mayor precipitación con 60 mm para Sierra Juárez y 40 mm para Santa Isabel (Fig. 8). Una característica de la estación Santa Isabel es que se localiza en la vertiente al Golfo de California, con altitud superior a 1400 metros y la estación Sierra Juárez a 1600 metros, hacia la vertiente del Océano Pacífico.

Tabla III: Precipitación media mensual de las estaciones aledañas a la cuenca del arroyo San Carlos.

CLAVE	ESTACIÓN	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	TOTAL ANUAL
2035	OJOS NEGROS	6.8	22.4	32.5	50.2	39.3	43.8	16.9	2.5	0.8	4.6	9.6	5.8	235.1
2045	SAN CARLOS	10.4	32.5	47.6	60.1	67.7	63.8	24.9	5.1	1.3	1.2	3.0	7.7	325.2
2054	SAN RAFAEL	11.4	18.0	27.6	49.0	59.2	50.5	14.7	3.2	1.7	8.4	13.4	7.6	241.2
2062	SANTA ISABEL	10.9	23.0	25.6	39.7	30.8	43.4	7.1	3.3	1.4	28.5	30.3	20.4	204.3
2065	SANTO TOMAS	9.1	23.1	36.8	54.4	53.8	51.0	18.1	3.2	0.3	0.7	2.1	3.6	256.4
2066	SIERRA JUAREZ	18.2	38.0	39.5	46.7	52.1	65.1	21.5	3.7	0.5	30.9	40.0	20.6	376.8
2072	PRESA EMILIO LÓPEZ ZAMORA	12.3	26.4	35.5	52.3	50.7	50.5	43.7	20.2	4.0	1.5	0.6	3.9	301.6
2104	EL CIPRES	10.4	20.3	27.0	35.4	49.7	37.3	14.0	2.1	0.9	0.4	1.8	2.8	202.1
2106	MANEADERO	9.2	16.4	30.0	42.0	41.8	45.9	12.6	2.3	1.0	0.7	1.0	3.4	206.2
2153	EJIDO URUAPAN	14.9	18.8	39.5	24.8	73.5	56.6	18.0	2.8	1.5	1.2	2.3	5.0	258.8

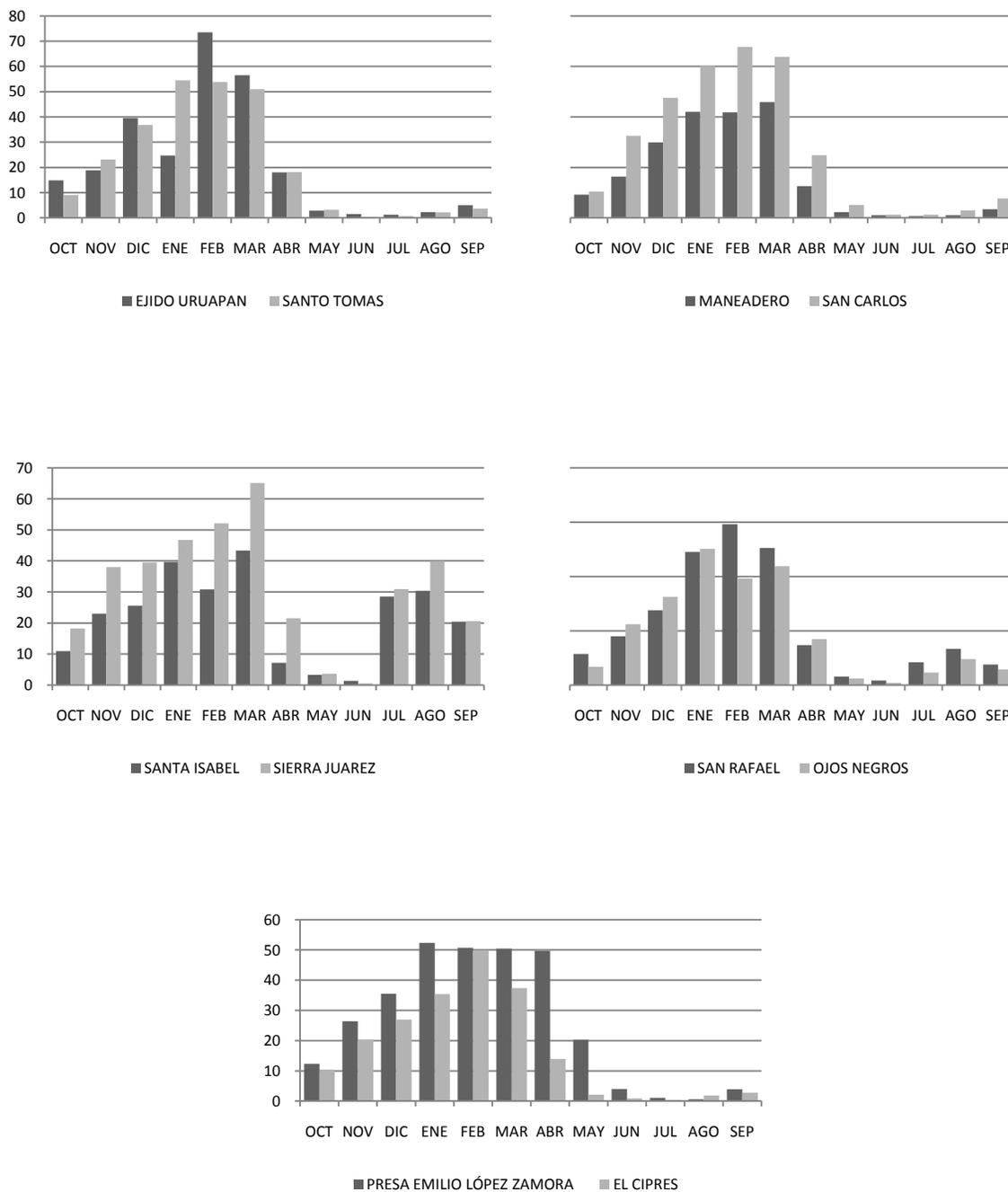


Figura 8. Representación grafica de los valores mensuales de precipitación de las estaciones aledañas a la cuenca del arroyo San Carlos.

III.1.1.1. Análisis de datos de la estación hidrometeorológica San Carlos.

Las condiciones climáticas de una región se definen cuantitativamente utilizando variables meteorológicas promediadas durante ciertos periodos de tiempo tales como meses, años o bien, estaciones del año. Algunas de las variables son temperatura promedio, dirección y velocidad del viento, nubosidad, humedad y precipitación.

Con el fin de relacionar las variables climatológicas para poder comprender y conocer el comportamiento de la CASC, referente a temporada de lluvias y estiaje se analizaron datos de la estación hidrometeorológica San Carlos, (clave 2045), localizada en la parte baja de la cuenca a 170 m de altitud, con coordenadas de ubicación latitud 31.78° N y longitud -116.46° W.

El análisis fue realizado a partir de datos registrados en esta estación de manera diaria, agrupados posteriormente en mensuales y anuales, el registro cubre de 1962 a 2006. Se retomó el periodo simulado por SWAT que va 1972 a 1982 y de este intervalo de tiempo se retomaron datos de precipitación, temperatura, caudal y sedimentos.

III.1.2. Factor de erodabilidad del suelo K.

El factor K es una medida de la erodabilidad inherente de un suelo dado bajo la condición estándar de la parcela unidad de la USLE mantenido en continuo barbecho. Los valores de K normalmente oscilan entre 0.013 a 0.059 t*h / MJ*mm (Foster et al. 1981), suelos con alto contenido de arena tienen valores más bajos que los suelos con alto contenido de limo con valores más altos. Se puede estimar en función de la relación empírica con la textura del suelo, utilizando datos de perfiles de suelo, ya que están publicados los valores del factor K de los 255 tipos de suelos existentes de acuerdo a la clase textural (Renard et al. 1996).

El nomograma de erosionabilidad del suelo (Wischmeier et al. 1978) es una herramienta popular para la estimación de los valores de K, pero no se aplica a algunos suelos. El factor K en RUSLE, involucra la actualización para que el usuario identifique los suelos donde el nomograma no se aplica y pueda estimar K por medio de métodos alternativos. Los datos de erosionabilidad de todo el mundo han sido revisados y se ha desarrollado una ecuación que da una estimación útil de K en función del promedio del diámetro de las partículas del suelo. La ecuación se expresa como:

$$K = 7.594 \left\{ 0.0034 + 0.0405 \exp \left[-\frac{1}{2} \left[\frac{\log(Dg) + 1.659}{0.7101} \right]^2 \right] \right\} \quad (4)$$

donde:

$$Dg(mm) = \exp(0.01 \sum f_i \ln m_i) \quad (5)$$

Dg: media geométrica del diámetro de la partícula

f_i: es la fracción de tamaño de partícula primaria en porcentaje

m_i: es la media aritmética de los límites de tamaño de cada partícula de ese tamaño (Shirazi y Boersma, 1984). Los valores de media aritméticas de tamaño de partícula para limos es de 0.002 a 0.1 mm, y para arenas es de 0.1 a 2 mm.

De acuerdo con el mapa de INEGI (disponible en línea) (Fig. 9) en la CASC se presentan 5 tipos de suelo (Tabla IV) predominando el Litosol con >80% y con menor extensión el Fluvisol.

Tabla IV: Principales tipos de suelo en la cuenca del arroyo San Carlos.

TIPO DE SUELO	SUPERFICIE	
	km ²	%
LITOSOL	679	83
REGOSOL	93	11
FEUZEM	27	3
PLANOSOL	17	2
FLUVISOL	6	1

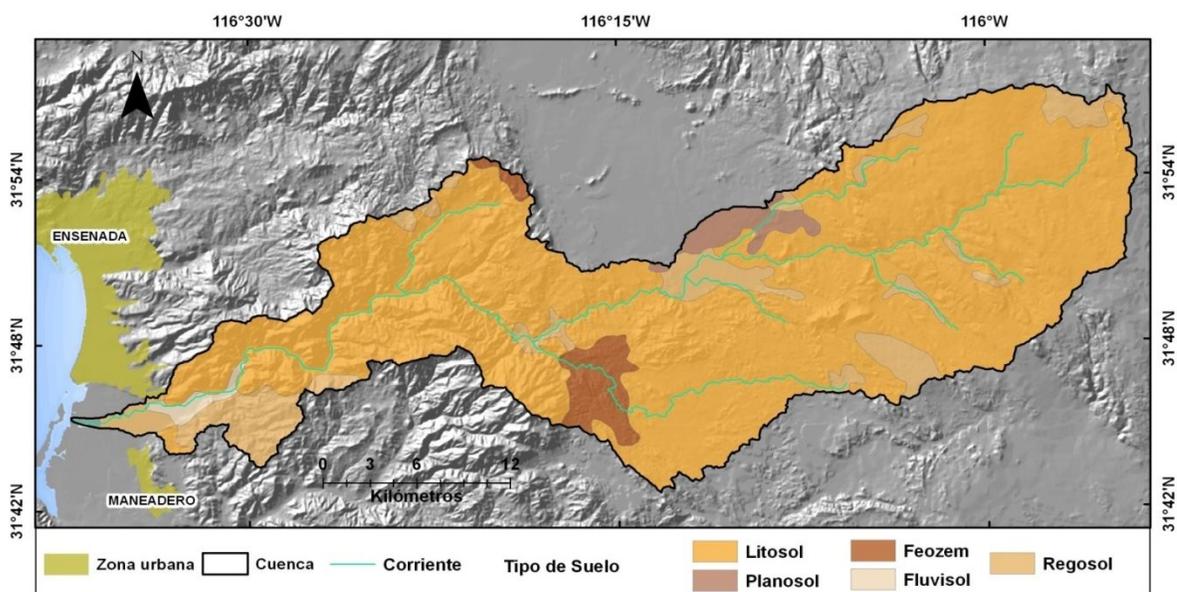


Figura 9: Diferentes tipos de suelos que se presentan en la cuenca del arroyo San Carlos, el Litosol es el suelo predominante con aproximadamente 83% de la superficie de la cuenca.

III.1.3 Factor longitud de pendiente y pendiente LS.

El efecto de la topografía sobre la pérdida de suelo se calcula en RUSLE a través de los factores L, de longitud de pendiente, y S de inclinación de la ladera. Estos factores reflejan el incremento de la erosión al aumentar tanto la longitud como el gradiente de inclinación de la ladera. El factor de longitud de la ladera se define como la distancia horizontal desde el origen del flujo de escorrentía hasta el punto donde la inclinación de la ladera disminuye lo suficiente para que se inicie la sedimentación de las partículas erosionadas aguas arriba o hasta que la escorrentía se concentra definiendo un curso del agua.

El factor topográfico LS combina los dos factores anteriores y se define como la tasa de pérdida de suelo para una longitud e inclinación de la pendiente dadas frente a la tasa de erosión correspondiente a una parcela estándar de 22.13 m de longitud y 9% de pendiente uniforme, siendo el resto de las condiciones climáticas, edáficas y de uso del suelo constantes. El significado físico del factor LS es la medida de capacidad de transporte de sedimentos por parte de la escorrentía superficial. Las ecuaciones de RUSLE para el cálculo de este factor son:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m (10.8 \sin\theta + 0.03) \quad \text{para pendientes} < 9\% \quad (6)$$

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m (16.8 \sin\theta - 0.50) \quad \text{para pendientes} > 9\% \quad (7)$$

Debido a la dificultad que representa medir cada segmento de longitud de ladera, especialmente en áreas de estudio de gran extensión y complejidad topográfica, se han adoptado como alternativa a la estimación del factor LS el uso de modelos digitales de elevación. Para ello, Moore y Brush (1986a, 1986b) y Moore y Wilson (1992) basados en la teoría *unit stream power* proponen la siguiente relación para la integración del factor LS con los Sistemas de Información Geográfica:

$$LS_i = \left[\frac{A_{Si}}{22.13} \right]^n \left[\frac{\sin \alpha_i}{0.0896} \right]^m \quad (8)$$

donde A_{Si} es el área específica contributiva en la celda i ($=A_{up}/w_n$), definida como el área de contribución pendiente arriba en un modelo digital de elevación (A_{up}) por unidad de longitud normal a la dirección del flujo (w_n); α_i es el ángulo de pendiente en grados para la celda i . Se ha demostrado que los valores de los exponentes empíricos $n=0.6$ y $m=1.4$ dan resultados consistentes con el factor LS de la RUSLE para longitudes de pendiente <100 m, y ángulos de pendiente <14 grados (Moore y Wilson, 1992).

Kinell (<http://members.ozemail.com.au/~pkinnell/L-miscalc.pdf>), menciona que para un modelo de erosión basado en Sistemas de Información Geográfica, el cálculo del factor LS comúnmente se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$LS_i = \left[\frac{\text{Flow Accumulation} * \text{Cell Size}}{22.13} \right]^{0.4} \left[\frac{\sin(\text{slope})}{0.0896} \right]^{1.3} \quad (9)$$

Donde:

Flow Accumulation: es el número de celdas que contribuyen al flujo en una celda y

Cell Size: es el tamaño de las celdas del modelo de elevación que se utiliza para la representación del paisaje.

III.1.4 Factor de cobertura vegetal del suelo C.

El factor C en el modelo RUSLE es la relación de la pérdida de suelo en un terreno cultivado bajo condiciones específicas frente a la pérdida bajo condiciones de barbecho permanente. Este factor refleja el efecto protector de las diferentes técnicas de labranza y manejo de las cubiertas vegetales, sobre la pérdida de suelo. Los valores del factor C oscilan entre 0 y 1, en el primer caso cuando la

reducción de la erosión es total y cuando la reducción de la erosión es nula en el segundo caso (Renard et al. 1996).

RUSLE utiliza un método de subfactores para el cálculo de la razón de pérdida de suelo (*Soil Loss Ratio, SLR*), que es la pérdida de suelo en un momento dado en la secuencia de la cubierta vegetal a la pérdida de suelo de las condiciones estándar. El subfactor se utiliza para calcular un valor de SLR con anteriores usos de suelo, cubierta vegetal, cobertura de la superficie, rugosidad de la superficie y la humedad del suelo.

González y Bullock (en preparación), realizaron trabajo en campo durante 2007, para obtener el índice de manejo de cobertura para el Factor C de RUSLE en la cuenca Todos Santos. Los subfactores de la cobertura y las características relacionadas han tenido una compleja historia de las revisiones de la ecuación, y no siempre han sido variables continuas. En este caso, donde las máquinas han estado ausentes y el pastoreo ha sido escaso, y dado que el interés es la estimación anual de la erosión, combinaron los elementos de RUSLE de Wertz et al. (1987) y Renard et al. (1996) en la forma siguiente:

$$C_R = 0.45 \times e^{(-0.012 \times 7.12)} \times (1 - p \times e^{(-0.328 \times h)}) \times e^{(-0.039 \times g \times (0.24 \times r^{-1})^{0.08})} \quad (10)$$

Donde:

p: es la cobertura aérea de forma proporcional

h: es la altura del goteo en metros

g: es la cobertura del suelo en porcentaje

r: es el índice de rugosidad

Al igual que en la USLE hay un determinado valor límite de 0.45 que corresponde a un suelo bien consolidado o un estado de disturbio menor (Wertz et al. 1987).

Para el factor de uso de suelo anterior se utilizó la ecuación 3 de Weltz, et al. (1987), teniendo en cuenta que el suelo no había sido alterado. El subfactor de las raíces enterradas fue calculado como 7.12, utilizando los coeficientes de la biomasa del suelo para el chaparral dada por Weltz, et al. (1987) con una productividad primaria neta de 4,000 kg/ha (Smith et al. 2007). Consideran que la raíz no cambiaría sustancialmente una cubierta a unos pocos años, se asume que están en reposo (Kummerow et al. 1977).

Para la obtención de las variables de la ecuación para la estimación del factor C propuesta por Gonzalez y Bullock (en preparación) se retomó la metodología utilizada por los mismos autores, la cual consiste en primer lugar en limitaron el estudio a matorrales y no utilizaron la distinción de vegetación primaria y secundaria, porque es irrelevante para el propósito, así como entrar en conflicto con consideraciones históricas y ecológicas (Bullock, 1999).

Posteriormente se requirió de la localización de sitios potenciales de muestreo en toda la cuenca, por lo que se analizó el uso del suelo, información e imágenes de satélite disponibles en Google Earth (GE), rutas de acceso, para definirlos adecuadamente.

De un modelo digital de elevación de 30 m se obtuvo la elevación, la pendiente y la exposición, de cada sitio potencial mediante imágenes de satélite Landsat 5 TM y se procesó para obtener un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

Ya en campo, los sitios de muestreo fueron ubicados con GPS y/o imágenes, las variables y parámetros para la estimación del Factor C, fueron cuantificadas a través de transectos (Bauer, 1943) orientados perpendicularmente a la exposición del sitio. Se obtuvo también el aspecto (exposición) y la inclinación (pendiente) que fueron determinados a una distancia de al menos 20 m.

Para definir el transecto se estableció una cinta de 30 metros con cuidado para evitar romper plantas o remover la superficie a lo largo del transecto, obteniendo

las coordenadas de inicio y final con un GPS (por lo general <3 m). A lo largo del transecto se registró la entrada y salida de las posiciones de cada planta con diámetro >20 cm, el diámetro perpendicular al transecto, la especie y altura. También se realizó la medición de las rocas con diámetro >20 cm y partes del transecto sin cobertura en una secuencia de 20 puntos aleatorios a lo largo del transecto. Se calculó el promedio de categorías para los 20 puntos aleatorios y éste fue multiplicado por 25, con el propósito de asignar un valor (%) de la cobertura de suelo para cada transecto.

Con ayuda de una plomada se obtuvo la altura y estructura (rama, hoja o fruto) de la parte más baja de la planta, o en su caso la ausencia de dicha estructura, y lo que la plomada tocó a nivel del suelo (suelo, grava, hojarasca). Dentro de un microcuadrante con radio de 10 cm alrededor de este punto, se estimó la cobertura del suelo en el incremento del 25%.

La rugosidad superficial (lisa, rugosa, muy rugosa, columnas, cárcava, arroyos, hoyo) en el microcuadrante se clasificó en puntos representativos a lo largo y al lado del transecto.

La altura de goteo se calculó incluyendo sólo los puntos de cubierta de dosel de la plomada. Los puntos con cobertura de dosel bajo el suelo no se excluyeron del cálculo.

III.1.4.1 Índices de Programación Genética.

De acuerdo con Poli et al. (2008), la programación genética (GP), es una técnica de computación evolutiva inspirada en los principios de la evolución biológica, que se utiliza para crear programas que aprendan una función objetivo. El enfoque de GP es capaz de transformar estocásticamente las poblaciones de los programas en nuevas poblaciones por lo general mejores.

En el caso de imágenes Landsat, Puente et al. (2009), menciona que el conjunto de terminales estará representado por la información relativa a las bandas espectrales, como por ejemplo las bandas Rred, RNIR, Rgreen, etc. El sistema de la función estará representada por todas las operaciones aritméticas (+, -, * y ÷), ya que este tipo de las funciones son ampliamente utilizados en común para los índices de vegetación.

El diagrama de flujo (Fig. 10) del procedimiento desarrollado para generar nuevos estimadores del factor C, consiste en primer lugar, las imágenes de satélite es georeferenciada con el fin de preparar a los datos de entrada a través de la identificación de todos los píxeles en las bandas espectrales correspondientes a cada muestra en los datos de campo. A continuación, el espacio de búsqueda se define mediante los conjuntos de funciones y de la terminal a través de la especificación de los operadores matemáticos y los datos de entrada previamente identificados.

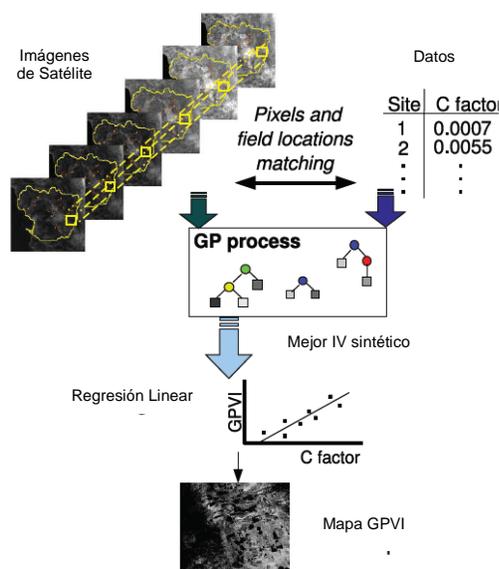


Figura 10: Diagrama de flujo general de la metodología utilizada para el cálculo del factor C a partir de índices de vegetación sintetizados por programación genética, Puente et al. (2009).

Puente et al. (2009) menciona que como se observó en sus experimentos, dos conjuntos diferentes de los conjuntos primitivos se estiman para el factor C de la

cuenca Todos Santos. La población inicial de soluciones se genera ahora utilizando el método de la rampa media y media. Después de eso, cada individuo es evaluado por la función de aptitud. La función de aptitud se basa en el coeficiente de correlación $P_{x,y}$, que indica la fuerza y la dirección de la relación lineal entre el factor C y los índices de vegetación evolucionado. La correlación es de 1 en el caso de una creciente relación lineal, -1 en el caso de una relación lineal decreciente. En este estudio se generaron tres índices de vegetación resultado de la programación genética, los cuales se denominan GPVI1, GPVI2 y GPVI3, que tienen índices de correlación de -0.74, 0.75 y 0.79 respectivamente con los datos de prueba, mientras que el índice de vegetación (NDVI) mostró un valor de 0.39, similar al obtenido por De Jong (0.45). Esto abre una ventana a la posibilidad de utilizar la percepción remota para el cálculo de C en matorrales mediterráneos con una mayor exactitud.

III.1.5 Factor de prácticas de conservación P.

Los valores del factor P son determinados por el alcance de las prácticas de conservación, tales como cultivos contorneados, en fajas y terrazas, o alguna combinación. Estas prácticas en general disminuyen el impacto erosivo de las precipitaciones y la esorrentía (Renard et al. 1996).

Smith et al. (2007), menciona que en la zona de estudio son pocas las prácticas de este tipo que aplican a nivel local, por lo que se asume un valor constante de 1.0.

Toda la información utilizada para la estimación de la erosión fue estandarizada asignándole el sistema de referencia espacial UTM Zona 11 Norte y DATUM WGS84, a los archivos raster les fue asignada una resolución espacial de 30m. Las herramientas del software ArcGIS 9.3 utilizadas para el procesamiento de

datos fueron *Spatial Analyst*, *ArchHydro*, *Rater Calculator*, *Hydrology*, con las cuales se realizó el cálculo de la dirección del flujo y acumulación, entre otros.

La metodología de RUSLE, fue aplicada en ambiente de programación SIG, siguiendo el esquema que se muestra en la figura 11.

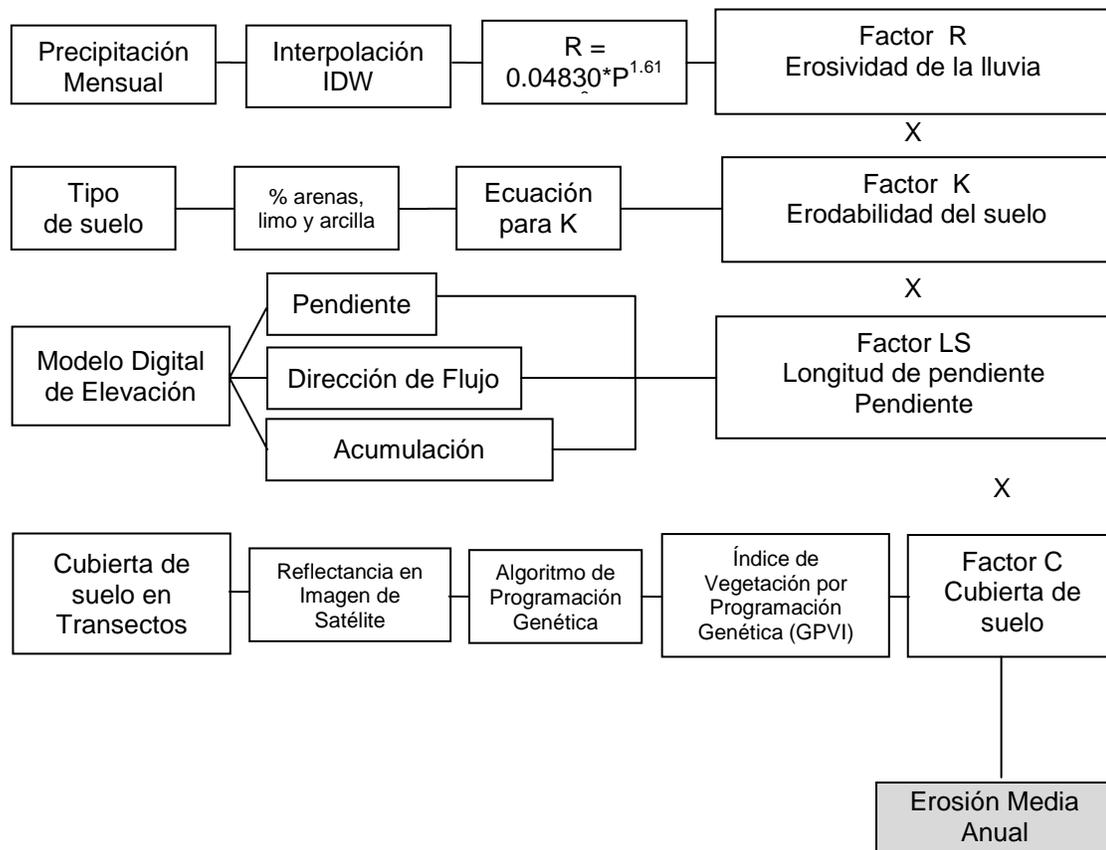


Figura. 11: Estructura de los datos utilizados para el modelo RUSLE e integrarlos al ambiente SIG.

III.2 Análisis de la distribución espacial.

En una cuenca, los suelos erosionados en las zonas altas se depositan dentro de la cuenca antes de llegar a la salida. Estas cuencas son, por tanto, divididas en sub-áreas para dar cuenta de la heterogeneidad espacial (Jain y Kothyari 2000).

Debido a la variación espacial de la heterogeneidad de las precipitaciones y de captación, tanto la erosión del suelo y los procesos de transporte de sedimentos son espacialmente variados. Esta variabilidad ha promovido el enfoque intensivo del uso distribuido de los datos para la estimación de la erosión en zonas de captación y producción de sedimentos mediante la discretización de una cuenca en sub-zonas cada una con características homogéneas y de distribución uniforme de las precipitaciones (Young et al. 1987; Beven, 1989).

Para agrupar la variación espacial de los parámetros como la topografía, el suelo y el uso del suelo en una cuenca, la metodología de Sistema de Información Geográfica, se adapta bien. Los SIG se pueden utilizar para la discretización de la cuenca en subcuencas y para el cálculo de tales características físicas de estas como la pendiente, uso del suelo y tipo de suelo, todo lo cual afecta los procesos de erosión y deposición en los diferentes sub-cuencas de una cuenca (Bhattarai et al. 2007).

Para tener en cuenta la variabilidad espacial, las cuencas hidrográficas se deben subdividir ya sea en una cuadrícula regular o en unidades de sub-áreas que tiene aproximadamente características homogéneas (Jain y Kothyari 2000; Wu et al. 2005; Jain et al. 2004). La técnica del SIG es adecuada para la cuantificación de la heterogeneidad en la topografía y características de drenaje de una cuenca tales como la pendiente, uso del suelo y tipo de suelo, elevaciones, entre otras, que contribuyen al desarrollo del proceso de erosión del suelo y de depósitos en diferentes zonas de una cuenca hidrográfica (Jain y Kothyari 2000; Jain et al. 2004, 2005.).

III.3 Incendios Forestales y erosión.

Muchas de las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y biológicas del suelo pueden ser afectados por los incendios forestales. El clima, la vegetación y la topografía de la superficie quemada controlan la resistencia del sistema suelo, y algunos cambios inducidos por el fuego, incluso puede ser permanente. Los incendios de baja a moderada intensidad, promueven la renovación de la vegetación dominante mediante la eliminación de especies no deseadas, el aumento transitorio del pH y nutrientes disponibles. Se producen cambios irreversibles en el ecosistema, pero el aumento de la hidrofobicidad puede hacer que el suelo tenga menor capacidad de absorber el agua y son más propensos a la erosión. Los incendios severos, tales como incendios forestales, por lo general tienen varios efectos negativos sobre del suelo. Causan una importante eliminación de materia orgánica, el deterioro de la estructura y porosidad, una considerable pérdida de nutrientes por volatilización, arrastre de cenizas en columnas de humo, la lixiviación y erosión, la marcada alteración de la cantidad y composición específica de contaminación microbiana y de las comunidades de invertebrados que viven en el suelo. Sin embargo, a pesar de las percepciones comunes, si las plantas logran rápidamente la recolonización del área quemada, la mayoría de propiedades del nivel anterior a los incendios se pueden recuperar y mejorar aún (Certini, 2005).

Los incendios forestales juegan un papel importante en el medio ambiente y en nuestra sociedad. Se puede poner en peligro las zonas urbanas, destruir grandes cantidades de madera productiva, afectan las cuencas y hábitat de vida silvestre, y causar la pérdida de vidas y bienes (Miller y Yool, 2002). La complejidad de los incendios forestales plantea retos importantes a la evaluación y la cartografía. Los incendios queman de manera diferente dependiendo de las características de las especies, destacan los atributos y la estructura (por ejemplo, la densidad, el diámetro, la altura), el terreno, la humedad, el viento, el tipo de suelo, la capa de sotobosque, la regeneración, entre otros. La forma resultante no uniforme en el

que los fuegos se quemarán en el paisaje (Weber y Stock, 1998) crean problemas en la estimación de las emisiones de los incendios y en la determinación de las incertidumbres en las que estas estimaciones se hacen (French, et al. 2004). Mientras que la colecta de vegetación pre- y post-incendio abordan muchos de los retos y las lagunas de conocimiento en la evaluación de los efectos del fuego y de las emisiones, la disponibilidad de dicha información es a menudo insuficiente.

Como resultado, ha habido un considerable interés en la integración de campo y los enfoques de detección a distancia (Lentile, et al. 2006). La teledetección se ha utilizado ampliamente para la detección, evaluación y monitoreo de incendios forestales, que van desde la interpretación de fotografías aéreas, el análisis de imágenes digitales aéreas y por satélite (Fraser y Li, 2002; Jia, et al. 2006;. Lentile et al. 2006). La complejidad del incendio, junto con los avances en el diseño del sensor y la calidad de la información han creado nuevos desafíos y oportunidades para el desarrollo de algoritmos para realizar el potencial de extracción de información de sensores remotos.

III.3.1. Índice de Severidad de Incendios.

La diferencia normalizada de relación de incendios (dNBR, por sus siglas en inglés) (Key et al. 2003; Key y Benson, 2006) se ha utilizado extensamente en los Estados Unidos para el mapeo operativo de incendios forestales y para proporcionar un índice de severidad de incendios. El método es altamente sensible a los cambios en la vegetación desde las imágenes pre-incendio contra post-incendio, y fue recomendado por Brewer et al. (2005) en una comparación de los seis métodos para la clasificación y cartografía de la gravedad de los incendios forestales.

La razón de incendio normalizado (NBR, por sus siglas en inglés) se calcula para una imagen determinada utilizando la reflexión de la parte superior de la atmósfera (en el sensor) derivada de Landsat TM banda 4 (NIR: 780-900nm) y la banda 7 (SWIR: 2090-2350nm). Estas bandas tienen las mayores diferencias en la respuesta al fuego de vegetación dañada, pero en direcciones opuestas (después de un incendio, una banda de 4 disminuye mientras que la banda 7 aumenta). Estas dos bandas ofrecen el mejor contraste entre la vegetación fotosintéticamente sana y quemada (Howard et al. 2002).

Key y Benson (2006) comentan que al comprender la respuesta de cada banda, uno puede comprender las relaciones de la NBR para las características del incendio. El NBR incorpora la reflectancia de la banda 4, que, naturalmente, reacciona de manera positiva a la superficie foliar y productividad de la planta, y la reflectancia de la banda 7, que responde positivamente a la desecación y algunas características de la superficie sin vegetación. La B7 tiene baja reflectancia (se absorbe) sobre la vegetación verde y superficies húmedas, incluido el suelo mojado y nieve, todo lo contrario en la banda 4.

Debido a que NBR mide la diferencia de B4 - B7, el resultado es positivo cuando la reflectancia en la B4 es mayor que en la B7. Este es el caso en la mayoría de las áreas con vegetación que son productivas. Cuando se está cerca de cero, B4 y B7 son aproximadamente iguales, como ocurre con las nubes, la vegetación no productiva, y suelos más secos o roca. Cuando NBR es negativo, B7 es mayor que B4. Esto sugiere un grave estrés hídrico en las plantas y los rasgos no vegetativos creados dentro de las quemaduras. Allí se encuentra, por ejemplo, disminución de la densidad de la vegetación y el vigor que responde negativamente a B4, junto con el aumento de sustratos expuestos y calcinados, que B7 registra positivamente.

La carbonización, secado de los componentes vivos e inertes, y la exposición del suelo mejoran la señal registrada por la B7 en comparación con la B4. Los

resultados sobre las quemaduras recientes, por lo general muestran casi cero o fuertemente negativo a NBR (Key y Benson, 2006).

NBR se calcula para cada imagen (antes y después de los incendios) mediante la ecuación (similar al NDVI):

$$NBR = \frac{(B4-B7)}{(B4+B7)} \quad (11)$$

El resultado de estos índices normalizados adopta valores entre -1 y 1.

La dNBR final (NBR diferenciadas, a veces también llamado delta NBR o Δ NBR) se obtiene como:

$$dNBR = NBR_{pre-incendio} - NBR_{post-incendio} \quad (12)$$

Los resultados de dNBR puede oscilar entre -2 y 2, pero en realidad es raro que los datos varíen más de -0.55 a 1.350, en función del alcance de los factores de perturbación que puedan afectar a los paisajes naturales hasta ahora encontrados. Resultados negativos de los valores post-incendio NBR son mayores que pre-incendio. Esto puede ser debido a las nubes en la imagen pre-incendio, o la productividad de especies vegetales en la imagen post-incendio.

dNBR es un modelo de severidad de incendio que mide el cambio que las imágenes Landsat TM han podido detectar en NBR. El primer producto dNBR es un rango continuo de valores que pueden ser utilizados directamente para la cartografía y el análisis (Tabla V).

Tabla V. Niveles de severidad típicos y ejemplos de rangos de dNBR.

NIVEL DE SEVERIDAD	RANGO DE dNBR
Mejora de rebrote alta	-0.50 a -0.25
Mejora de rebrote baja	-0.25 a -0.10
Sin quemar	-0.10 a +0.99
Severidad baja	+0.10 a +0.26
Severidad moderada-baja	0.27 a +0.43
Severidad moderada alta	+0.44 a +0.65
Severidad alta	+0.66 a +1.30

Debido a que son una diferencia de coeficientes normalizados, las unidades de dNBR son adimensionales. Por lo tanto, un valor dado puede representar una distribución uniforme de la severidad dentro del pixel, o la distribución desigual de pequeña escala de varios niveles de severidad. Sin embargo, el brillo de dNBR generalmente corresponde a una progresión constante de los efectos en relación con la comunidad pre-incendio.

El nuevo crecimiento vegetativo mejorado se detecta en aproximadamente el rango de -0.50 a -0.10 de dNBR. En un incendio reciente se pueden presentar estos después de una temporada de crecimiento, si las comunidades herbáceas se recuperan con rapidez. Valores por debajo de -0.55 son los probables efectos de nubes, o el ruido causado por errores de registro o anomalías en los datos originales de Landsat.

Los valores típicos de las zonas sin quemar caen en el rango cercano a cero, -0.10 a 0.10. Esto indica un cambio relativamente pequeño o ningún control sobre el intervalo de tiempo. Las diferencias fenológicas entre las escenas pre y post-incendio puede cambiar la distribución de valores no quemado.

Los valores positivos se producen cuando NBR post-incendio es menor que NBR pre-incendio. Estos ocupan valores en el rango de 0.10 a 1.30. Los valores por

encima de 1.35 son los probables efectos de nubes. Las sombras de nubes no tienen un efecto pronunciado sobre dNBR, porque NBR es una relación normalizada y no está influida tanto por la variación de brillo que es coherente en todas las bandas, como la causada por la sombra, ya que es incompatible con las diferencias espectrales entre las bandas. Sin embargo las sombras de nubes tienden a aumentar dNBR un poco en la imagen pre-incendio y disminuir ligeramente en la escena post-incendio.

III.4. Modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

El modelo se fundamenta en el concepto del balance de agua, el cual considera el agua que entra, se almacena y sale de la cuenca como lo describe la ecuación 13.

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (13)$$

Donde:

SW_t = contenido de agua en el suelo en el día t

SW = el contenido de agua en el suelo

t = tiempo en días

R_i = precipitación diaria

Q_i = cantidad de escorrentía diaria

ET_i = evapotranspiración diaria

P_i = percolación diaria

QR_i = flujo base

El modelo SWAT se agrupan en ocho componentes: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos.

En el presente trabajo, se presenta una breve descripción de algunos de los principales componentes del modelo. Para descripciones más detalladas de los diferentes componentes del modelo se muestran en (Arnold et al. 1998; Neitsch et al. 2005).

III.4.1. Escurrimiento superficial.

La esorrentía superficial se produce siempre que la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración. El modelo SWAT ofrece dos métodos para la estimación de la esorrentía superficial: el de curvas numeradas (USDA-SCS, 1972) y el método Green & Ampt infiltration (Green y Ampt, 1911). Utilizando datos diarios o cada hora de precipitación, el modelo SWAT simula el volumen de esorrentía superficial y la tasa de pico de esorrentía para cada Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU por sus siglas en inglés). La ecuación para el método de curvas numeradas es:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (13)$$

Donde:

Q= escurrimiento (mm)

P= precipitación (mm)

S= parámetro de retención (mm)

El parámetro de retención es calculado por:

$$S = 24.5 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (14)$$

El valor de curva numerada está en función de la permeabilidad del suelo, el uso de suelo y las condiciones de agua en el mismo.

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés) clasifica los suelos en cuatro grupos hidrológicos basados en las características de infiltración de cada uno de estos. La NRCS Soil Survey Staff define un grupo hidrológico como un grupo suelos con potencial de escurrimiento similares bajo una tormenta de condiciones similares. Las propiedades del suelo que influyen en la esorrentía potencial son los que no tienen repercusiones en la tasa mínima de infiltración para un suelo desnudo después de un humedecimiento prolongado o cuando se congela. Estas propiedades son la profundidad de la capa freática, la conductividad hidráulica y la profundidad de la capa permeable. El suelo puede ser colocado en uno de los cuatro grupos A, B, C.

Grupo A: los suelos tienen bajo potencial de escurrimiento y alta infiltración aún cuando están saturados. Consisten principalmente de suelos profundos, de bien drenados a excesivamente drenados, arenas y gravas principalmente y tienen alto rango de transmisión de agua (>0.0021 mm/s).

Grupo B: los suelos tienen valores de infiltración moderados cuando se encuentran completamente húmedos y consisten principalmente de suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados a bien drenados, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen un índice moderado de transmisión de agua (0.0011-0.0021 mm/s).

Grupo C: los suelos tienen baja infiltración cuando están completamente húmedos. Son suelos en su mayoría con una capa poco permeable que impide el

movimiento vertical del agua y suelos de texturas moderadamente fina a fina. Esos suelos tienen un rango bajo de transmisión del agua.

Grupo D: Los suelos tienen un alto potencial de escurrimiento. Tienen un bajo rango de infiltración cuando está completamente húmedo. Consisten en suelos arcillosos con un alto potencial de abultamiento, y un alto nivel freático permanente, con una capa de arcilla sobre o cerca de la superficie, y son suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen un valor muy bajo de transmisión (0-0.0003 mm/s).

III.4.2. Sedimentos.

El modelo SWAT calcula la erosión causada por la precipitación, las escorrentías y el aporte de sedimentos con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (MUSLE por sus siglas en inglés) (Williams and Berndt, 1977):

$$sed = 11.8 \times (Q \times q_p)^{0.56} \times K \times LS \times C \times P \quad (15)$$

Donde:

sed= es la producción de sedimentos en toneladas métricas.

Q= volumen de escorrentía de una lluvia dada en m³.

qp= es el caudal máximo en m³/s.

K= es el factor de erosionabilidad del suelo.

LS= es el gradiente de la pendiente y longitud de la pendiente

C= es el factor de la gestión de la cubierta del suelo

P= es el factor de prácticas de conservación de suelos.

La erosión del suelo es un proceso hidrológicamente impulsado y este depende de sedimento aportado por el escurrimiento (Kinnell, 2005). Al incluir la escorrentía como un factor independiente en el modelo de erosión, MUSLE tiene una mayor precisión de la predicción de la erosión del suelo sobre USLE y RUSLE (Williams, 1975a, b; Williams y Berndt, 1977; Erskine et al. 2002; Neitsch, et al. 2005; Sadeghi et al. 2004).

III.4.3. Datos de entrada del modelo.

Para la integración de los datos de entrada al SIG, necesariamente se realizan mediante la interfaz ArcSWAT, incluyendo el modelo digital de elevación, datos sobre tipos y uso de suelos y la red de drenaje. Los datos observados para la calibración de caudal y sedimentos también deben importarse mediante la interfaz. La información mínima requerida se detalla a continuación:

- Topografía (modelo de elevación)
- Red de drenaje
- Suelos.
- Uso del suelo y cubierta vegetal.
- Información climática (precipitación y temperatura) durante un periodo mínimo de 10 años.

III.4.4. Elaboración de la base de datos.

Para la alimentación de los datos del modelo, se partió de la información generada utilizando RUSLE, como la delimitación de la cuenca, subcuencas y corrientes, se retomaron estos vectores y se incorporaron al modelo de elevación requerido por la interfaz ArcSWAT para el trazo y estimación de los parámetros métricos y estadísticos de cada uno de estos.

Se integro información de precipitación y temperatura máxima y mínima de las estaciones San Carlos, Ojos Negros y Sierra Juárez (ANEXO I). Para el análisis de las unidades de respuesta hidrológica (HRU), se retomaron los dos tipos de cubierta vegetal para la cuenca con valores de 0.041 y 0.45 respectivamente. Se asignaron los valor del factor C y factor K, utilizado en RUSLE, el coeficiente de Manning para el flujo superficial y los valores de curvas numeradas para los tipos de cubierta vegetal (Tabla VI) (Kurczyn et al. (2007) y Moraila (2010), otros parámetros requeridos son la relación energía/biomasa, índice de cosecha (ANEXO I) como se desconocen estos valores, se utilizaron los mínimos asignados por el programa.

Tabla VI: Parámetros hidrológicos utilizados para el modelo SWAT.

TIPO DE CUBIERTA	USLE-C	Valor de Flujo superficial de Manning	Curvas Numeradas			
			A	B	C	D
Chaparral	0.041	0.25	25	71	81	89
Suelo Desnudo	0.45	0.25	25	80	87	93

IV. RESULTADOS

IV.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.

Una evaluación detallada de la erosión de las cuencas hidrográficas es muy dependiente del contexto espacial, económico, ambiental y cultural (Warren, 2002). A pesar del desarrollo de una gama de ecuaciones de base física de erosión del suelo y transporte de sedimentos, las estimaciones de la producción de sedimentos a escala regional o de cuenca, en la actualidad se logran principalmente a través de simples modelos empíricos, ya que los datos necesarios para la aplicación de modelos físicos no están disponibles a esta escala. Los modelos empíricos están siendo ampliamente utilizados para la estimación de la erosión del suelo y la producción de sedimentos por su sencillez, que se hace aplicable incluso con una cantidad limitada de datos de entrada disponibles.

IV.1.1. Factor erosividad de la precipitación R.

De los datos calculados para el factor R se presenta un máximo $>67 \times 10^3$ y un mínimo de $24,881 \text{ MJ mm/km}^2 \text{ h año}$ (Tabla VII), estos asociados a la estaciones Sierra Juárez y El Ciprés, donde se manifiestan los registros máximos y mínimos de precipitación. El valor de la mediana para los datos de erosividad es de $37,724 \pm 13,176.8 \text{ MJ mm/km}^2 \text{ h año}$ (Tabla VIII).

Tabla VII: Estaciones meteorológicas aledañas a la cuenca de Arroyo San Carlos con precipitación total anual y estimación del Factor R.

CLAVE	ESTACIÓN	PERIODO	PRECIPITACIÓN		FACTOR R MJ mm/km ² h año
			MEDIA	ANUAL (mm)	
2035	OJOS NEGROS	1976 - 2007		235	31,752
2045	SAN CARLOS	1962 - 2007		325	53,519
2054	SAN RAFAEL	1948 - 1996		241	38,422
2062	SANTA ISABEL	1961 - 1986		204	38,395
2065	SANTO TOMAS	1962 - 2006		256	36,490
2066	SIERRA JUAREZ	1979 - 2006		376	67,850
2072	PRESA EMILIO LOPEZ ZAMORA	1968 - 1983		301	48,831
2104	EL CIPRES	1948 - 2007		202	24,881
2106	MANEADERO	1982 - 2006		206	25,701
2153	EJIDO URUAPAN	1948 - 2007		258	37,053

Tabla VIII: Parámetros estadísticos de las 10 estaciones meteorológicas utilizadas para la estimación del Factor de erosividad de la precipitación.

DATOS	PRECIPITACIÓN		FACTOR R MJ mm/km ² h año
	MEDIA	ANUAL (mm)	
MÁXIMO		376	67,850
MÍNIMO		202	24,881
MEDIA		268	39,349
MEDIANA		261	37,724
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		53.8	13,176.8

Interpolando el valor de precipitación media anual obtenida para cada una de las estaciones meteorológicas (Fig. 12), se obtuvo que el 77% de la superficie de la cuenca cubre el intervalo de 35×10^3 a 45×10^3 MJ mm/km² h año, (Tabla XIX) el resto de la cuenca (23%) oscila entre valores de 45×10^3 y $>57 \times 10^3$ MJ mm/km² h año, este último asociado a la parte alta de la cuenca y la cercanía con la estación Sierra Juárez. Dentro de la cuenca se ubica la estación San Carlos, a 170 msnm y presenta un registro de 41 años de datos, mostrando una precipitación promedio anual de 325 mm, superior a la precipitación media de las estaciones

consideradas (268 mm). El valor de erosividad estimado para la estación es de $\sim 53,519$ MJ mm/km² h año, categorizado entre 5% de superficie que cubre el intervalo de 50×10^3 a 55×10^3 MJ mm/km² h año. Los parámetros estadísticos del raster obtenido y el respectivo histograma se muestran en la Fig. 13.

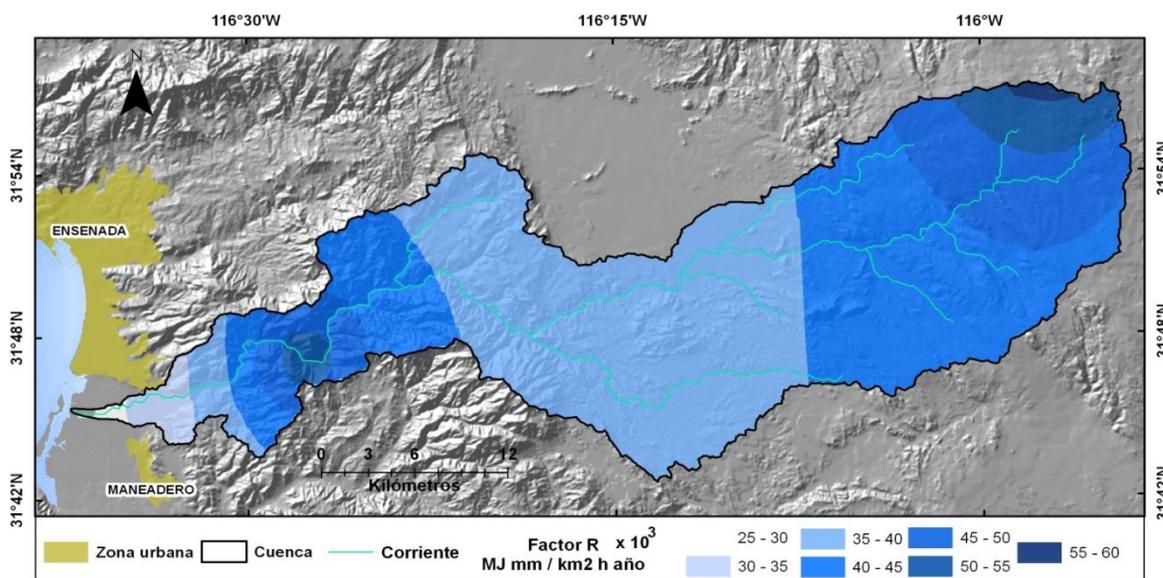


Figura 13: Mapa de Factor R (erosividad de la escorrentía) generado a partir de datos mensuales de precipitación (mm).

Tabla XIX: Superficie ocupada por los diferentes rangos del factor R calculado.

RANGO 10^3 MJ mm/km ² h año	SUPERFICIE (km ²)	%
25 – 30	4	0.3
30 – 35	15	2
35 – 40	350	43
40 – 45	283	34
45 – 50	121	15
50 – 55	42	5
55 – 60	7	0.8

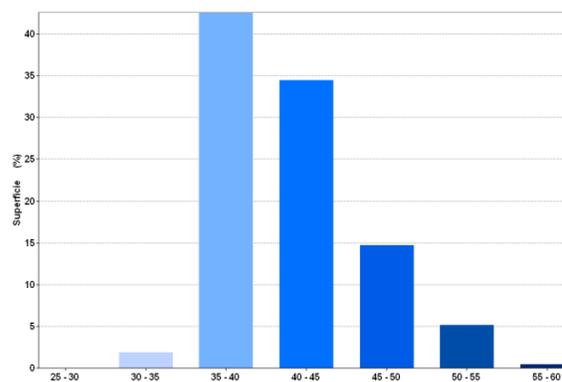


Figura 14: Histograma y parámetros estadísticos de la imagen raster del factor R.

IV.1.1.1. Análisis de datos de la estación hidrometeorológica San Carlos.

Del análisis de los datos de la estación hidrometeorológica San Carlos, para 1972-1982, se obtuvieron elementos climáticos tales como temperatura máxima, mínima, promedio, precipitación anual y promedio mensual. Parte de estos datos fueron utilizados para integrarlos al modelo hidrológico SWAT para realizar las simulaciones y validación de datos simulados.

IV.4.1. Precipitación y temperatura.

Se retomo el periodo de años incluidos para las simulaciones del modelo SWAT que corresponden de 1972 a 1982, se eligió este periodo de datos porque derivado de análisis de la estación San Carlos se encontró que para estos años, había mejor confiabilidad en los datos registrados. Durante este periodo, la mayor precipitación anual fue en el año 1980 con 581 mm, registrando 210 mm en el mes de enero (Fig.14), superior a la precipitación promedio de la zona, el mismo caso se registró para 1978, lo anterior debido a que para estos años se presentaron anomalías por la presencia de El Niño Oscilación del Sur ENSO, por sus siglas en inglés (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/>). En caso contrario el año con menor precipitación fue 1972 con una precipitación total anual de 176 mm, en el mes de diciembre de ese año registro la precipitación máxima con 60 mm.

Para el caso de valores de temperatura, los registros mínimos se tuvieron para diciembre y/o enero de cada año (Fig. 14), el registro mínimo durante todo el periodo analizado fue superior a 5°C. Los registros máximos de temperatura se tuvieron en 1972 durante el mes de agosto, lo mismo sucedió para septiembre de 1979, en ambos la temperatura fue superior a los 30°C y correspondió con el año de menor precipitación y próximo al inicio del año con mayor precipitación del periodo analizado. En general la temperatura mínima varió entre 5°C y 18°C, las máximas van de 16°C a 30°C.

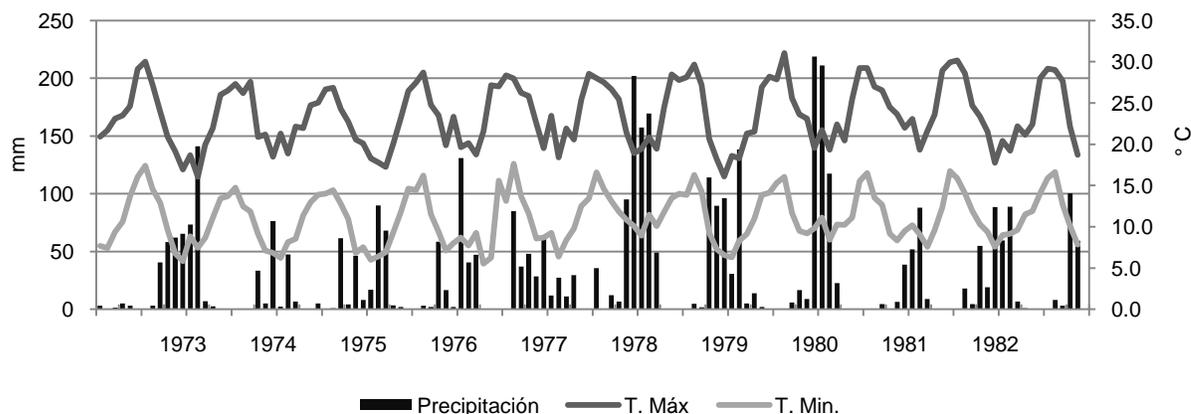


Figura 14: Registro de precipitación y temperatura máxima y mínima para el periodo 1972-1982 en la estación hidrometeorológica San Carlos.

Al organizarse el total de datos de precipitación y temperatura de la estación San Carlos de manera mensual, se observó que las temperaturas máximas se presentan durante el verano específicamente para los meses de agosto y septiembre (Tabla X) con temperaturas $>34^{\circ}\text{C}$ y las mínimas durante los meses de diciembre y enero que corresponde a la estación de invierno con temperaturas $<3^{\circ}\text{C}$, coincidiendo con los meses de mayor precipitación de diciembre a marzo con precipitaciones $>40\text{ mm}$ (Fig. 15).

Tabla X: Datos de precipitación y temperatura mensuales de la estación San Carlos para 1972 - 1982.

VARIABLE	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
PRECIPITACIÓN	10.3	32.0	45.8	59.3	68.4	62.9	24.5	5.1	1.4	1.3	2.9	7.6
TEMP. MÁXIMA	33.8	30.5	26.9	27.7	28	27.8	29.5	29.4	31.5	33	34.3	36
TEMP. MÍNIMA	7.9	5.4	3.1	2.9	4.3	4.8	5.6	6.5	8.2	10.3	10.8	10.2

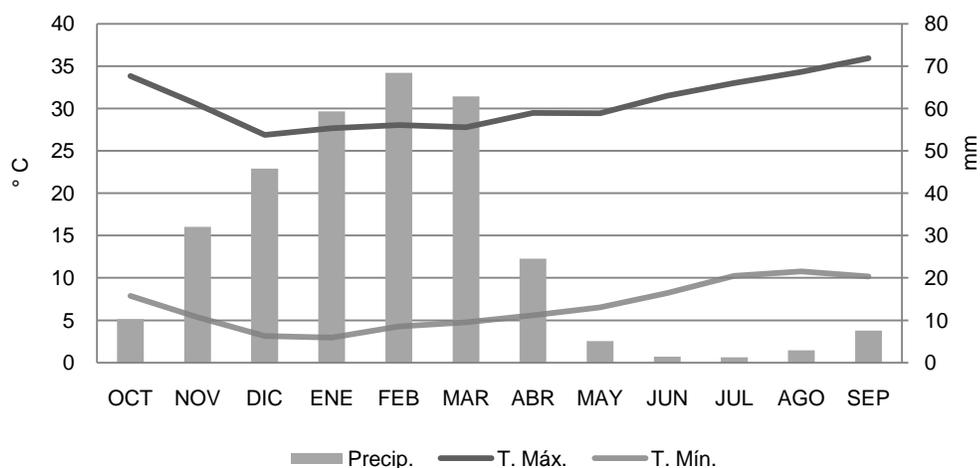


Figura 15: Valores de precipitación y temperatura mensuales de la estación San Carlos

IV.4.2. Caudal y Sedimentos.

Los datos de caudal y sedimentos se agruparon por año y mes para realizar el análisis correspondiente. Es importante mencionar que en algunos casos para la representación gráfica se redujo el valor de la escala del eje para caudal y sedimentos, esto para poder mostrar adecuadamente la variación de los datos registrados, aunque se hará mención de la temporalidad de los valores máximos representados.

Para los datos de caudal durante el periodo de 1972 a 1982 se observó que durante los eventos de mayor precipitación (1978 -1980) se presentaron los valores máximos de caudal registrado (Fig. 16), específicamente para el mes de marzo de 1978 con un registro $>29 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$, este registro se tiene dos meses posterior al registro máximo del valor para el mismo año. Se nota un incremento a partir de este evento, durante los meses de enero a marzo $>2 \cdot 10^6$ a $>29 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ respectivamente. La misma distribución se muestra nuevamente en 1980, iniciando en el mes de enero con un registro $>3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ llegando hasta $23 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ en el mes de marzo. Como se mencionó anteriormente en estos dos años se presentó el fenómeno de la ENSO.

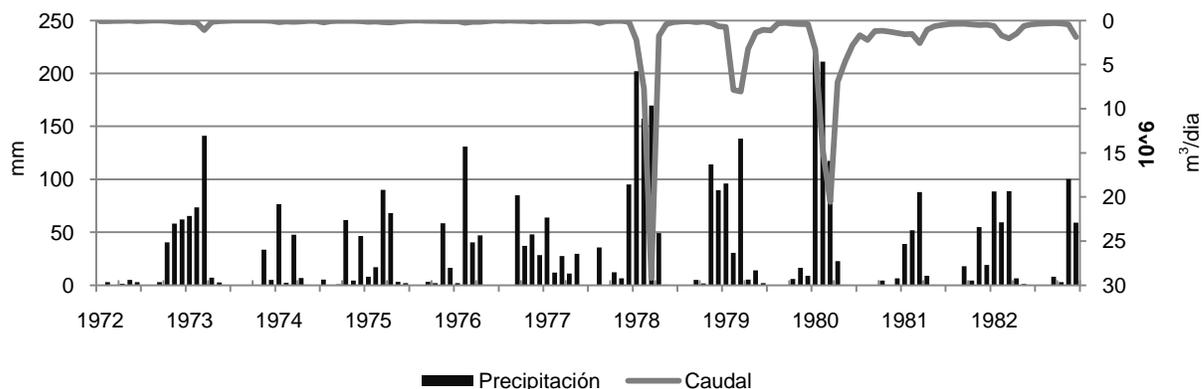


Figura 16: Precipitación y caudal observados durante 1972 a 1982 en la estación San Carlos.

El periodo con mayor cantidad de caudal registrado fue de 1978 a 1980, ya que las variaciones fluctuaron de $72 \cdot 10^6$ m³/día a $29 \cdot 10^6$ m³/día.

Para los datos de sedimentos analizados se observó que los valores máximos obtenidos corresponden al año 1978 con $260 \cdot 10^3$ ton/día registrados para el mes de marzo del mismo año, retomando los datos de caudal, para este mismo mes se tiene un registro de $29 \cdot 10^6$ m³/día, para 1980 se presenta una acumulación de sedimentos máximas para el mes de marzo $>180 \cdot 10^3$ ton/día que concuerda con los meses de registro máximo de precipitación del mismo año (Fig. 17).

Para el periodo de años de 1972 a 1977, solo se tiene registros para algunos meses, destaca el registro que se presentó para el mes de marzo de 1973 con $11 \cdot 10^3$ ton/día con registro máximo de precipitación de 141 mm, el resto de los registros, no contiene datos o son valores mínimos <200 ton/día.

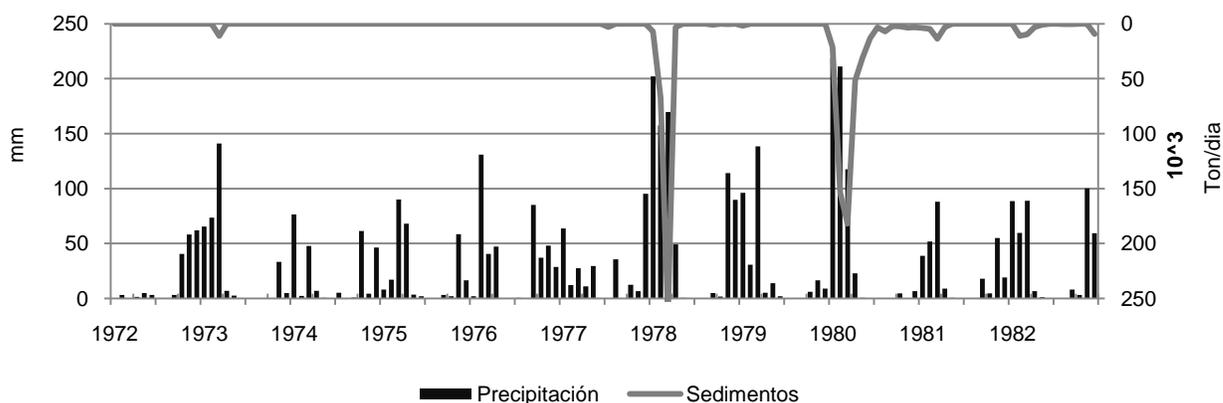


Figura. 17: Precipitación y sedimentos observados entre 1972 a 1982 en la estación San Carlos.

Finalmente en la Fig. 18, se asocian los datos de caudal y sedimentos observados para el periodo analizado, durante el mes de marzo de 1978 se registra un máximo de caudal y un registro máximo de sedimentos, para 1979 la precipitación total anual es de 317 mm, un caudal de $7.8 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{día}$ para febrero y $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ para marzo, el registro máximo de sedimentos se tiene para 1978 con $260 \cdot 10^3 \text{ ton/día}$. Para 1980, el caudal máximo observado se presenta durante marzo con $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$. Los datos descritos anteriormente se encuentran registrados en el ANEXO II.

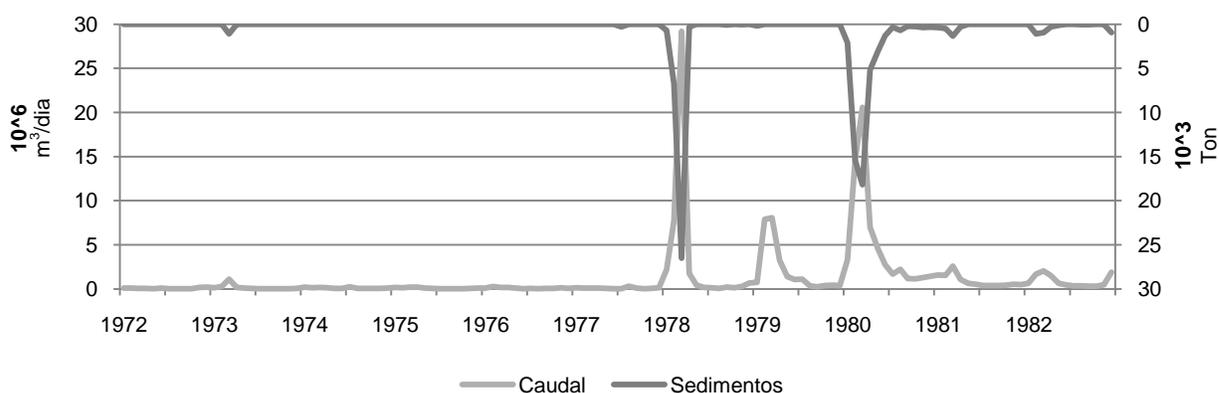


Figura 18: Caudal y sedimentos observados durante 1972 a 1982 en la estación San Carlos.

IV.1.2. Factor de erodabilidad del suelo K.

Derivado del análisis granulométrico realizado a las 10 muestras de suelo obtenidas en diferentes sitios de la cuenca, se obtuvo que el total de estas presentan un contenido de arenas >98% (Tabla XI), con estos datos, se retomó este porcentaje como partícula primaria y la media aritmética del intervalo de arenas para calcular la erodabilidad utilizando la ecuación 4.

Tabla XI: Porcentajes de arena y limo y Erodabilidad del suelo obtenidos para los diferentes tipos de suelo en la cuenca del Arroyo San Carlos.

TIPO DE SUELO	SUPERFICIE km ²	% ARENA	% LIMO	ERODABILIDAD DEL SUELO ton h/MJ año
LITOSOL	679	98	1.4	0.045
REGOSOL	93	99	-	0.045
FEOZEM	27	99	-	0.045
PLANOSOL	17	-	-	-
FLUVISOL	6	99	-	0.045

Para la zona de estudio se tienen que 83% del área está comprendida por Litosol del cual se obtuvo un porcentaje de arenas de 98% y un valor estimado de erodabilidad de 0.045 ton h/MJ año. El valor factor K obtenido para los tipos de suelo restantes es similar ya que el contenido de arenas oscila en el mismo intervalo. Considerando que no existe una variación representativa entre los valores obtenidos de la erodabilidad del suelo, se definió como valor obtenido del factor K para toda la cuenca 0.044 ton h/MJ año (Fig. 19).

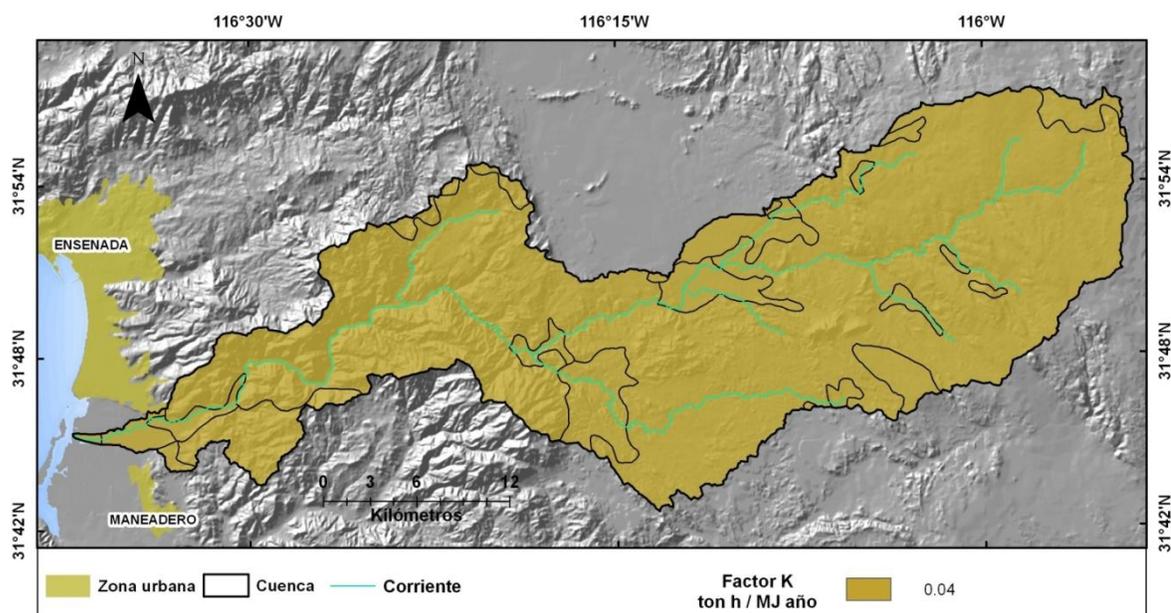


Figura 19: Mapa del Factor K (erodabilidad del suelo) para la cuenca del Arroyo San Carlos.

IV.1.3. Factor de longitud de pendiente y pendiente LS.

El mapa obtenido para el factor topográfico LS en la cuenca del Arroyo San Carlos (Fig. 20) presenta valores medio y máximo de 1.8 y 42.6 respectivamente y una desviación estándar de 3.7. Los valores máximos se asocian con áreas de fuertes pendientes situadas en la zona denominada como Cañón San Carlos.

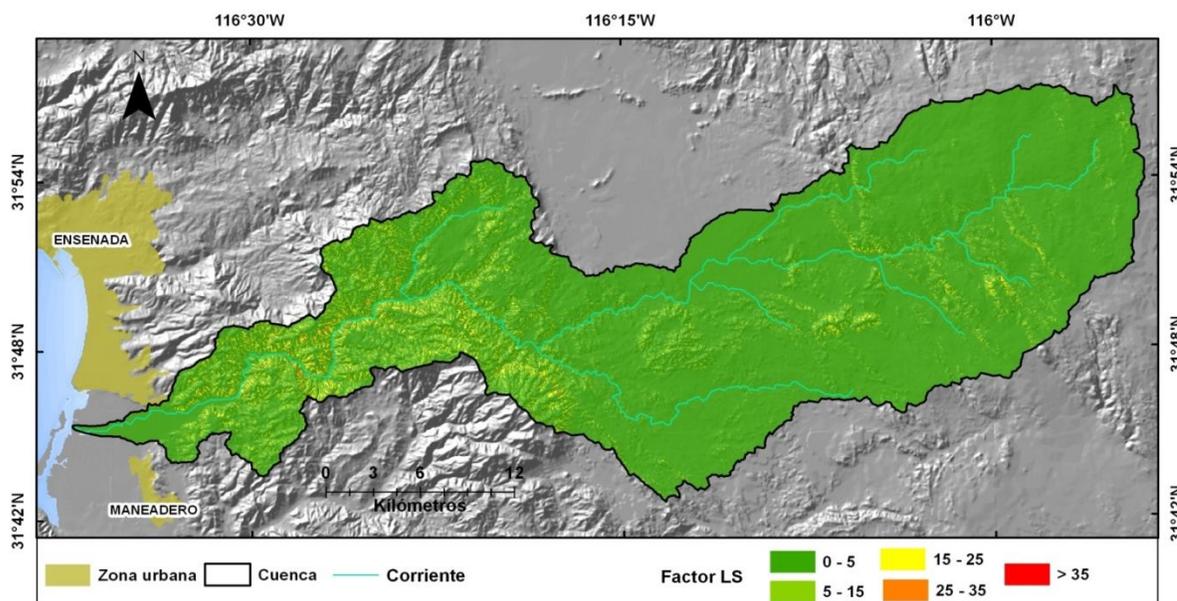


Figura. 20: Mapa del Factor LS (longitud de pendiente y pendiente) calculado según la propuesta de Kinell (en línea).

Del total de la superficie de la cuenca 90% comprende valores del factor LS entre 0 y 5 (Tabla XII), presentes en las zonas donde la pendiente es baja como la porción central y la desembocadura de la cuenca, 8% de la cuenca comprende valores entre 5 y 15 y solo 2% de la cuenca se presentan valores >15.

Tabla XII: Superficie y porcentaje cubierto de los diferentes intervalos del Factor LS obtenidos para la cuenca del Arroyo San Carlos.

INTERVALO	SUPERFICIE (km ²)	%
0 – 5	740	90
5 – 15	65	8
15 – 25	15	1.8
25 – 35	2	0.2

IV.1.4. Factor de cobertura vegetal del suelo C.

Se obtuvieron 24 sitios de muestreo (Tabla XIII). La ubicación precisa de los sitios en campo fue perturbado por la altitud, exposición y pendiente, por lo que varios puntos fueron desplazados a distancias cortas durante el trabajo en campo. También se trató de tomar pequeños grupos de puntos, con diferentes características pero geográficamente cercanas, para simplificar la operación logística.

Se realizó la medición de las variables requeridas por la ecuación 10 en campo (Fig. 21) y se registraron en formatos previamente elaborados en los cuales se integraron la latitud y longitud inicial y final del transecto, el diámetro de la planta, especie, altitud, exposición y la pendiente del sitio de muestreo. En 20 puntos de distancias aleatorias dentro del transecto, se obtuvo la estructura y altura, la rugosidad, el tipo y porcentaje de cobertura.

Del diámetro de la planta se obtuvo la cobertura aérea en forma proporcional (p) de la sumatoria de las alturas de la planta y la cantidad de puntos donde se registro la altura resulto h , para el porcentaje de cobertura se asignaron 5 intervalos (0= 0-1%, 1=1-25%, 2= 25-50%, 3=50-75% y 4=75-100%) y se valoró visualmente el porcentaje que correspondía a cada punto, de esta manera se obtuvo el porcentaje de la cobertura del suelo (g). Por último para el índice de rugosidad se asignaron 7 posibles tipos (1=lisa, 2=rugosa, 3=muy rugosa, 4=columnas, 5=arroyo, 6=cárcavas y 7=hoyos) también fueron valorados de manera visual asignando el valor correspondiente a cada punto dentro del transecto, se obtuvo el promedio de estos para determinar r .

Tabla XIII: Listado de los 24 Sitios de muestreo localizados al interior de la cuenca del arroyo San Carlos

NP	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	EXPOSICIÓN	PENDIENTE (°)
1	31.93955	-115.96768	1602	SE	6
2	31.90394	-116.09681	1133	SE	2
3	31.88564	-116.09546	1068	NW	8
4	31.83803	-116.06443	1010	W	2
5	31.84855	-115.92211	1708	E	4
6	31.89209	-116.00734	1433	E	5
7	31.88728	-116.06654	1243	N	8
8	31.81823	-116.05922	1041	W	3
9	31.86182	-116.11639	877	SE	5
10	31.87434	-116.31293	773	E	6
11	31.81298	-116.29374	603	E	20
12	31.79612	-116.28115	635	NE	10
13	31.83821	-116.28887	701	S	7
14	31.84435	-116.27671	774	NW	12
15	31.72445	-116.20024	860	N	2
16	31.75359	-116.24019	636	NE	0
17	31.75783	-116.20911	789	S	1
18	31.76839	-116.26283	708	SE	7
19	31.79981	-116.25288	742	W	7
20	31.87743	-116.37567	714	W	15
21	31.79187	-116.44266	214	W	25
22	31.78631	-116.45897	165	SW	37
23	31.77766	-116.50574	80	NW	37
24	31.76684	-116.54099	60	S	15



Figura 21: Medición en campo de las variables requeridas para la estimación del Factor C en la cuenca del Arroyo San Carlos.

Con el registro y medición de las variables descritas anteriormente, posterior al trabajo de campo se realizó la estimación del factor C, para cada uno de los sitios de muestreo identificados y distribuidos a lo largo de la cuenca (Fig.22).

Aplicando la ecuación 10 a las mediciones de campo, se presentó un valor mínimo de 0.019 en el sitio de muestreo 12 (Tabla XIV), que se caracteriza por estar ubicado a una altitud de 635 m, pendiente de 10° y exposición de la ladera en dirección NE, el caso contrario, el valor máximo se registro en el sitio de muestreo 2, con altitud >1100 m, pendiente de 2° y exposición SE. El valor medio obtenido de estos datos fue de 0.036 y una desviación estándar de ± 0.015 . El valor con mayor frecuencia fue el de 0.03 a 0.035 (Fig. 23).



Figura 22: Distribución de los sitios de muestreo obtenidos en campo para el cálculo del factor C de RUSLE, y rutas de acceso.

Tabla XIV: variables para el cálculo del Factor C y valor obtenido para el mismo, utilizando la ecuación propuesta por GOnzalez y Bullock (en preparación).

NP	p	h (m)	g	r	C
1	0.44	0.26	58.7	1.8	0.034
2	0.24	0.45	45	2.5	0.076
3	0.35	0.42	65	2.1	0.034
4	0.46	0.34	58.7	2.3	0.035
5	0.74	0.27	52.5	2.5	0.024
6	0.56	0.43	37.5	1.7	0.060
7	0.50	0.35	40	2.2	0.061
8	0.59	0.46	43.7	1.8	0.047
9	0.41	0.37	38.7	2.1	0.073
10	0.60	0.42	45	1.4	0.042
11	0.65	0.23	47.5	1.9	0.034
12	0.77	0.29	55	1.7	0.019
13	0.41	0.37	47.5	2	0.054
14	0.73	0.21	32.5	2	0.045
15	0.59	0.40	56.2	2	0.031
16	0.21	0.76	52.5	2.5	0.063
17	0.80	0.27	48.7	2	0.021
18	0.80	0.26	46.2	2.1	0.024
19	0.65	0.20	42.5	2	0.039
20	0.66	0.23	48.7	2.1	0.032
21	0.82	0.19	32.5	0.6	0.028
22	0.74	0.26	31.2	1.3	0.045
23	0.66	0.20	51.2	2.2	0.029
24	0.39	0.21	57.5	2	0.039

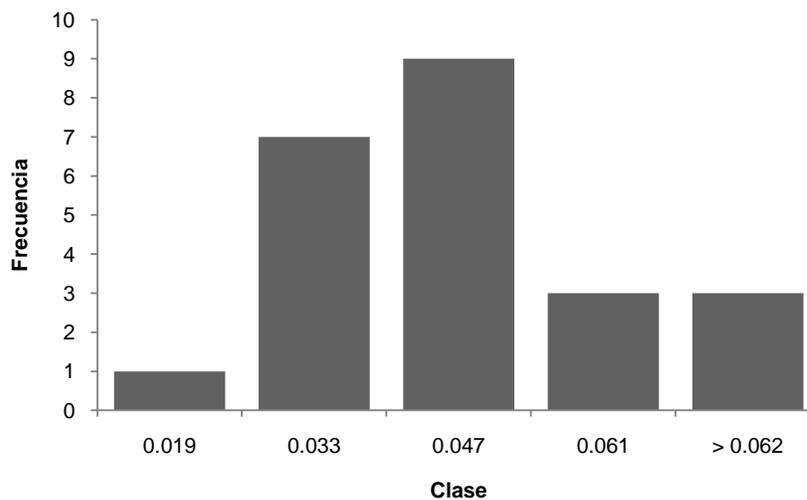


Figura 23: Histograma de frecuencia de valores del factor C obtenidos para la cuenca del Arroyo San Carlos.

IV.1.5. Índices de cobertura C por Programación Genética.

Como función objetivo los valores del factor C calculados a partir de los transectos de campo (tabla XIV) se realizó el procesamiento a través del algoritmo de la programación genética desarrollado por Puente et al. (2009) para el cálculo de los mejores índices de cobertura C ya que el trabajo en campo se llevó a cabo los en junio de 2010, se procesó la imagen de satélite Landsat 5 TM con coordenadas (WRS2) de pase 39 renglón 38 de fecha 24 de junio de 2010 (Fig. 24).

Para reducir el espacio de almacenamiento y el tiempo de procesamiento, se cortó la imagen para incluir solo el área de la CASC, el procesamiento posterior se aplicó solo al fragmento de esta imagen. Las imágenes Landsat 5 se convirtieron a reflectancia como se describe en Chander y Markham (2009). Posteriormente se calcularon los índices de vegetación como el NDVI, NDTI, GVI, EVI, RVI, SASI, distancias angulares, entre otros.(Myneni et al. 1995) Se obtuvieron los 30 mejores índices de vegetación por programación genética, algunos de estos se muestran en la Tabla XV, con diferentes valores de r para *training* (datos de campo) y *test* (datos retomados de Puente 2009) y formulas.

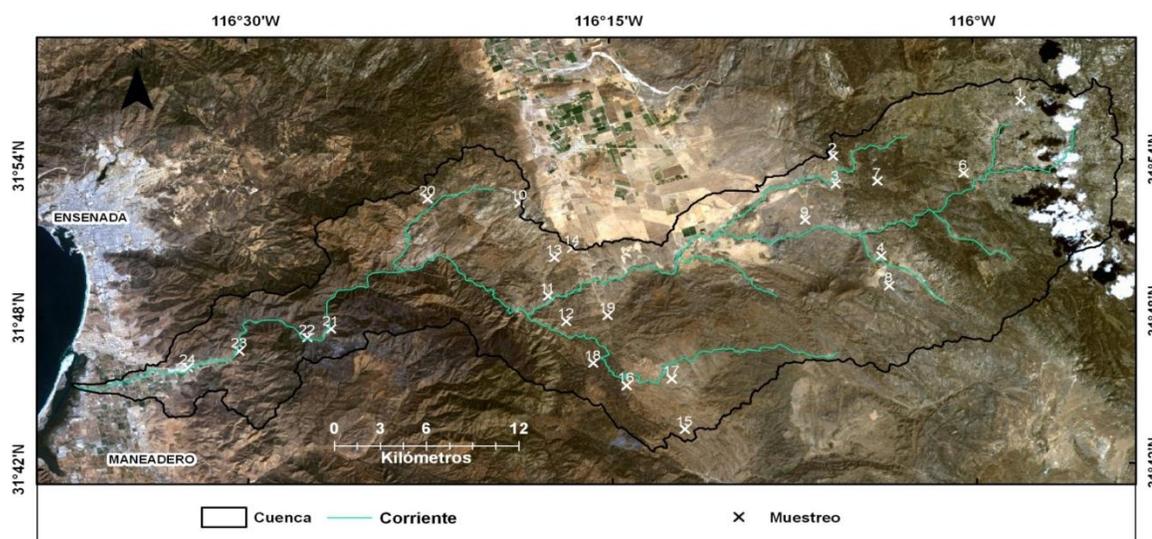


Figura 24: Imagen de satélite Landsat 5 TM, P39-R38, de fecha 24 de junio de 2010, donde se muestra el límite de la cuenca del arroyo San Carlos y los 24 sitios de muestreo.

Tabla XV: Algunos índices de vegetación obtenidos por programación genética.

N	r TRAINING	r TEST	RM S	FORMULA DEL ÍNDICE
GPVI -2	0.57	0.52	0.08	NDSI(NIR,RSI(NDSI(C_NDTI,C_EVI),C_RVI4))
GPVI -4	0.41	0.42	0.03	plus(plus(plus(plus(C_NDVI,SWIR2),plus(C_RVI4,SWIR2)),plus(plus(plus(C_NDVI,SWIR2),plus(aNIR,C_RVI4)),plus(aNIR,SWIR2))),plus(plus(aNIR,C_NDVI),plus(C_NDVI,plus(C_NDTI,aSWIR1))))
GPVI -23	0.55	0.46	0.16	RSI(minus(minus(C_NDTI,plus(plus(C_NDTI,C_RVI4),plus(aSWIR1,C_EVI))),mydivide(NIR,NDSI(C_NDVI,NIR))),mydivide(C_NDTI,mydivide(C_EVI,NIR)))

Se utilizó el Índice de Vegetación por Programación Genética 23 (GPVI, por sus siglas en inglés) el cual mostró mejor correlación con los datos de campo (Tabla XVI) y se realizó el procesamiento del mismo (Fig. 25), obteniendo un raster con valores entre 0 y 1, el cual fue utilizado para la estimación de la erosión.

Tabla XVI: Índice de vegetación por programación genética 23 utilizado para el cálculo del factor C, en la cuenca del arroyo San Carlos.

GPVI 23	r= 0.54	r ² = 0.30
Coeficientes :	m -1978	b: 26.31

Formula

$$\left(\left(NDTI - ((NDTI + RVI) + (aSWIR1 + EVI)) \right) - \left(\frac{(NIR)}{\left(\frac{NDVI - NIR}{NDVI + NIR} \right)} \right) \right) - \left(\frac{NDTI}{\left(\frac{EVI}{NIR} \right)} \right)$$

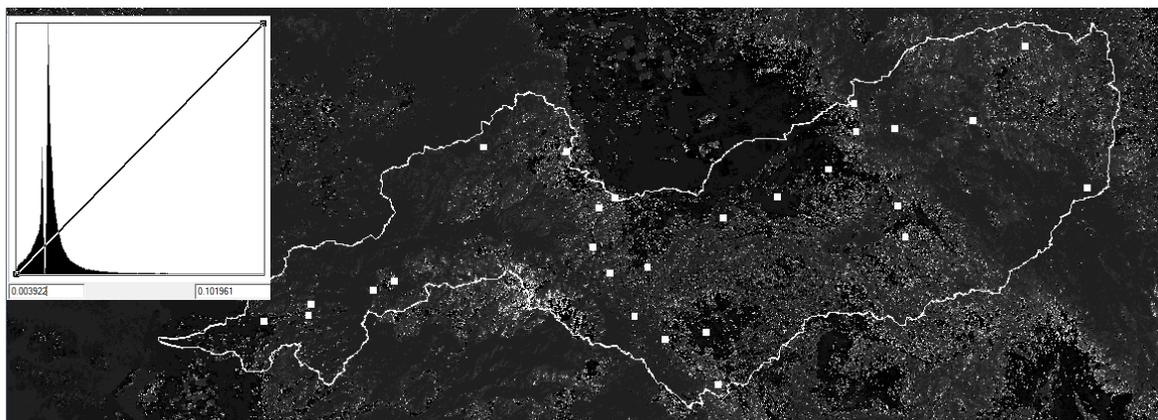


Figura 25: Imagen raster obtenido mediante programación genética para el factor C, utilizando el GPVI 23, los valores del histograma van de 0.0039 a 0.1019.

Se utilizó también el promedio de los datos obtenidos en campo y mediante fotointerpretación se ubicaron las áreas de suelos desnudos. (Fig. 26) con área aproximada de 16 km², lo que representa ~2% de la superficie de la cuenca (Tabla XVII), al resto se asignó el valor de 0.041 y como principal cubierta vegetal al Chaparral.

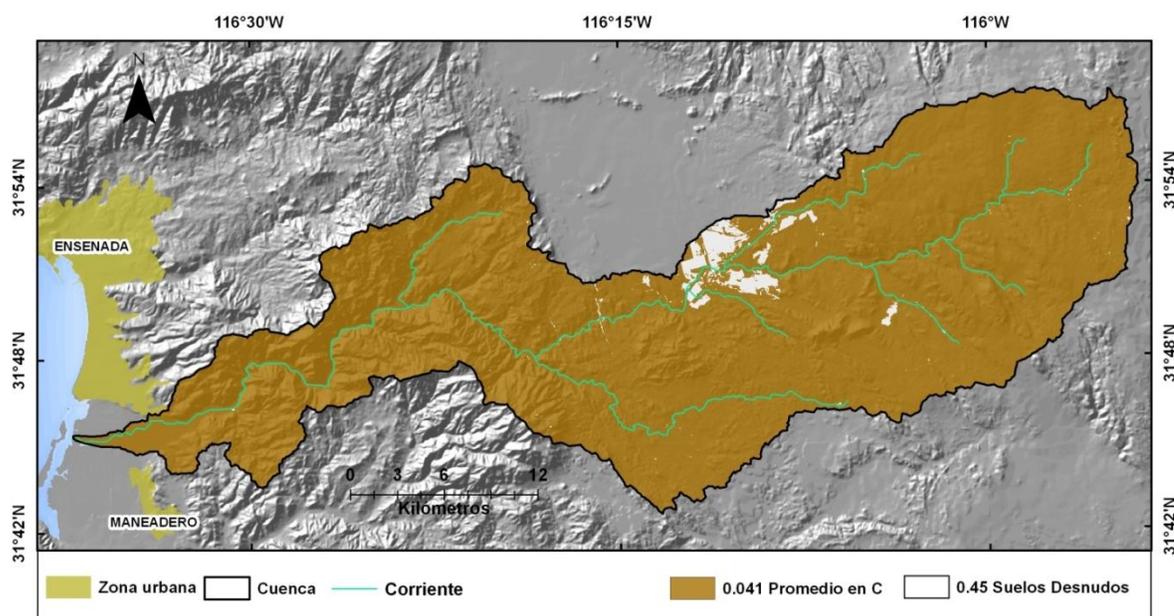


Figura 26: Mapa de cubierta vegetal y valor del Factor C asignado a los dos tipos de cobertura.

Tabla XVII. Superficie y porcentaje de usos de suelo en la Cuenca del arroyo San Carlos.

CUBIERTA VEGETAL	SUPERFICIE (km ²)	%
CHAPARRAL	806	98
SUELO DESNUDO	16	2

V.1.6. Estimación de la erosión media anual.

El producto de los factores de erosividad de la lluvia, de erodabilidad del suelo, topográfico y de cubierta vegetal permite obtener el mapa de pérdida de suelo por erosión hídrica. Con base en el análisis de los resultados arrojados por el GPVI-23 se realizó la estimación de la tasa de erosión de suelo media anual (Fig. 27), y la tasa de erosión utilizando el valor promedio de los datos del factor C obtenidos a partir de los datos de campo, y suelos desnudos (Fig. 28), como se indicó en los resultados del factor C.

La tasas de erosión del suelo estimada en la cuenca del Arroyo San Carlos, usando RUSLE y un índice de vegetación por programación genética tiene un valor máximo de 31,000 ton/km²*año, con un valor medio de 66 ton/km²*año (Tabla XVIII) En el caso de la erosión estimada utilizando el valor promedio de C obtenido en campo, se estimó una tasa de erosión anual máxima de 11,000 ton/km²*año, con un valor medio de 128 ton/km²*año.

Tabla XVIII: Datos estadístico de erosión media anual obtenidos por dos métodos en la cuenca del Arroyo San Carlos.

MÉTODOS UTILIZADO	MÁXIMO	MEDIA ton/km ² *año	DESV. ESTANDAR
GPVI	31,235	66	258.6
Promedio	11,358	128	266.6

En ambos casos, el 99% de la superficie se concentra en la primera clase (Tabla XIX) lo que demuestra que la distribución de los datos no es normal, ya que en ambos casos, el máximo de erosión estimado se concentra en un solo píxel.

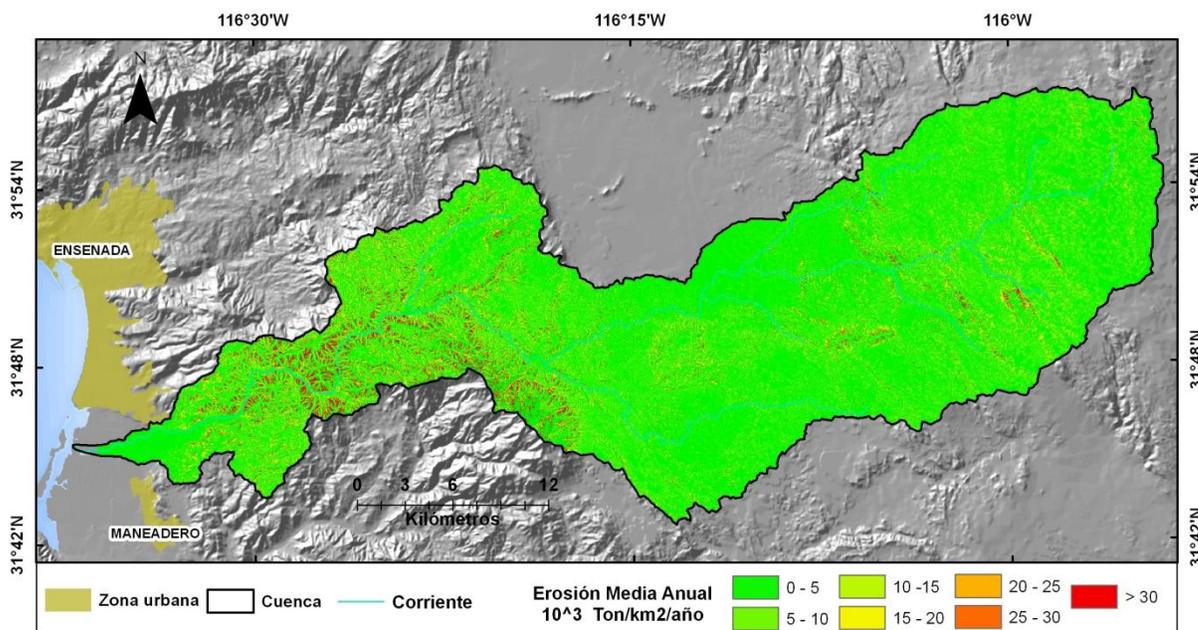


Figura 27: Mapa de la estimación de erosión utilizando un índice de vegetación obtenido por programación genética.

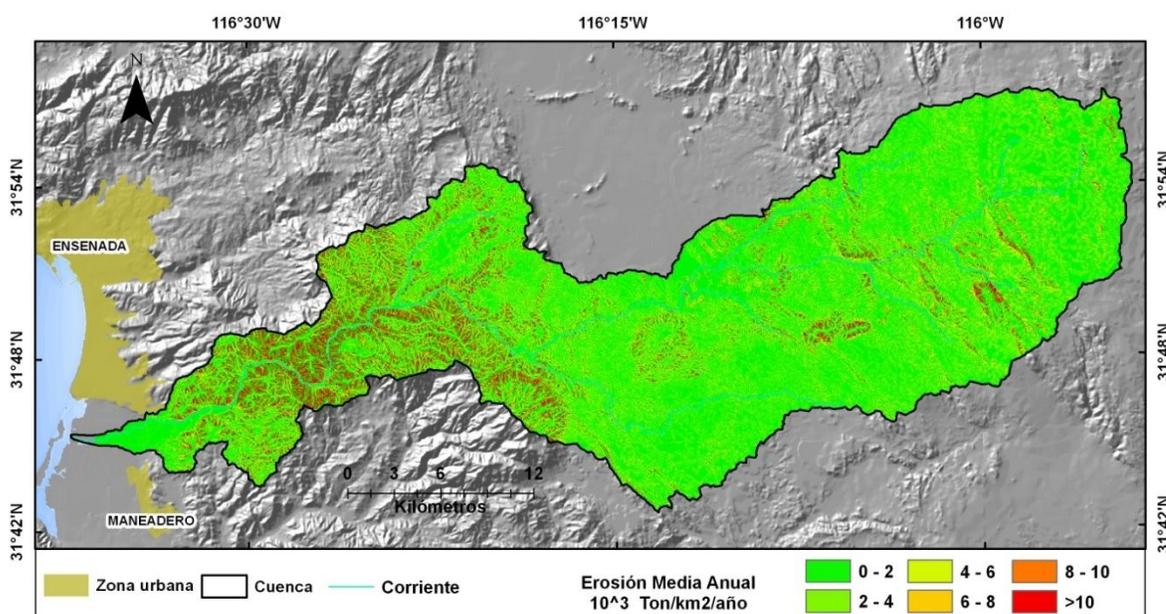


Figura 28: Mapa de la estimación de erosión utilizando el valor promedio de los datos de C obtenidos en campo.

Tabla XIX: Distribución de la superficie de erosión estimada en la Cuenca del Arroyo San Carlos con los dos métodos utilizados.

GPVI			PROMEDIO		
CLASE 10 ³ ton/km ² *año	SUPERFICIE km ²	%	CLASE 10 ³ ton/km ² *año	SUPERFICIE km ²	%
< 5	817	99	< 2	815	99
5 - 10	3		2 - 4	5	
10 - 15	1		4 - 6	1	
15 - 20	1		>6	1	
>20	0				

IV.2. Distribución espacial de erosión media anual.

El criterio de delimitación de las sub-cuencas fue que considerara las corrientes trazadas >25 km o 27,778 celdas. De esta manera, se obtuvieron 15 subcuencas (Fig. 29) con diferentes superficies. Como resultado de la segmentación, se tiene que la subcuenca 11, ubicada en la porción centro-sur de la cuenca, es la de mayor superficie con ~142 km² (Fig. 30) que representa el 17% del total de la cuenca, en caso contrario, la subcuenca 9 tan solo representa el 2% del la superficie total de la cuenca (Tabla XX), con una altitud media de 749 ± 23.7 m.

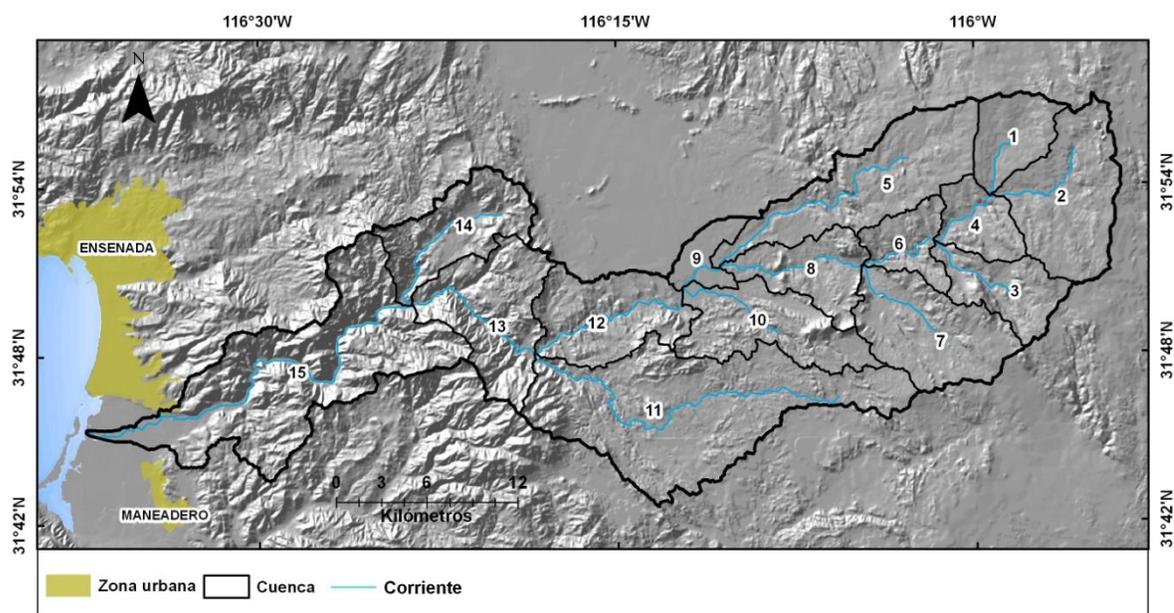


Figura 29: Segmentación de la cuenca del Arroyo San Carlos en 15 sub-cuencas.

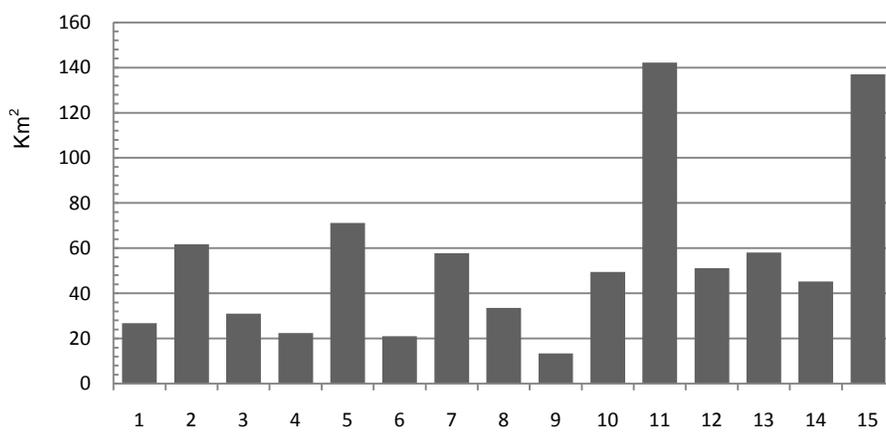


Figura 30: Superficie en km² de las subcuencas del Arroyo San Carlos.

Tabla XX: Estadísticas zonales de las subcuencas del Arroyo San Carlos.

SUBCUENCA	SUPERFICIE Km ²	%	ELEVACIÓN (m)			FACTOR R (MJ mm/km ² h año)		
			MÍNIMA	MAXIMA	MEDIA	MÍNIMA	MÁXIMA	MEDIA
1	27	3	1467	1777	1584	47463	57339	52078 ± 2350
2	62	8	1471	1860	1653	43601	55173	47665 ± 2576
3	31	4	1258	1740	1510	43161	45350	44117 ± 442
4	22	3	1253	1732	1458	44274	47944	45947 ± 799
5	71	9	739	1620	1222	38253	53395	43922 ± 3492
6	21	3	938	1442	1256	41658	45815	43427 ± 872
7	58	7	939	1660	1210	41015	43764	42339 ± 618
8	34	4	740	1309	929	38465	42048	40342 ± 839
9	13	2	713	838	749	37702	38921	38246 ± 264
10	49	6	710	1308	920	38001	41335	39489 ± 816
11	142	17	550	1392	890	38006	41641	39110 ± 756
12	51	6	550	1112	713	36376	38522	37693 ± 429
13	58	7	317	1399	728	36173	41660	38771 ± 1022
14	45	5	317	1100	696	35183	41984	38460 ± 1631
15	137	17	1	1298	452	29268	53487	42156 ± 5277
TOTAL/PROM	822	100	798	1439	1065	39240	45892	41911 ± 1476.4

Tabla XX (continuación): Estadísticas zonales de las subcuencas del Arroyo San Carlos.

SUBCUENCA	PENDIENTE (o)	FACTOR LS		FACTOR C	CON GPVI-23 (t km ² año)		CON PROMEDIO (t km ² año)	
	MÁXIMA	MÁXIMA	MEDIA	MEDIA	MÁXIMA	MEDIA	MÁXIMA	MEDIA
1	9	13	1 ± 1.2	0.041	7997	34 ± 106	2422	54 ± 91
2	11	30	1 ± 1.4	0.041	11828	34 ± 122	6732	60 ± 121
3	16	26	2 ± 3.2	0.041	2697	56 ± 105	1919	128 ± 228
4	17	23	2 ± 2.5	0.041	6459	57 ± 139	2222	114 ± 188
5	15	27	1 ± 1.5	0.059	18618	30 ± 126	3526	68 ± 139
6	14	32	2 ± 2.4	0.041	4339	54 ± 122	2178	108 ± 171
7	4	26	1 ± 2.3	0.046	16669	56 ± 206	4301	95 ± 168
8	19	27	1 ± 2.8	0.062	13474	48 ± 204	9581	103 ± 221
9	13	3	0	0.257	973	3 ± 14	1934	56 ± 135
10	13	26	1 ± 2.8	0.062	7014	46 ± 123	3936	98 ± 187
11	13	32	1 ± 2.6	0.041	22290	43 ± 220	9873	77 ± 166
12	13	22	1 ± 2.4	0.046	8217	47 ± 159	5859	91 ± 169
13	16	32	3 ± 5.2	0.041	27288	1309 ± 565	11359	208 ± 337
14	20	29	2 ± 3.9	0.041	15322	80 ± 254	5762	153 ± 256
15	15	43	4 ± 6.1	0.041	31353	131 ± 344	4300	278 ± 452
TOTAL/PROM	14	26		0.060	12969		5060	

De los datos obtenidos para el factor R, se obtuvo que en la subcuenca 1 es donde se presenta el mayor valor de erosividad de 57,000 MJ mm/km² h año, (Fig. 31) como características topográficas, esta subcuenca posee una altitud máxima y mínima de 1770 y 1460 metros distribuidos en una superficie de 27 km².

El valor máximo de erosividad está relacionado a la influencia de la estación Sierra Juárez, en la cual se presenta la precipitación máxima (370 mm) de las 10 estaciones meteorológicas utilizadas para obtener el factor R, la pendiente máxima que se presenta en esta subcuenca es de 9° (Fig. 32).

En la parte baja de la cuenca, integrada a la subcuenca 15, se manifiesta el valor mínimo del factor R que es de 29,260 MJ mm/km² h año, esto debido a la influencia de las estaciones El Ciprés y Maneadero, donde se registra una precipitación de 200 mm en ambos casos. La elevación en esta subcuenca va del nivel del mar a los 1290 metros, con una media de 452 metros en un área de 137 km², la pendiente máxima es de 15°. En esta subcuenca también se manifiesta el valor máximo obtenido del factor LS que corresponde a 43.

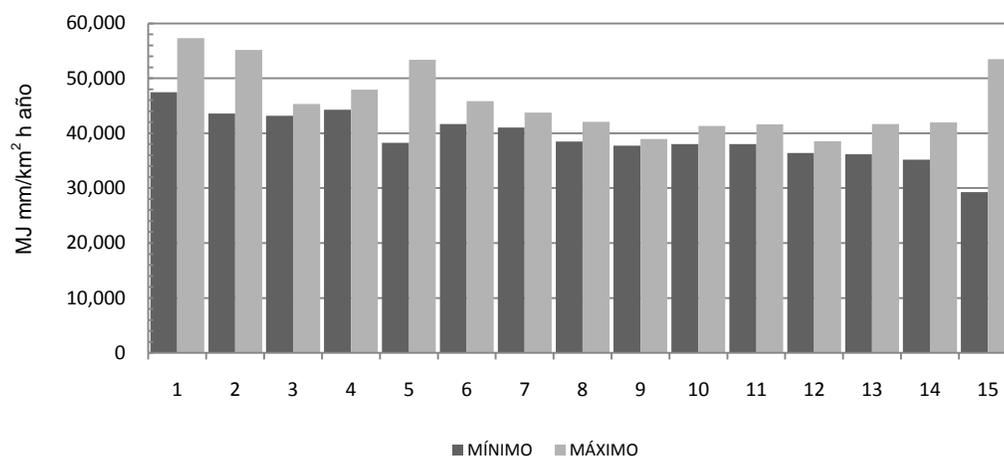


Figura 31: Gráfica de valores máximo y mínimos del Factor R obtenidos para cada subcuenca del Arroyo San Carlos.

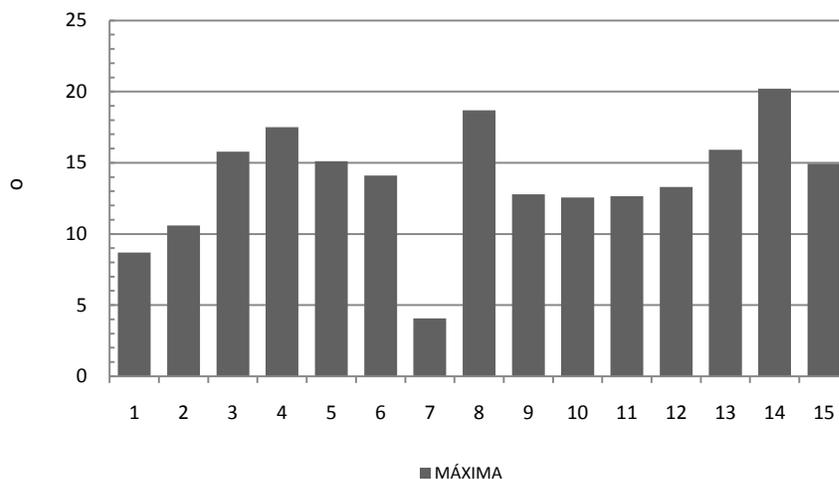


Figura 32: Pendiente máxima para cada subcuenca del Arroyo San Carlos.

Para la estimación de la erosión realizada con el GPVI-23, en la subcuenca 9 se presenta el menor aporte con $973 \text{ ton/km}^2\cdot\text{año}$ y de $1934 \text{ ton/km}^2\cdot\text{año}$ utilizando el promedio de los datos de campo (Fig. 33), esto debido principalmente a que se encuentra sobre el área agrícola denominada Valle de Ojos Negros, donde se presenta la mayor área de suelos desnudos, 7 km^2 de los 16 km^2 estimados, el valor máximo del factor LS obtenido para esta subcuenca es de 3, por lo que a pesar de tener un área $>50\%$ de su superficie de suelos desnudos, la longitud de pendiente y la pendiente no son tan altas, del mismo modo el valor medio de la erosividad de la precipitación es de $38,900 \pm 264.5 \text{ MJ mm/km}^2 \text{ h año}$, limitado al intervalo que representa el 43% de la cuenca.

Utilizando el promedio de los datos de C obtenidos en campo, es en las subcuencas 8, 11 y 13 donde se presentan los más altos valores de erosión, ($>9,000 \text{ ton/km}^2\cdot\text{año}$) las elevaciones medias para cada una de estas van de 929 ± 113.5 , 890 ± 132.2 y 728 ± 197.5 respectivamente, en los tres casos, la erosividad de la lluvia predominante se encuentra en el rango de 35,000 a 40,000 $\text{MJ mm/km}^2 \text{ h año}$, los valores del factor LS obtenidos para estas tres subcuencas

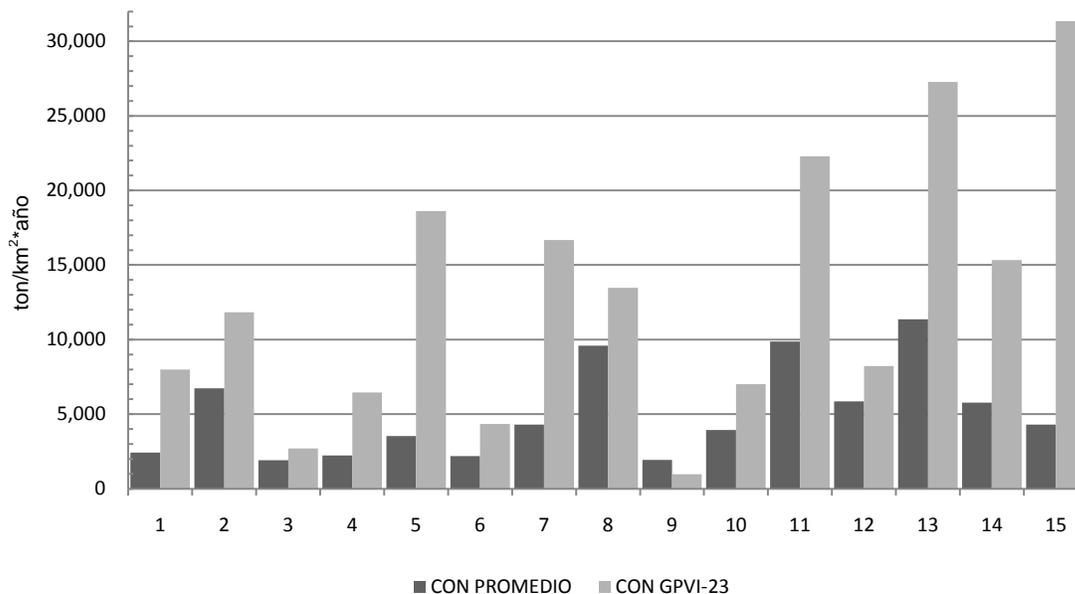


Figura 33: Erosión máxima obtenida por cada subcuenca utilizando promedio de datos de campo y un índice GPVI.

es de 27 en el primer caso y 32 para los dos restantes, considerados entre el 2% del área de cuenca de los valores altos. El registro máximo de erosión se tiene en la subcuenca 13, con 11,359 ton/km²*año, la cual presenta el 7% de la superficie total de la cuenca.

Las subcuencas 11, 13 y 15 representan el 41% de la superficie total de la cuenca del Arroyo San Carlos, en estas los valores de erosión media anual estimada utilizando un índice de cubierta vegetal obtenido por programación genética son >20,000 ton/km²*año. La variación de altitud para estas subcuencas de 550 a 1392, 317 a 1399 y del nivel del mar a 1298 respectivamente, dentro del área de la subcuenca 15 se ubica la estación meteorológica San Carlos, lo que refleja un alto valor de erosividad de la precipitación o factor R de 53,487 MJ mm/km² h año.

IV.3. Incendio Forestal en la cuenca del Arroyo San Carlos.

El Servicio Forestal de Estados Unidos (US Forest Service) cuenta con el Centro de Aplicaciones de Sensores Remotos (RSAC por sus siglas en inglés), que desarrolla e implementa para el Servicio Forestal formas menos costosas para obtener la información necesaria de los recursos forestales. Disponible en línea, en el apartado Respuesta de Emergencia a Áreas Quemadas (BAER, por sus sigla en inglés, <http://www.fs.fed.us/eng/rsac/baer/training.html>) se encuentra material de capacitación en el cual se describe el uso y tratamiento de imágenes de satélite post-incendio. Los ejercicios proporcionan instrucciones paso a paso sobre cómo integrar la Clasificación de la Reflectancia de Áreas Quemadas (BARC por sus siglas en inglés) e imágenes de satélite en un SIG para obtener un mapa de severidad de suelo quemado. Estos ejercicios están escritos principalmente para la versión 9.x. del software ArcMap.

Las imágenes diarias de zonas con incendios forestales están disponibles en la página web de MODIS Rapid Response System (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/firemaps/>) y la información en formato shp, para ser procesados en ARCGIS están disponibles en el sitio web del servicio forestal de Estados Unidos (http://activefiremaps.fs.fed.us/gisdata.php?sensor=modis&extent=north_america), en el apartado de Datos SIG de Detección de Incendios.

Las bandas termales del sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua se utilizan para generar productos sobre incendios con el de la NASA MCD14ML con la ubicación de estos, fácilmente asimilables en un ambiente SIG (<http://activefiremaps.fs.fed.us/gisdata.php>). Además de la información puntual de los incendios existen otros productos relacionados que están descritos en la lista de productos terrestres MODIS (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table).

Para la cuenca del arroyo San Carlos, se obtuvo la imagen del satélite MODIS Aqua de 250 metros de resolución espacial, y los hotpoint de los incendios ocurridos durante el año 2009, el archivo distribuido comprende gran parte de Norte América, por lo que se tuvo que cortar a la zona requerida (Fig. 34). De la imagen MODIS se observa la ocurrencia de tres incendios forestales a partir del 24 de agosto de 2009, en los alrededores de la ciudad de Ensenada. Para el incendio registrado en las cercanías de la cuenca del Arroyo San Carlos, se tiene que el incendio aparentemente inicio el 27 de agosto de 2009 y fue controlado días después, de acuerdo a los datos contenidos en el archivo de los puntos calientes, se registro hasta el 31 de agosto del mismo año.

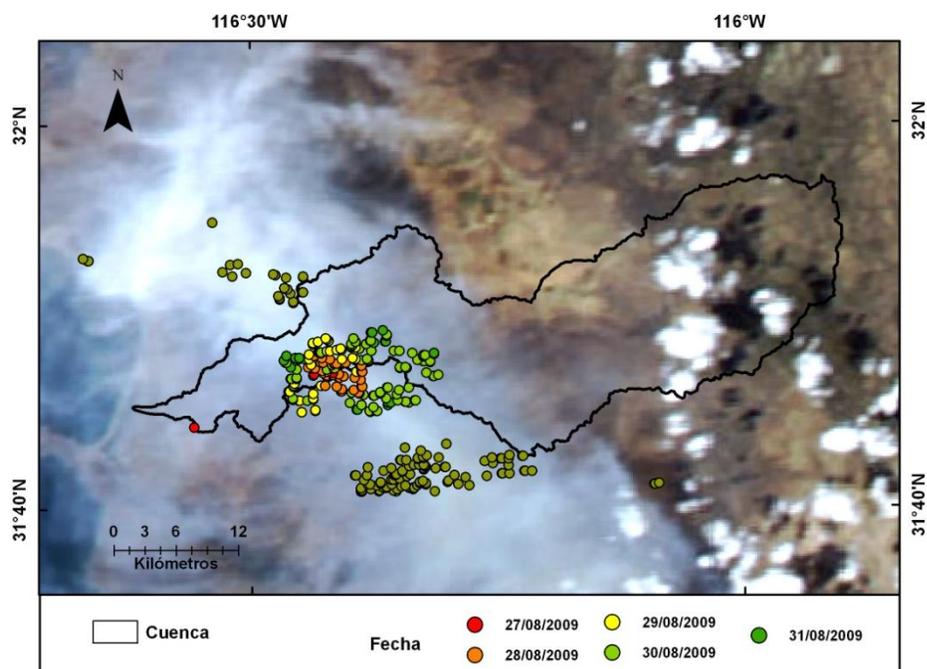


Figura 34: Imagen MODIS de fecha 28 de agosto de 2009, en la cual se observa la columna de humo provocada por los incendios forestales aledaño a Ensenada.

IV.3.1. Índice de severidad del incendio en la cuenca del Arroyo San Carlos.

Se contaba ya con el procesado de la imagen de satélite LANDSAT 5 TM, de fecha 21 de junio de 2010, casi un año posterior a la fecha de la ocurrencia del incendio, se retomó la metodología de procesado y se aplicó a la imagen de LANDSAT 5 TM de fecha 24 de junio y 9 de septiembre de 2009, las cuales fueron procesadas, adaptadas al área de interés, retomando solo la porción que corresponde al área donde ocurrió el incendio en la cuenca del Arroyo San Carlos, para considerarla como las imágenes pre-incendio y post-incendio respectivamente. Se eligió la imagen de septiembre debido a que fue la fecha más cercana a la ocurrencia del incendio y se comparó con la imagen de junio de 2010, diez meses posteriores a la ignición. Para los tres casos se trabajó únicamente con la reflectancia superficial de las imágenes y se elaboraron las combinaciones de banda 7,4,2 (Fig. 35).

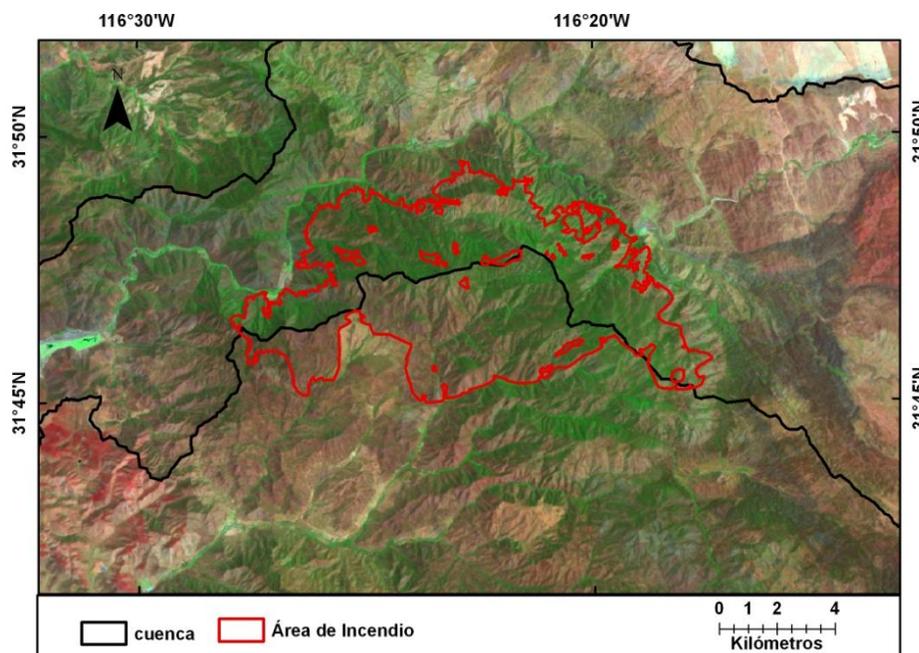


Figura 35: Imagen de satélite LANDSAT 5 de fecha 24 de junio de 2009 (pre-incendio). Se indica la huella del incendio de fecha 29 de agosto de 2009, la extensión abarca ambos lados de la ladera en el límite de la cuenca.

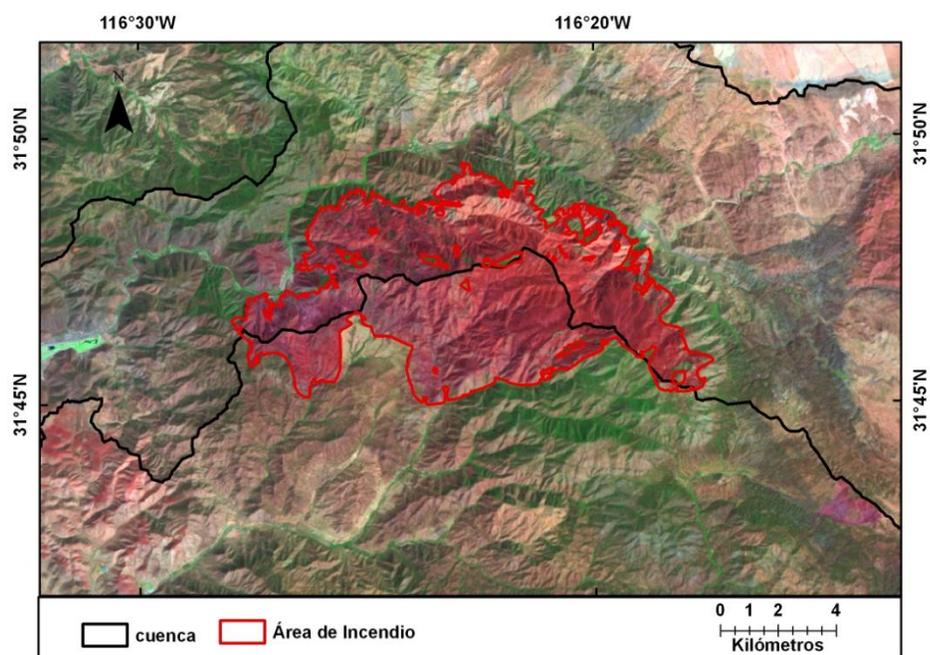


Figura 35b: Imagen de satélite LANDSAT 5 de fecha de fecha 09 de septiembre de 2009 (post-incendio, 10 días).

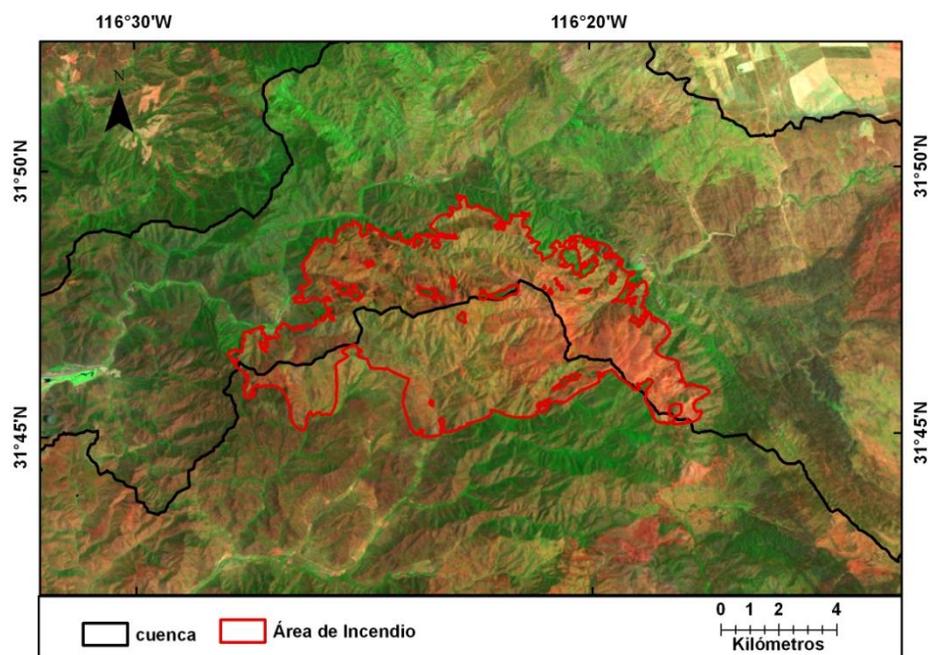


Figura 35 c: Imagen de satélite LANDSAT 5 de fecha 21 de junio de 2010 (post-incendio, 10 meses)

Se cálculo el NBR, dNBR para determinar la severidad del incendio ocurrido en la parte baja de la cuenca del Arroyo San Carlos. El cálculo de las diferencias normalizadas y el resto de las operaciones necesarias para obtener este índice, se realizaron con la extensión Spatial Analyst del software ARCGIS 9.3. También mediante esta herramienta se obtuvo el trazo del polígono que comprende la zona incendiada generando un archivo shp, al cual se le calcularon parámetros métricos tales como la superficie.

Para el cálculo del NBR de la zona del incendio para la imagen pre y post incendio, se utilizó la ecuación 11, que al ser una diferencia normalizada, los valores del índice estarían en el intervalo de -1 a 1. En la zona de estudio, se obtuvieron valores mínimo de de -0.18 y máximo de 0.65 en la imagen pre-incendio (Fig. 36), de -0.33 como mínimo, 0.67 como valor máximo en el segundo, cercanos a los valores teóricos (Tabla XXI).

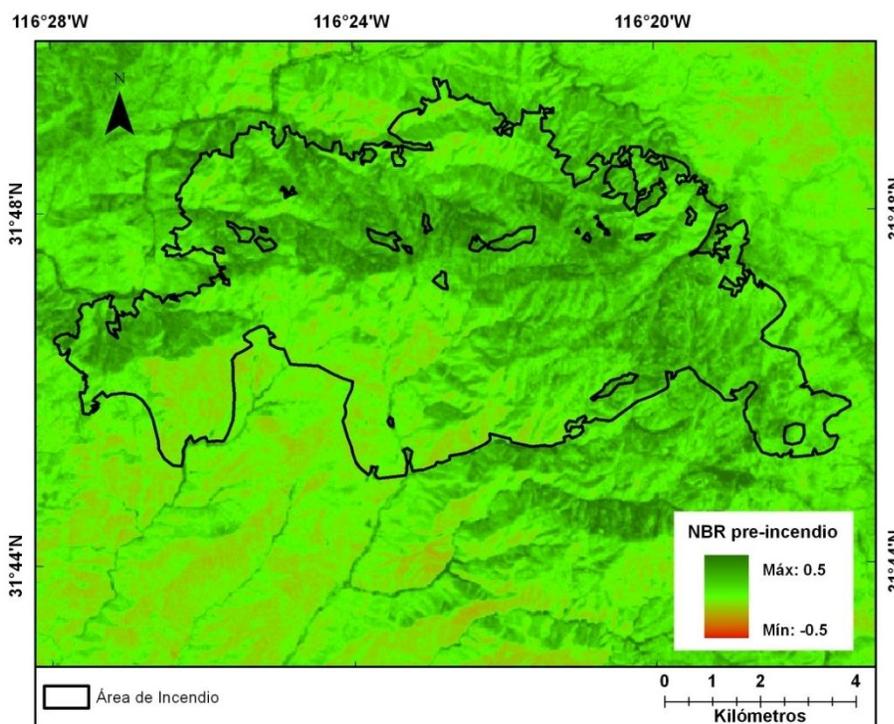


Figura 36: NBR obtenido de la imagen de fecha 24 de junio de 2009 (pre-incendio)

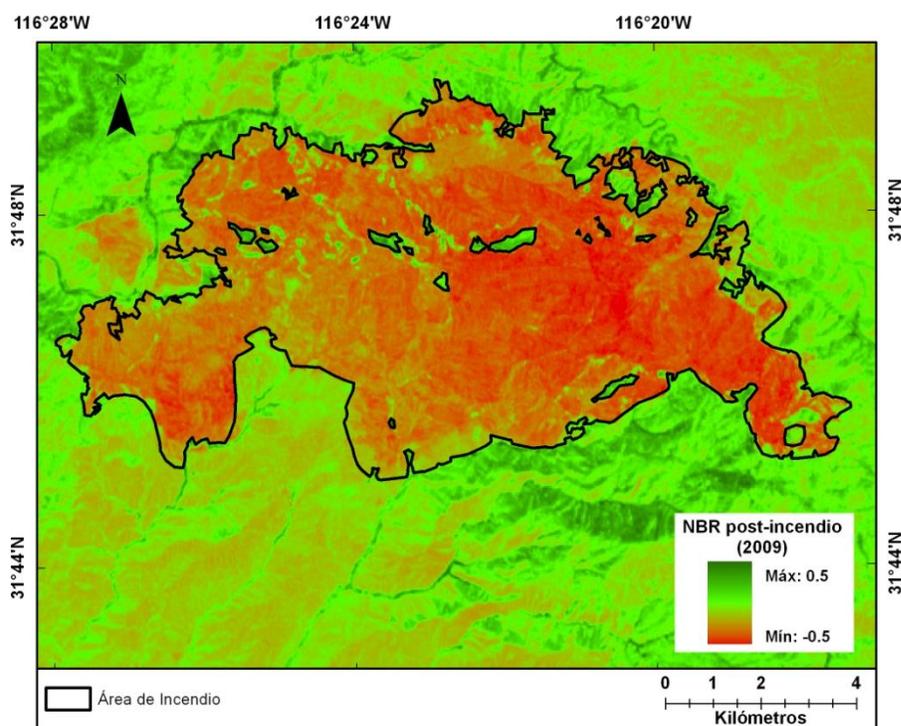


Figura 36b: NBR obtenido de la imagen de fecha 09 de septiembre de 2009 (post-incendio)

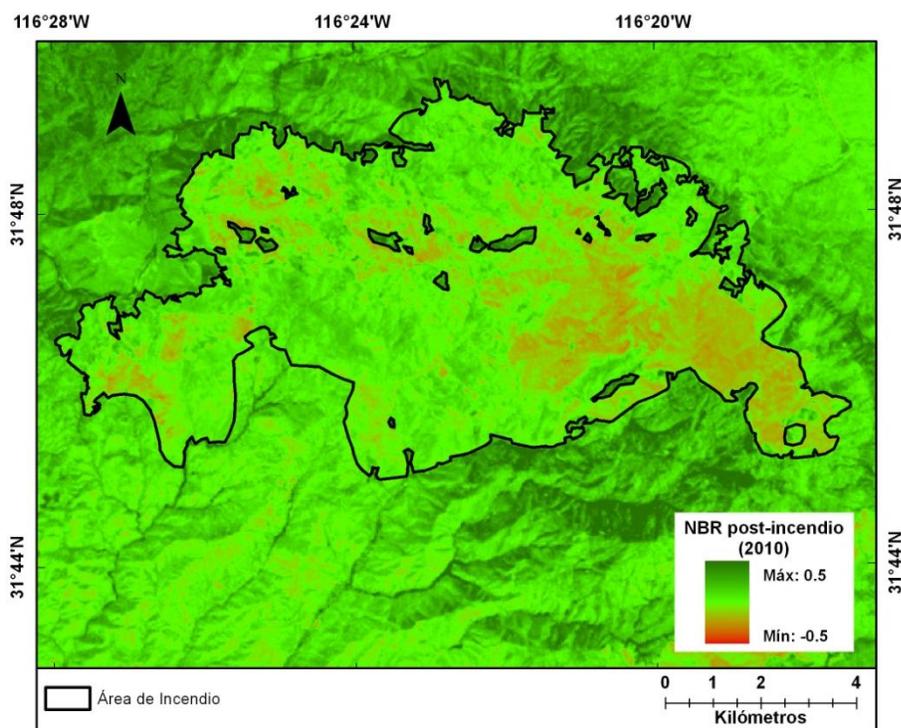


Figura 36c: NBR obtenido de la imagen de fecha 21 de junio de 2010 (post-incendio)

Tabla XXI: Datos estadístico de valores obtenidos para NBR pre y post incendio

VALOR	NBR PRE-INCENDIO	NBR POST-INCENDIO (2009)	NBR POST-INCENDIO (2010)
Máxima	0.59	-0.72	0.49
Mínima	-0.18	-0.95	-0.33
Media	0.14	-0.92	0.01
Desviación Estándar	0.14	0.02	0.10

Utilizando la ecuación 12, se realizó el cálculo del dNBR para el conjunto de imágenes, para el caso de la imagen de 2010, se obtuvo un valor mínimo de -0.30 y máximo de 0.71 (Fig. 37). Utilizando la imagen de fecha 9 de septiembre de 2009, se los valores obtenidos oscilan entre 0.74 y 1.53 (Tabla XXII).

Tabla XXII: Valores de dNBR obtenidos para la zona de incendio en la cuenca del arroyo San Carlos.

VALOR	dNBR POST-INCENDIO (2009)	dNBR POST-INCENDIO (2010)
Máxima	1.53	0.71
Mínima	0.74	-0.30
Media	1.07	0.15
Desviación Estándar	0.15	0.19

Si el intervalo de valores de un índice normalizado de incendios (NBR) se agrupa entre -1 y 1, entonces la diferencia de dos NBR, es decir el índice de severidad de incendios o dNBR debería adoptar valores de -2 y 2. Se hacen evidentes las diferencias entre valores máximos y mínimos para los dos casos, el primero se presenta utilizando datos de la imagen de 2009, debido quizá a la que la imagen fue capturada por el sensor LANDSAT a tan solo 10 días posteriores al incendio, por lo que los restos de vegetación incinerada aun eran recientes. En el caso de la

imagen de junio de 2010, había pasado casi un año de la fecha en que se presentó el incendio.

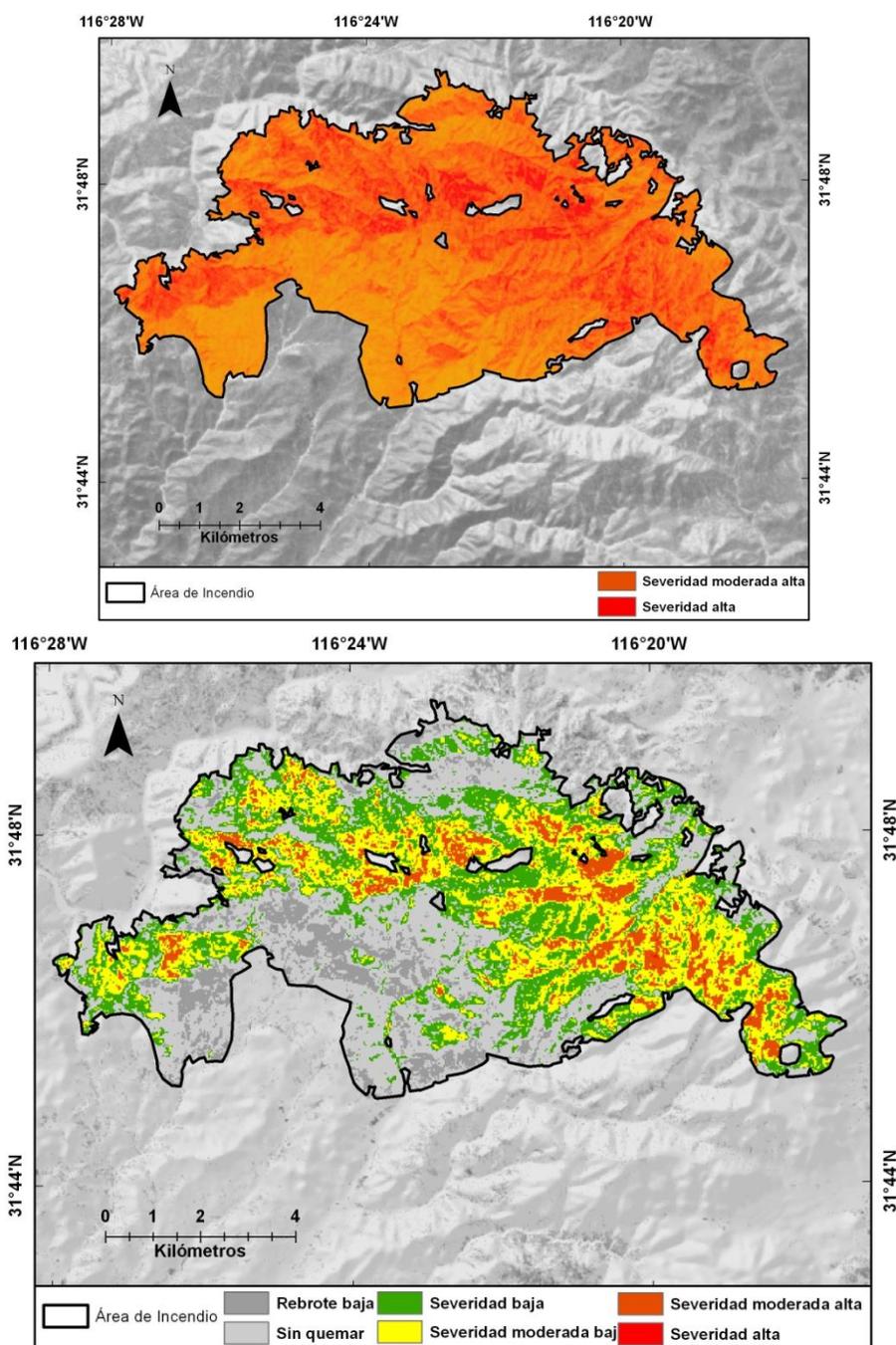


Figura 37. Valores dNBR obtenidos utilizando los NBR de las imágenes post-incendio de 2009 y 2010, respectivamente.

Agrupando en clases los valores de dNBR, se obtuvieron los valores del índice de severidad del incendio (Fig. 38). Para la imagen de septiembre de 2009, se obtuvo que el 100% de la superficie incendiada corresponde a severidad alta debido a que los valores obtenidos en escala de 10^3 van de 741 a 1529. Para el caso de los datos de junio de 2010, se tiene que el 25% de la superficie del polígono delimitado como área del incendio, que de acuerdo con los valores reportados en la metodología del índice de severidad de incendio, se presenta como un área sin quemar (Tabla XXIII), y tan solo el 6% se cataloga como Severidad media alta. El número de píxeles para severidad alta en esta imagen no es representativa en superficie toda vez que no sobrepasa el 0.1%.

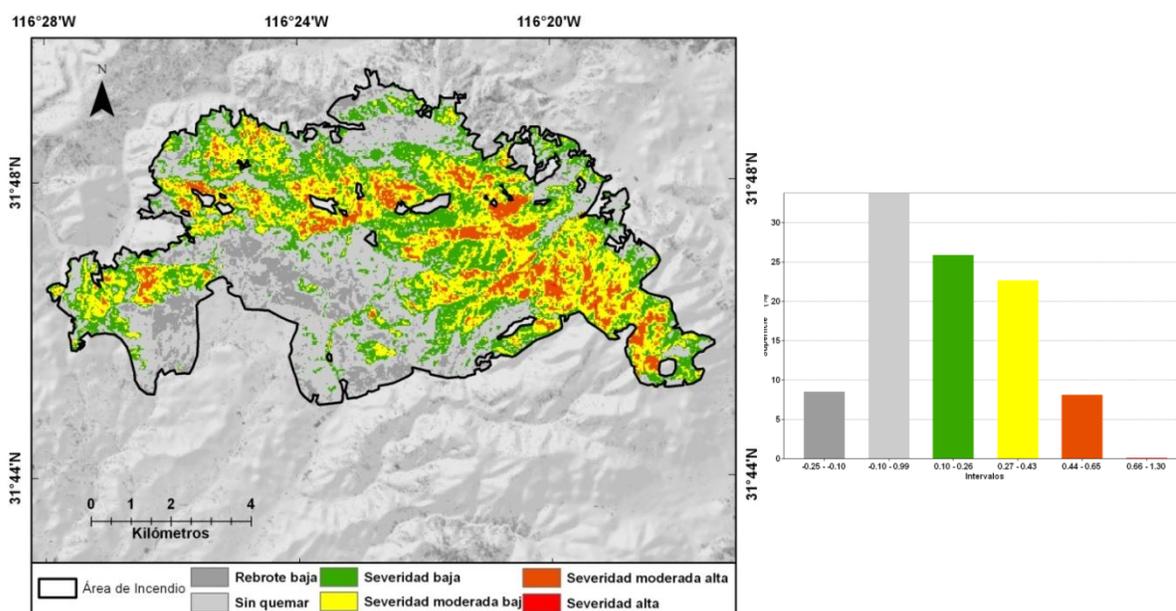


Figura 38: Índices de severidad del incendio ocurrido en la cuenca del Arroyo San Carlos, con imágenes de satélite de 2010.

Tabla XXIII. Intervalos de severidad del área incendiada en la cuenca del Arroyo San Carlos de la imagen de 2010.

INTERVALO	SEVERIDAD	SUPERFICIE. km²	%
-0.25 a -0.10	Mejora de rebrote baja	6	9
-0.10 a +0.99	Sin Quemar	25	34
0.10 a 0.26	Severidad Baja	20	26
0.27 a 0.43	Severidad Moderada Baja	17	23
0.44 a 0.65	Severidad Moderada Alta	6	8
0.66 a 1.30	Severidad Alta	0	0
TOTAL		74	100

La superficie del incendio forestal ocurrido en agosto de 2009 en la parte baja y cercanías de la cuenca del arroyo San Carlos, es de 74 km². En el área de la cuenca, la zona del incendio abarca 47 km², lo que representa 6% de la superficie de la cuenca. Esta superficie se distribuye sobre la ladera S de la subcuencas 15, 13 y 11 de mayor a menor superficie respectivamente.

Como se observo en la distribución espacial de la erosión media anual en la cuenca del Arroyo San Carlos, de acuerdo al método utilizado para el factor C existe una variación de los resultados, para en el caso de GPVI, en las subcuencas donde se presenta la zona de incendio se registran valores >20,000 ton/km²/año, al usar el promedio de los valores de C obtenidos en campo, la erosión máxima se presenta en la subcuenca 13 y es >10,000 ton/km²/año. El sitio de muestreo 21 se realizó en la zona del incendio, aunque no tan al interior de esta, debido a que no se permito el acceso. La altura de la vegetación obtenida para este sitio fue de 0.19 metros, con un valor de rugosidad de 0.6, y como valor total del factor C para este sitio de 0.028, inferior al dato promedio utilizado para la estimación de la erosión.

IV.3.2. Comparativo de erosión estimada en 2007 y 2010.

Mediante Índices de cobertura por Programación Genética Punte en 2007, estimó la erosión media anual en la cuenca de Todos Santos, de la cual forma parte la cuenca del Arroyo San Carlos, aunque por la cantidad de datos utilizados y el número de iteraciones con las que se buscó el mejor índice, la ecuación del índice utilizado para en su índice de GPVI, no es similar a la elaborada en este investigación. Los resultados de erosión obtenidos por Punte (2007), arrojaron un máximo de 28,000 ton/km²/año para la subcuenca 15 (Fig. 39) y se calculó la diferencia entre las dos estimaciones de erosión realizadas (Tabla XXIV).

Tabla XXIV: Comparación de la erosión estimada, utilizando índices de cobertura C obtenidos por programación genética por Punte (2007) y el índice GPVI-23 de este trabajo sobre imagen 2010.

SUBCUENCA	SUPERFICIE km ²	EROSIÓN 2010 CON GPVI-23 ton/km ² /año		EROSIÓN EN 2007 ton/km ² /año		DIFERENCIA
		MÁXIMA	MEDIA	MÁXIMA	MEDIA	
1	27	7997	34 ± 106	2895	50 ± 150	5101
2	62	11828	34 ± 122	7723	50 ± 164	4105
3	31	2697	56 ± 105	3240	36 ± 141	-544
4	22	6459	57 ± 139	5929	57 ± 188	530
5	71	18618	30 ± 126	12628	242 ± 553	5990
6	21	4339	54 ± 122	14096	146 ± 602	-9757
7	58	16669	56 ± 206	7332	271 ± 506	9337
8	34	13474	48 ± 204	19711	751 ± 1295	-6236
9	13	973	3 ± 14	4571	345 ± 412	-3599
10	49	7014	46 ± 123	11701	734 ± 966	-4688
11	142	22290	43 ± 220	13383	546 ± 855	8907
12	51	8217	47 ± 159	14831	1139 ± 1234	-6614
13	58	27288	1309 ± 565	18719	944 ± 1531	8570
14	45	15322	80 ± 254	14262	1103 ± 1490	1060
15	137	31353	131 ± 344	28143	566 ± 1075	3210

El valor de diferencia de erosión máximos obtenidos es de 3,210 ton/km²/ año. Localizado en la subcuenca 15 para ambos casos, se observa que el resto de las

subcuencas la erosión incremento, aunque en algunas como las subcuencas 3, 6, 8, 9, 10 y 12, el estimado de erosión con el GPVI-23 son menores comparado con la erosión estimada en 2007. En el resto de la subcuencas, de manera general se observa que la distribución en el incremento de la erosión tiene un patrón similar.

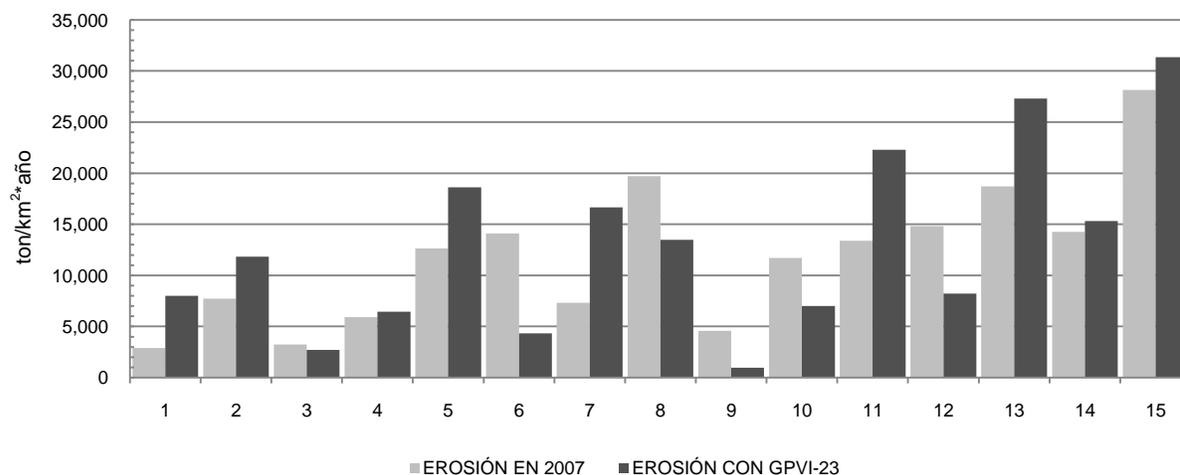


Figura 39. Máximos de erosión por subcuenca utilizando índices de cobertura C obtenidos por programación genética por Puente (2007) sobre imagen de 2007 e índice GPVI-23 de este trabajo sobre imagen 2010.

IV.4. Modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

Para la alimentación de los datos del modelo, se retomaron e incorporó mediante la interfaz ArcSWAT información generada en RUSLE, como MDE, cuenca, subcuencas y corrientes. El reporte topográfico generado presenta la superficie en Ha, datos estadísticos (máximo, mínimo, media y desviación estándar) de las elevaciones de cada una de las subcuencas, mismo que ya habían sido calculados y descritos anteriormente.

Para el análisis de las unidades de respuesta hidrológica (HRU), se retomaron los dos tipos de cubierta vegetal, el tipo de suelos, definiendo el Litosol como suelo homogéneo para toda la cuenca, y los datos del cálculo del factor K en la

estimación de la erosión. Se requirieron parámetros tales como numero de capas, grupo hidrológico, profundidad, capacidad de agua disponible, contenido de carbón, porcentaje de arena, limo y arcilla, conductividad eléctrica, valor K, entre otros, algunos de estos se retomaron de INEGI (2004) y se incorporaron a la base de datos de SWAT (Fig. 40).

Soil Component Parameters		
SNAM	NLAYERS	HYDGRP
LITOSOL	1	B
SDL_ZMX (mm)	ANION_EXCL (fraction)	SDL_CRK (m3/m3)
45	0.1	0
TEXTURE		
SAND		

Soil Layer Parameters		
Soil Layer: 1		
SDL_Z (mm)	SDL_BD (g/ cm3)	SDL_AWC (mm/mm)
10	1	0.2
SDL_CBN (% wt.)	SDL_K (mm/hr)	CLAY (% wt.)
5.9	0	0.5
SILT (% wt.)	SAND (% wt.)	ROCK (% wt.)
0.5	99	20
SDL_ALB (fraction)	USLE_K	SDL_EC (dS/m)
0.01	0.044	1.6

Figura 40: Parámetros definidos para el LITOSOL en la base de datos de SWAT.

El apartado de pendiente SWAT se define en porcentaje y realiza el estimado de la superficie cubierta por cada clase definida, en este caso, se definieron intervalos donde el máximo definido fue de 10% (6°) y se realizó la representación gráfica (Fig. 41) de la cual se observa que la subcuenca 9, presenta pendiente de 0-2% en más del 50% de la superficie, a la vez que la superficie que ocupa el suelo desnudo es >50% del total de la subcuenca, cabe recordar que esta subcuenca corresponde a la zona agrícola del Valle de Ojos Negros. Por otro lado para la subcuenca 1 se presentan pendientes mayores a 6° en >40% de la superficie de la subcuenca, seguida de la subcuenca 5 y 7 en menor superficie ocupada por este rango de pendientes. Resalta la subcuenca 15, que es donde se presenta el

máximo de erosión, las pendientes mayores a 6° solo comprenden 4% de la superficie de la subcuenca, y dominan las pendientes < 3°. Se obtuvo también la superficie y el porcentaje de esta dominada por los dos usos de suelo definidos, aunque los suelos desnudos a nivel cuenca solo representan 2% de la superficie, a nivel subcuenca destacan la 9 que es donde se presenta el mayor espacio de suelos desnudos, seguidas de las subcuencas 5, 8 y 10, y en menor extensión las subcuencas 7 y 13.

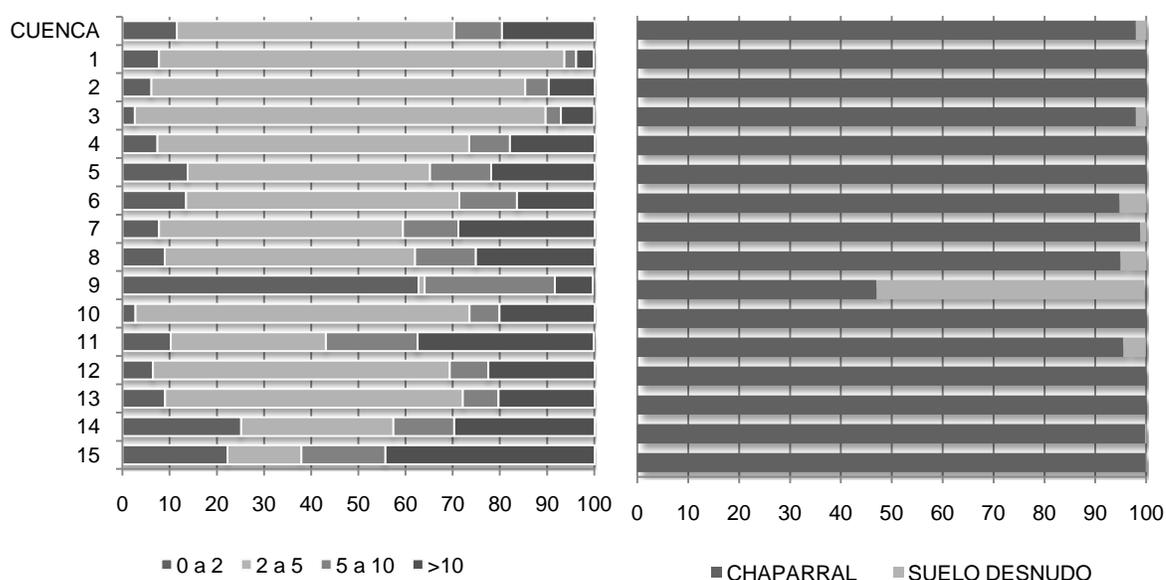


Figura 41: Porcentaje del área ocupada por los diferentes intervalos de pendiente y uso de suelo por cada subcuenca del arroyo San Carlos.

El modelo SWAT realiza la simulación del ciclo hidrológico de manera diaria, mensual o anual para cada una de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). En el presente estudio se realizaron comparaciones mensuales de la información, ya que se facilita el análisis de los datos de salida, debido a la cantidad de datos manejados.

La calibración de un modelo como SWAT consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los escurrimientos observados y los calculados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia, aun de aquellos considerados conocidos. La validación del modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos calculados y los observados con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un período diferente. El ajuste entre escurrimientos observados y calculados obtenido durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo (Palacios, 1986).

IV.4.1. Escurrimiento superficial.

Se definió como fuente puntual de descarga la estación San Carlos, de la cual se cuenta con datos de precipitación (mm) por más de 40 años, así como datos de caudal (m^3/s) hasta 1990 y registros de sedimentos en suspensión registrados en la estación de aforo durante algunos meses de 1972 a 1982. Con estos datos se realizaron las simulaciones correspondientes utilizando estos años como periodo de simulación.

Se realizó la representación gráfica de los valores observados y simulados de precipitación para la estación San Carlos (Fig. 42), se obtuvo un valor de correlación para esta simulación de $r^2=0.88$ por lo que los datos de precipitación obtenidos de la simulación de SWAT son aceptables (Fig. 43).

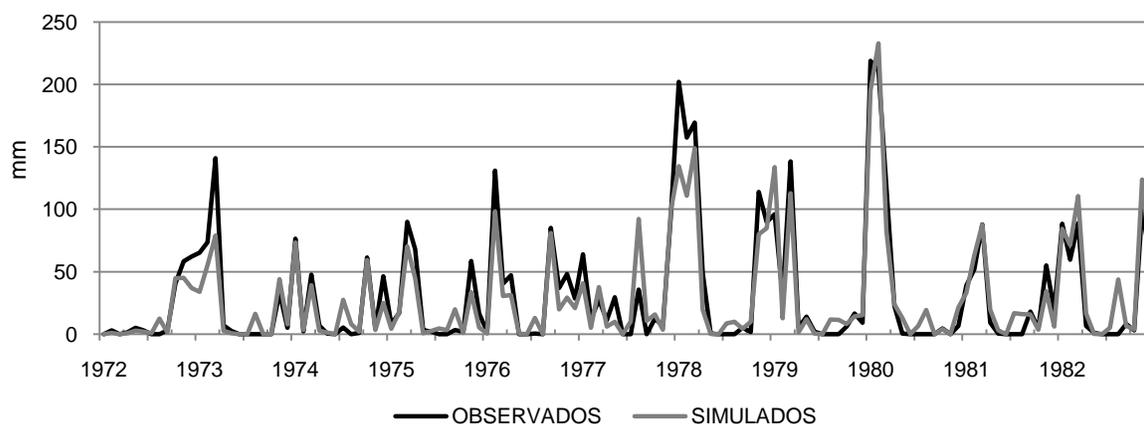


Figura 42: Representación gráfica de los datos de precipitación observados y simulados por SWAT para la estación San Carlos.

De los datos generales que arroja la simulación de SWAT, solo se registra una producción de sedimentos de 0.01 Ton durante el periodo de 1973-1976, para el resto de los años no se proyectaron datos. (Tabla XXV).

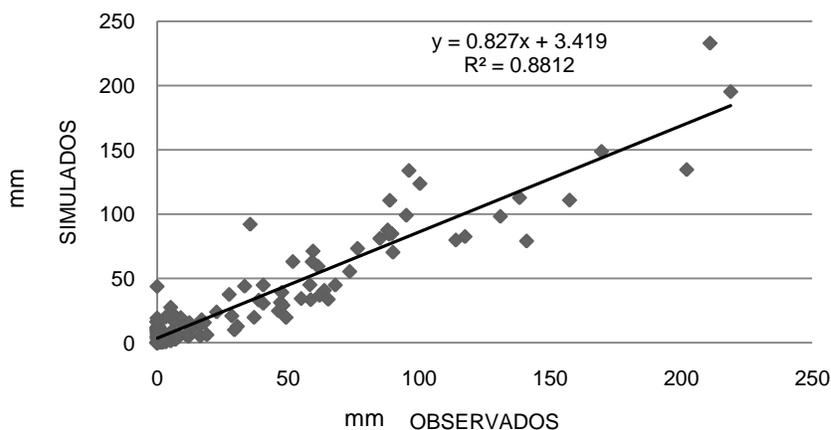


Figura 43: Correlación entre los datos de precipitación observados y simulados para la estación San Carlos.

Se retomó el archivo *output.sed* generado también por SWAT, estos datos están integrados para cada una de las subcuencas, por diferentes días julianos para

cada uno de los años simulados. Una de las columnas contenidas en este archivo SED_OUTtons hace referencia a los sedimentos de cada una de las subcuencas, por lo tanto se integraron los datos de forma anual para cada una de las subcuencas y se obtuvo el total anual para cada una de estas (ANEXO III).

Tabla XXV: Datos del balance hídrico simulados por SWAT.

CONCEPTO	UNIDADES	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
PRECIPITACIÓN		147.3	239.5	244.2	207.1	324.6	330.2	611.2	333.2	598.4	298.2	528.4
FLUJO SUPERFICIAL		1.1	2.2	2.1	1.8	2.9	49.3	7.6	12.6	5.8	3.1	9.2
FLUJO LATERAL		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA		0.2	0.6	0.4	0.6	0.5	0.4	1.6	0.7	0.8	0.5	0.6
PERCOLACIÓN	mm	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.8
EVAPO-TRANSPIRACIÓN POTENCIAL		73.1	14.1	14.1	11.9	13.9	19.1	16.5	15.6	13.2	16.8	14.2
PRODUCCIÓN DE AGUA		NaN	2.7	2.4	2.3	3.3	48.8	8.9	12.9	6.5	3.5	9.5
PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	Ton	0	0.01	0.01	0.01	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Los datos de flujo superficial simulados por SWAT está en unidades de mm, por lo que para compararlos con los observados, se realizó la conversión de unidades a Mm^3 de la siguiente manera:

$$\text{flujo superficial (mm)} \times \left(\frac{1m}{1000mm} \right) \times (\text{superficie } m^2) = \text{flujo superficial en } Mm^3$$

$$49.3mm \times \left(\frac{1m}{1000mm} \right) \times (822,000,000 m^2) = 40,524,600 Mm^3$$

Como se observa en los datos de la tabla XXIX los datos de precipitación y flujo superficial no coinciden en los años que se presentan mayor precipitación (1978 y 1980), estos son estimados para el mes de diciembre de 1977 con un registro $>5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y para diciembre de 1979 $>7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Fig. 44).

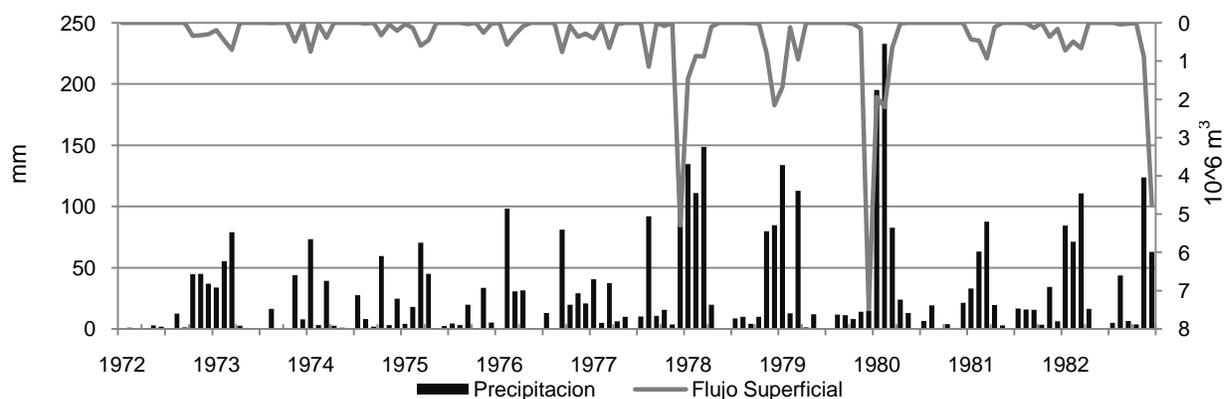


Figura 44. Precipitación y Flujo Superficial simulados por SWAT para el periodo de 1972 a 1982.

En la comparación entre los valores de flujos superficiales observados y simulados, se analizó que la cantidad reportada por SWAT es inferior a los datos observados ya que se observan máximos $>25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, mientras que los simulados son los $<8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. (Fig. 45).

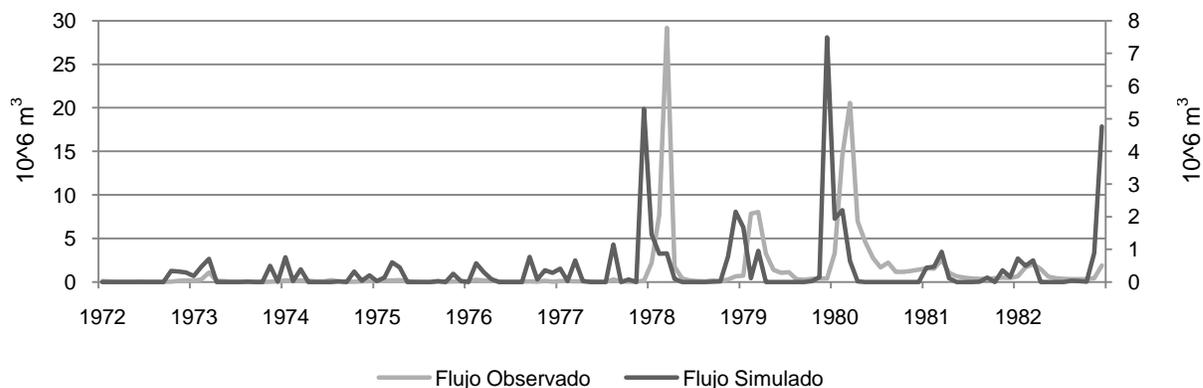


Figura 45. Flujos superficial observado y simulados por SWAT para el periodo 1972-1982.

IV.5.2. Sedimentos.

De acuerdo con los datos simulados, se observa que únicamente las subcuencas 9, 12, 13 y 15 son las que presentan una salida de sedimentos en diferentes cantidades (Tabla XXVI), los valores en el resto de las subcuencas son <0, por lo que no se consideraron para el análisis. Se retomó la tabla de datos y se integró al SIG, uniendo la tabla con el archivo *.shp de las subcuencas, con los cuales se realizó la representación cartográfica de los datos (Fig. 46).

Tabla XXVI: Datos de sedimentos anuales por subcuenca para el periodo 1972-1977.

SUBCUENCA	1972	1973	1974	1975	1976	1977	PROMEDIO
1	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-
9	315.63	777.96	730.50	597.79	952.99	1008.70	730.6
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	33.70	66.61	78.24	57.67	104.65	152.34	82.2
13	32.80	64.13	77.11	55.91	103.23	151.11	80.7
14	-	-	-	-	-	-	-
15	30324.52	422890.16	124867.16	164396.42	1163480.50	509753.86	402618.8

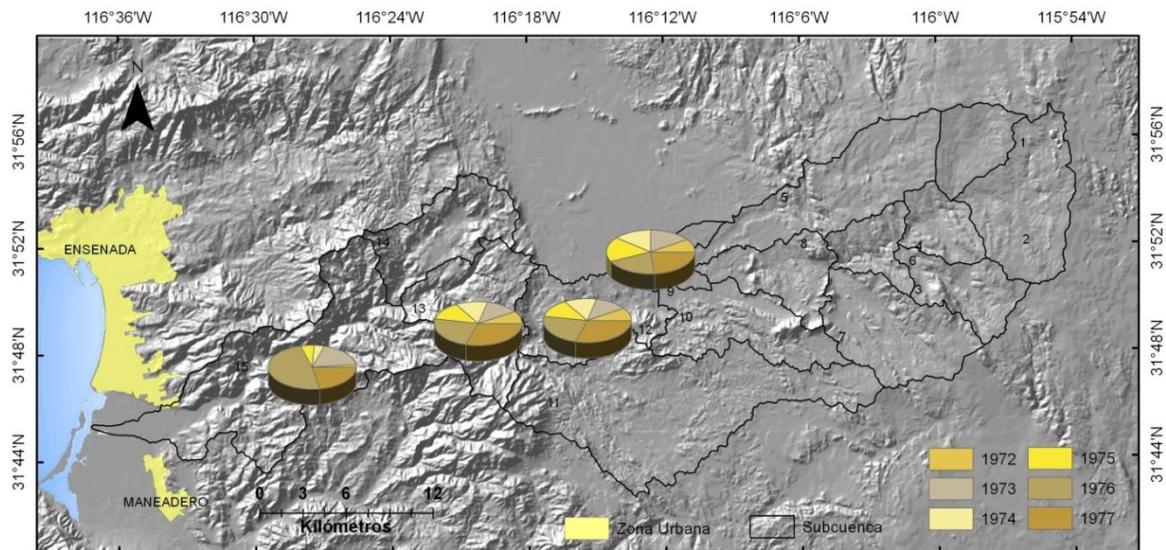


Figura 46: Porcentaje total de sedimentos anuales (Ton) para las subcuencas 9, 12, 13 y 15 para el periodo de 1972-1977.

Retomando las características de cada subcuenca con resultados de SWAT, en la 9 se presenta el mayor valor del factor C y un solo intervalo de pendiente, en el resto hay mayor variación en los intervalos, sobresale la subcuenca 15 con una estimación máxima de $1.15 \cdot 10^6$ ton para 1976 (Fig. 47), siendo este el año con mayor cantidad de sedimentos registrados, durante este periodo, el promedio fue de $4 \cdot 10^5$ ton.

Se presentó una similitud entre los valores de sedimentos estimados para las subcuencas 12 y 13 durante todo el periodo simulado, con un máximo registrado >150 Ton para el año 1977 en ambos casos, el año de registro máximo coincide con el máximo registrado en la subcuenca 9. En general la distribución de las toneladas de sedimentos simuladas son conformes entre máximos y mínimos para las subcuenca 9, 12 y 13.

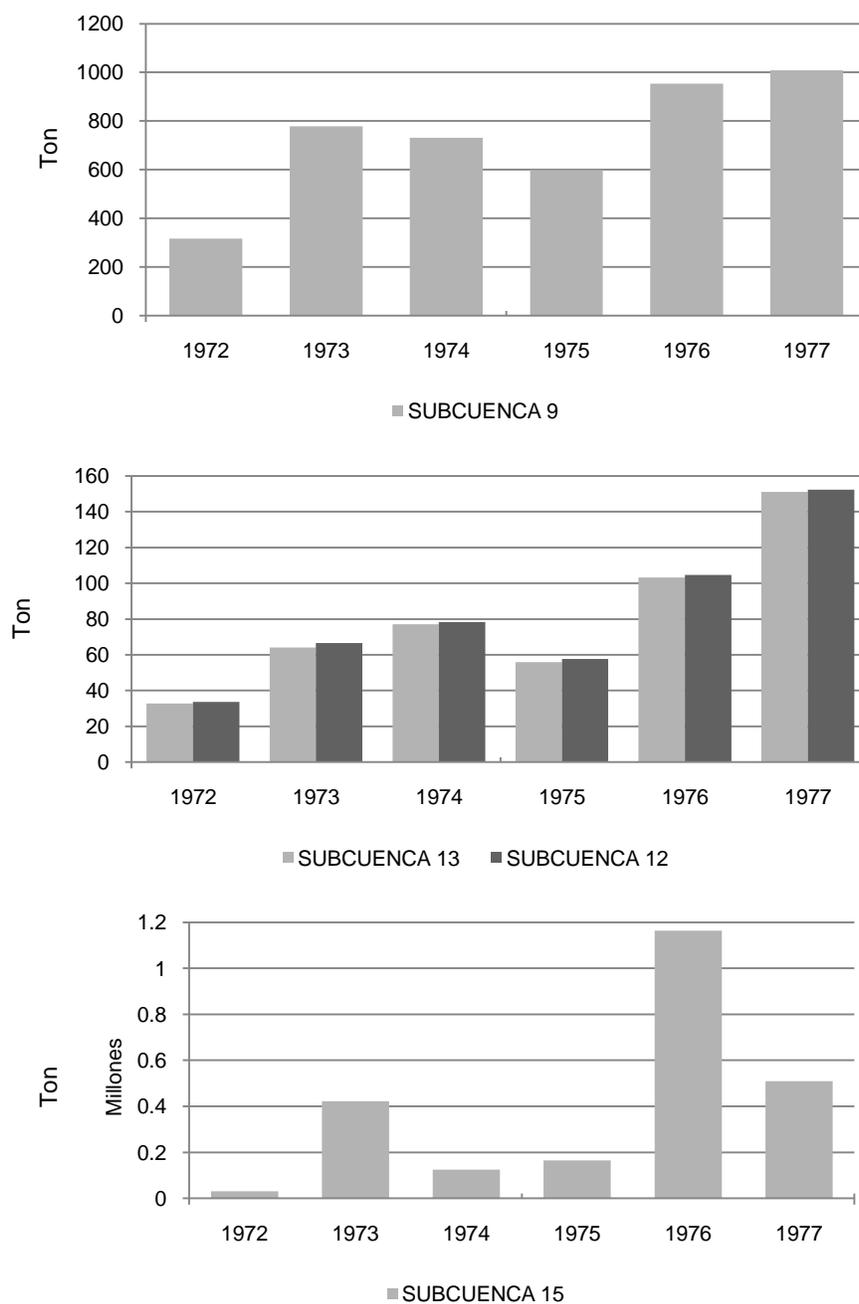


Figura 47: Sedimentos estimados por SWAT para las subcuencas, 9, 12, 13 y 15.

Se retomaron los datos simulados para la subcuenca 15, y se realizó la comparación con los datos observados, con estos últimos en 1980 se registra el máximo de sedimentos observados con $474 \cdot 10^3$ ton/año y en 1974 un mínimo de

88 ton/año (Tabla XXVII). Para el caso de los datos resultante de SWAT solo se tienen hasta 1977, el registro máximo para 1976 es >1 millón de Toneladas (Fig. 48) y aunque la distribución de los sedimentos para los años simulados es similar, es decir, mínimos y máximos coinciden en años, la cantidad de sedimentos simulados es sobreestimada.

Tabla XXVII: Datos de sedimentos observado durante el periodo 1972 a 1982 y simulados de la subcuenca 15.

AÑO	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
	10³ Ton/año										
E	S/D	1	4	S/D	S/D	S/D	7,006	1,962	21,216	3,841	12
F	S/D	170	S/D	S/D	178	S/D	67,168	S/D	153,948	4,720	11,112
M	S/D	10,974	S/D	140	12	S/D	265,182	S/D	181,929	13,598	9,649
A	S/D	S/D	S/D	80	0	S/D	3,177	S/D	51,618	2,911	3,117
M	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	182	S/D	31,107	22	1,048
J	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	14	S/D	12,992	3	14
J	S/D	S/D	83	S/D	27	3,016	8	S/D	3,341	7	2
A	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	3	32	6,976	13	396
S	S/D	S/D	S/D	125	1	93	955	27	2,231	7	396
O	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	12	36	2,523	6	11
N	199	S/D	S/D	37	11	S/D	415	18	3,643	13	17
D	161	S/D	1	S/D	S/D	64	S/D	13	3,381	6	9,436
TOTAL ANUAL	359	11,145	88	382	229	3,172	344,122	2,088	474,905	25,146	35,210

**SIMULADOS CON SWAT
ton/año**

SUBC. 15	30,325	422,890	124,867	164,396	1,163,481	509,754
-------------	--------	---------	---------	---------	-----------	---------

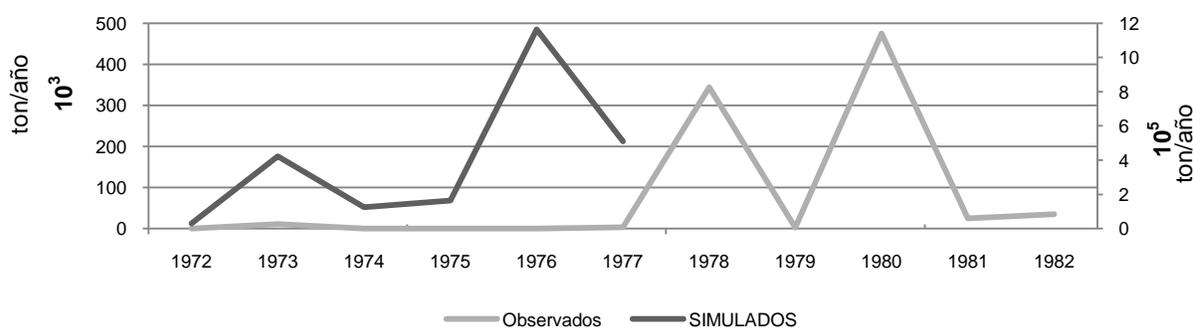


Figura 48: Sedimentos observados y simulados para la subcuenca 15.

IV.5. Datos LIDAR y vegetación en la cuenca del arroyo San Carlos.

El lidar aerotransportado es un sensor activo que consta de un telémetro emisor de luz láser y de un espejo que desvía el haz perpendicularmente a la trayectoria del avión. Este desplazamiento lateral, combinado con la trayectoria del avión, permite realizar un barrido del terreno en donde el sensor genera y emite una serie de pulsos láser, los cuales, al pegar con los objetos o el terreno, reflejan o devuelven al sensor parte de la energía del pulso emitido. Con esto, la medida de la distancia entre el sensor y el objeto iluminado por el láser es determinada a través del intervalo de tiempo entre la emisión y la reflexión o retorno del pulso. Para cada pulso emitido puede registrarse hasta tres retornos y para cada uno de ellos también la intensidad reflejada (INEGI, 2008).

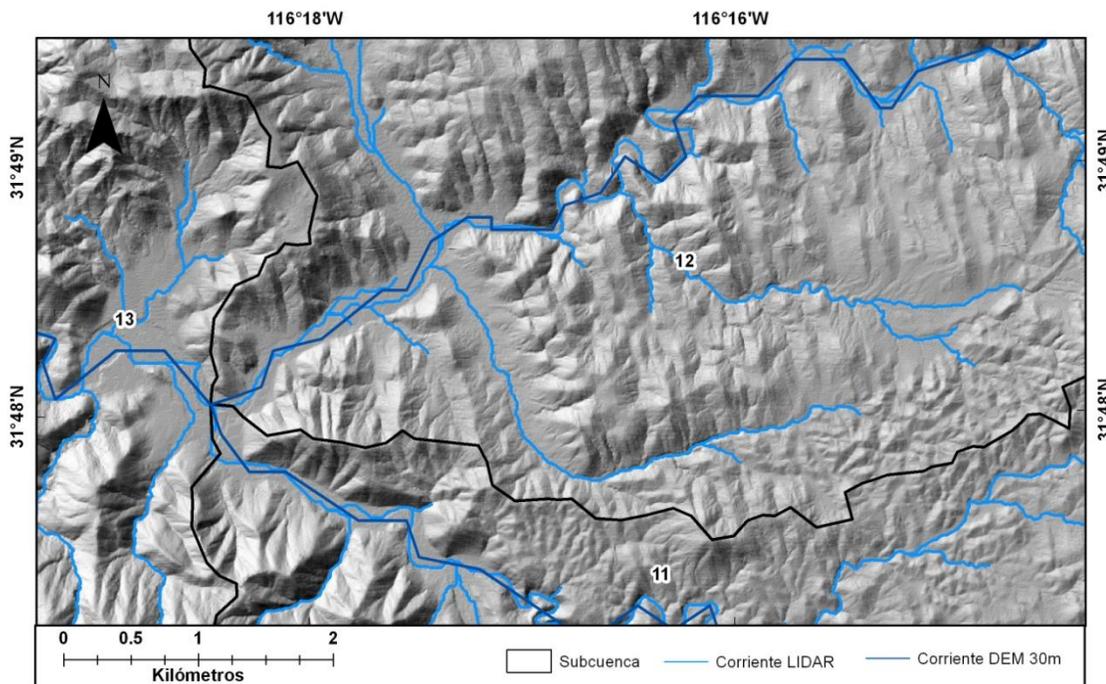
Los modelos digitales de elevación del tipo superficie son derivados del sistema de láser aerotransportado. Consiste en una matriz de datos de elevación interpolados a partir de los puntos clasificados del primer retorno y que corresponden tanto al terreno como a objetos presentes en el suelo, como infraestructura y vegetación. Por otro lado, los modelos digitales de elevación de tipo terreno son interpolados también a partir de la nube de puntos, pero utilizan con mayor peso los últimos retornos, que son los que penetran más, viajan mayor distancia y representan al terreno más que a la cubierta vegetal, cuya superficie se reconstruye con los primeros retornos. A los modelos digitales de elevación de tipo terreno se les conoce también como modelos de suelo desnudo (bare Earth en inglés) ya que tienen el efecto de remover la cubierta vegetal.

Los modelos digitales de elevación se utilizan para determinar la configuración y la altura del terreno. A partir de ellos se pueden modelar las alturas y obtener otros aspectos, tales como pendientes, secciones, desniveles, áreas sujetas a inundación, generación de curvas de nivel, volúmenes de tierra, delimitación de cuencas, etc., que pueden ser útiles en aplicaciones de cartografía, estudios

hidráulicos e hidrológicos, ingeniería civil, gestión de zonas de costa, estudios de la vegetación, etc. (INEGI, 2008).

Con datos LIDAR (*Light Detection and Ranging*) de la parte central de la cuenca del arroyo San Carlos, se obtuvo la altura aproximada de la vegetación existente en el área. Se cuenta con dos imágenes de modelos digitales de 5 metros de resolución, uno del terreno y otro del primer rebote o de superficie. Para el primer caso, la imagen del terreno no presenta cubierta vegetal, para el segundo caso se obtiene la forma del terreno y la cubierta vegetal que este tiene. Con el uso de la herramienta Spatial Analyst se realizaron los sombreados de los dos modelos y se facilitó la identificación del contenido de cada uno (Fig. 49).

Como la resolución del modelo digital del terreno generado con LIDAR es mayor al utilizado para la estimación del factor LS en RUSLE, se obtuvo la red de drenaje del modelo del terreno y se hizo una comparación visual del detalle con que se obtuvo la traza de corrientes.



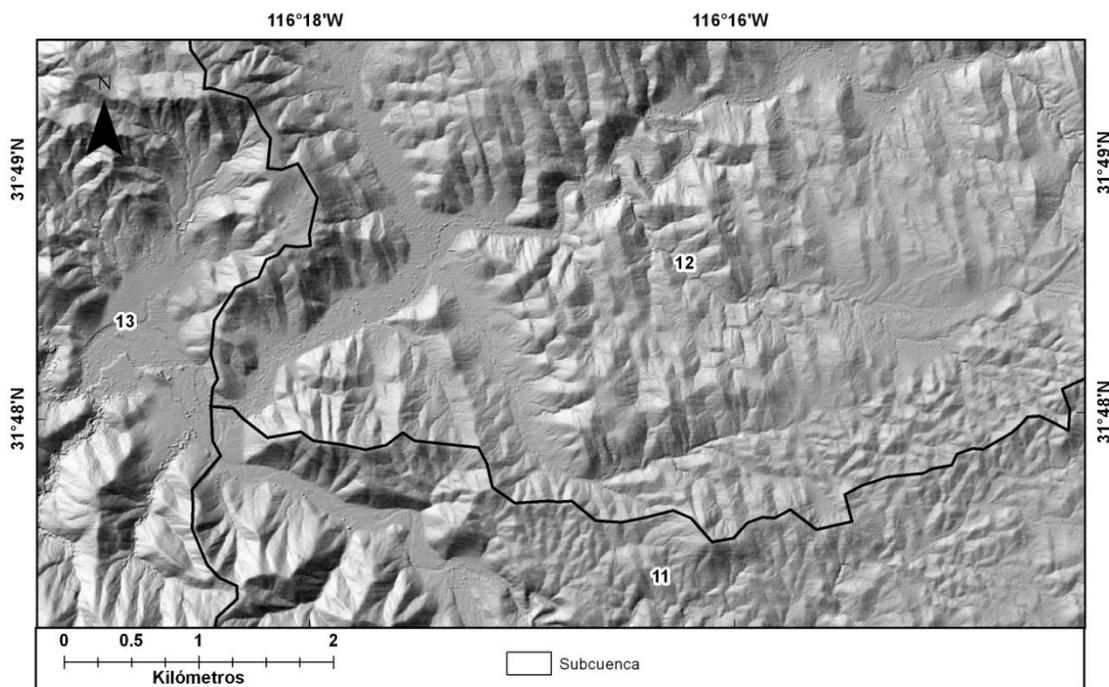


Figura 49: Modelo digital del terreno (superior) y modelo digital de superficie (inferior) de la parte central de la cuenca del Arroyo San Carlos

Se realizó el cálculo de la diferencia de alturas entre los dos modelos para obtener una estimación de la altura de la vegetación. Gran parte de la vegetación de mayor altura en la cuenca se encuentra concentrada en corredores riparios cerca del cauce de los ríos y el resto de la superficie de la cuenca con vegetación más baja de tipo chaparra. De ambos modelos se analizó la parte que corresponde a la cuenca del arroyo San Carlos y se obtuvo una superficie de 486 km². Descartando la vegetación con altura <0.20 metros, se obtuvo la clasificación de los intervalos de altura para la vegetación (Tabla XXVII) y la superficie cubierta por vegetación redujo notablemente a 64 km² que representa el 13% de la superficie de análisis (Fig. 50). De esta área el 50% corresponde a vegetación con altura mínima de 0.50 metros y máxima de 1. La vegetación con altura >5 metros, solo representa el 2%, y se observa que su distribución está limitada a las zonas riparias.

Tabla XXVIII: Intervalos de altura de la vegetación y área cubierta por cada uno.

INTERVALO (m)	ÁREA Km ²	%
0.20 - 0.50	12	19
0.51 - 1	30	47
1.1 - 2	15	23
2.1 - 5	6	9
>5.1	1	2

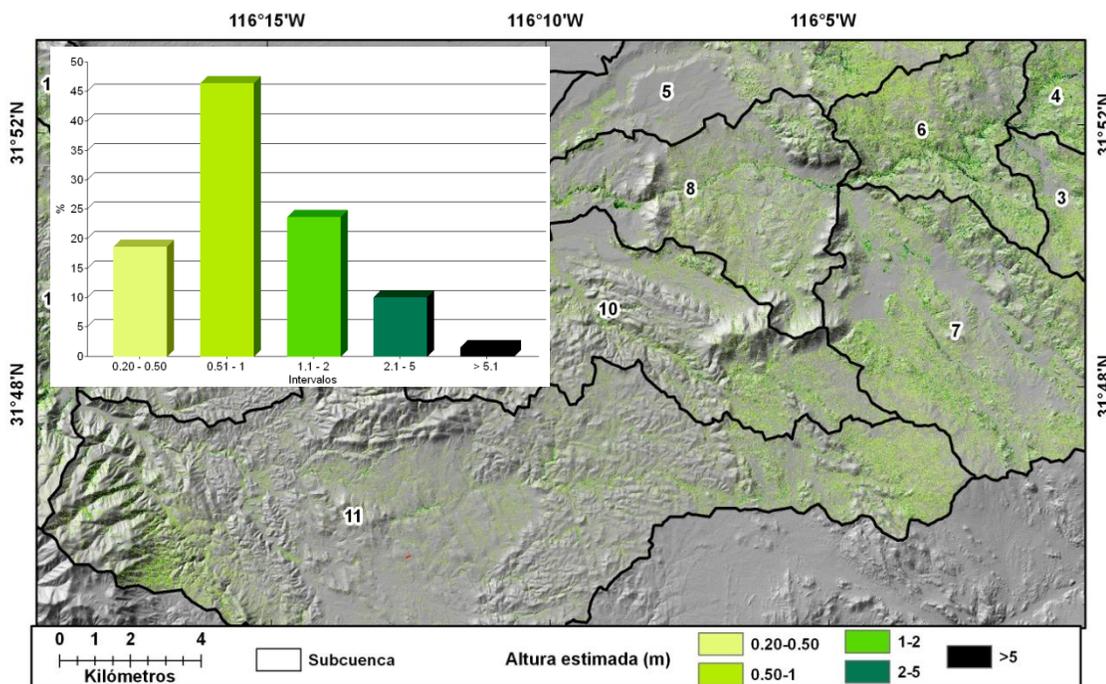


Figura 50: Distribución de la vegetación por alturas y superficie en porcentaje ocupada en la parte media de la cuenca del arroyo San Carlos.

Como se observa en la Fig. 51, la vegetación >2 metros sigue el patrón del cauce principal, donde se concentra la humedad, obteniendo una altura máxima de 10m y una altura promedio de 1.7 metros.

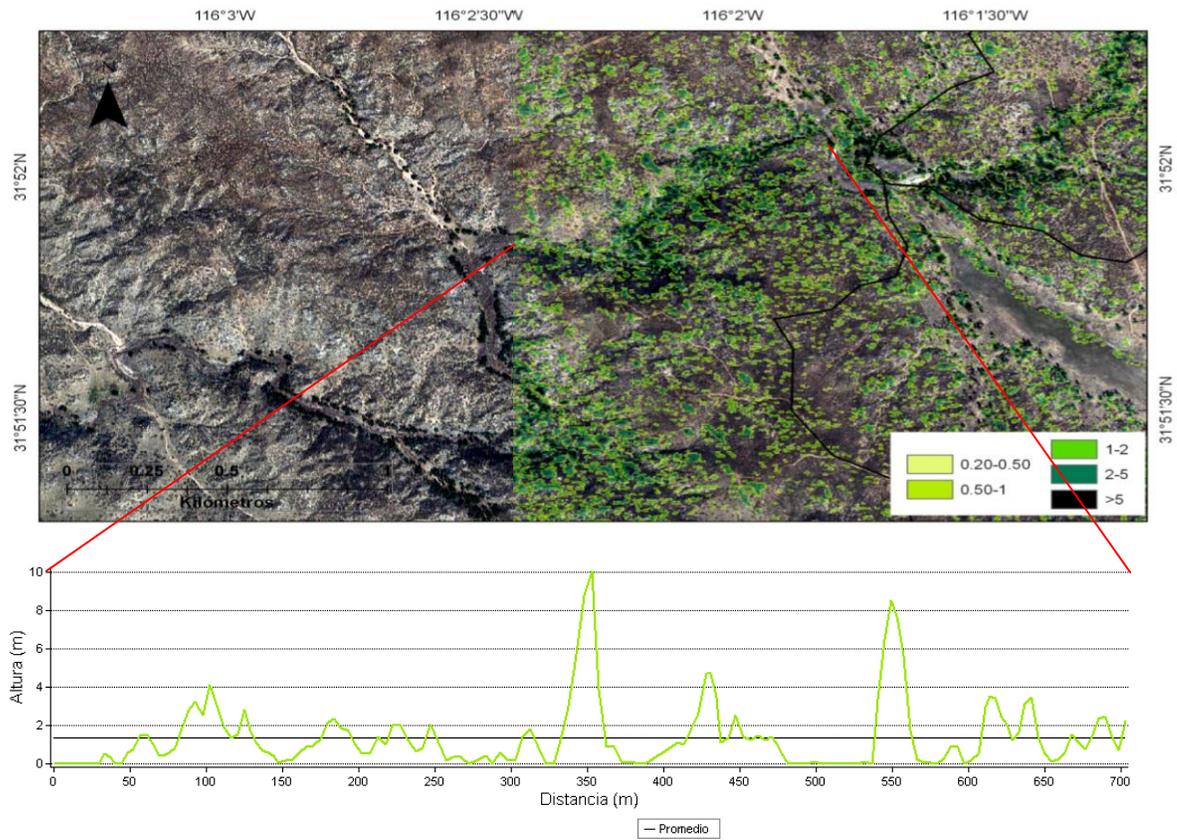


Figura 51: Vegetación riparia en las subcuencas 4, 6 y 8 y alturas de un segmento del cauce principal.



Figura 52: Algunos tipos de vegetación en la cuenca del Arroyo San Carlos.

V. DISCUSIÓN

Las características físicas de la cuenca del arroyo San Carlos son importantes para el desarrollo, evolución y distribución del proceso de erosión y sedimentos analizados en la investigación. La topografía es relevante debido a la presencia de zonas de planicie en la parte media de la cuenca donde se da prioridad a actividades agrícolas, zonas de acumulación y cañones de la cuenca.

El gradiente de altitud de la cuenca no tiene relación con la cantidad de precipitación registrada en las estaciones ($r^2=0.23$). Los registros de tres estaciones como Sierra Juárez a 1600 mns, presenta 376 mm equivalente a 67,850 MJ mm/km² h año del factor R, Ojos Negros a 700 mns con 235 mm y 31,752 MJ mm/km² h año y San Carlos a 170 mns registra 325 mm y 53,519 MJ mm/km² h año, similares a los de la estación Sierra Juárez pero a menor altitud. Por tal motivo al realizar la interpolación de valores de precipitación se observan un “ojo” en el sitio donde encuentra la estación San Carlos, que además se localiza en un área donde el flujo en el río es perenne y en nivel del agua fluctúa de acuerdo a la temporada del año y en los alrededores de la estación se presenta vegetación en galería.

Del análisis de la estación hidrometeorológica San Carlos se observó que en 1978 y 1980 se incrementó la precipitación por efecto de la ENSO, este incremento derivó en registros máximo para caudal y sedimentos durante el periodo analizado, por lo que se asocia el aporte de sedimentos a una precipitación mayor a 150 mm durante el mes más lluvioso o total anual de 600 mm, esto de acuerdo a los datos analizados.

Es posible que los datos reportados para la estación San Carlos estén subestimados, toda vez que el registro no es continuo y se desconoce la calidad

de los datos por lo que se considera como una incertidumbre, aunque son representativos de los procesos que ocurren alrededor de la estación.

Existe gran diferencia entre las clasificaciones y características definidas para el tipo de suelo por parte de *Natural Resources Conservation Service* y el INEGI, lo que dificulta e incrementa la incertidumbre para la estimación del factor K y los parámetros requeridos por la interfaz de SWAT.

Del análisis granulométrico realizado a las muestras de suelo obtenidas en campo, no se obtuvo un intervalo amplio de valores para el factor K, por lo que se determinó un valor homogéneo de K para toda la cuenca, aunado a esto, el 83% de la superficie de la cuenca es suelo de tipo Litosol, el resto se distribuye entre regosol, feozem planosol y Fluvisol, repartidos en el área agrícola de Ojos Negros y la parte baja de la cuenca.

El uso del modelo digital de elevación para el factor LS, arroja que en 90% de la cuenca el intervalo de los valores de pendiente y longitud de pendiente es de 0 a 5, el máximo valor de pendiente obtenido para la cuenca fue de 20° localizado en la zona del cañón San Carlos. El dominio de un solo intervalo de valores LS indica nuevamente una homogeneidad en la cuenca, a pesar de tener zonas con topografías abruptas, es importante tener en cuenta que en la metodología de RUSLE se considera una parcela experimental de 22.13 metros de longitud y una pendiente de 9%.

El 70% de la cuenca tiene una cubierta vegetal de tipo Chaparral, se presentan en menor proporción pequeñas superficies de pinos, encinos y vegetación en galería. Las mediciones realizadas en campo mediante transectos, se orientó únicamente a la vegetación dominante, de los datos obtenidos en campo no se presentó una variación considerable entre ellos. El uso de imágenes de satélite y los datos obtenidos en campo para la obtención de índices de vegetación por programación genética (GPVI), fue útil, con algunas limitaciones debido a que el tipo de cubierta en la cuenca determinada es homogénea. La metodología de Puente et al. (2009)

fue aplicada en la cuenca de Todos Santos con datos de 2007, mostrando resultados satisfactorios para la estimación de la erosión. Utilizando el índice de vegetación por programación genética, se estimó una pérdida de suelo de 31,000 ton/km²*año, con el promedio de datos del factor C obtenidos en campo y áreas de suelos desnudos. En esta investigación la estimación de erosión obtenida fue de 11,000 ton/km²*año. Se observa que el método utilizado para la obtención del factor C en la estimación de la erosión es determinante para incrementar o disminuir la tasa de erosión media anual en la cuenca del arroyo San Carlos.

Al analizar la distribución de la erosión mediante intervalos de valores definidos para cada estimación, se encontró que en ambos casos el 99% de la superficie de la cuenca se concentra en un solo intervalo, similar a la distribución del factor LS.

De las 15 subcuencas segmentadas sobresale la 9 y 15, para el primer caso más del 50% de la superficie corresponde a suelos desnudos por ser un área agrícola, con pendientes y longitud de pendiente mínimas, a pesar de estar desprovista de vegetación esta subcuenca es la que menor cantidad de erosión registra. En el segundo caso, representa el 17% del área total de la cuenca y es donde se sitúa la estación San Carlos con flujos de agua perenes y donde se presenta el máximo de erosión utilizando el GPVI.

Para el índice de Severidad del Incendio, se utilizó la imagen de un año posterior al evento y la de 10 días después del incendio, en el primer caso se obtuvo que de los 74 km² de área afectada, 24% se catálogos como área sin quemar, 20% como severidad baja y solo 8% como severidad moderada alta. Caso contrario ocurrió para la imagen de septiembre de 2009, el 100% de la superficie se considero de severidad alta. Por lo tanto, la temporalidad de las imágenes de satélite utilizadas es primordial para la adecuada obtención del índice de severidad del incendio. Se observó que la restauración de la vegetación en el área incendiada fue rápida aunque no total, toda vez que el incendio se registro en verano y en los meses de invierno se presenta precipitación. El *California Chaparral Institute*

(<http://www.californiachaparral.com/>) menciona que “El fuego en el chaparral es una fuerza disruptiva que lleva a la selección de las estrategias de supervivencia. Debido a que el fuego ha sido recurrente, aunque poco frecuente, durante millones de años en el chaparral, solo las especies que tienen adaptaciones, pueden recuperarse después de un incendio. En consecuencia, muchas especies de plantas de chaparral depende de algún incendio o de condiciones ambientales post-incendio para un éxito reproductivo, sin que el chaparral tenga la necesidad de ser quemado para lograrlo.

La diferencia entre máximos de erosión estimada es de 3,210 ton/km² año, en general para el 60% de las subcuencas se muestra un incremento, para el resto se obtuvieron resultados negativos. En las subcuencas 11 y 13 el incremento de erosión estimado es >8,000 ton/km²/ año, para la subcuenca 15 de 3,210 ton/km²/ año. En estas tres subcuencas se presentó el incendio en 2009, y aunque se observa un incremento en la erosión máxima no se puede afirmar que sea derivado del incendio ocurrido en esta zona, a pesar que la metodología utilizada para obtener el factor C fue la misma, el daño provocado a la cubierta vegetal de acuerdo al índice, el incendio no era tan severo.

Los datos simulados por SWAT para la cuenca del arroyo San Carlos resultaron ser similares en cuanto a precipitación, referente al transporte de sedimentos, en la cuenca no fue posible obtener resultados para cada una de las subcuencas debido a que no presentan gran variación en los parámetros de mayor sensibilidad utilizados por SWAT como el factor C de RUSLE en la cubierta vegetal, el tipo de suelo, valores de curvas numeradas y pendientes.

De manera cualitativa los datos arrojados por SWAT pueden ser válidos, aunque cuantitativamente no, para el primer caso, las condiciones geográficas físicas de la cuenca tales como el clima, la precipitación, escases de corrientes perenes, la cubierta vegetal, hacen que en la cuenca del arroyo San Carlos no sea posible el transporte de sedimentos debido a la escases de ríos que tengan la capacidad de

transportar los sedimentos aguas abajo, solo se presenta una movilización de sedimentos a distancias mínimas. Es posible que alguna porción del agua precipitada se infiltre antes de tener la energía necesaria para movilizar los sedimentos.

Solo se obtuvieron resultados simulados para 4 subcuencas, destacan la 9 y la 15, para el primer caso, en esta se presenta el máximo valor del factor C y en el segundo dentro de esta se encuentra la estación San Carlos, en la cual se presenta flujo de agua continuo con variaciones temporales, a diferencia del resto de la cuenca, es importante comentar que en esta subcuenca, se presenta un manatíal de aguas termales, que contribuyen al caudal.

Los datos LIDAR son de gran utilidad para diferentes propósitos, en este caso se realizó la comparación de las corrientes generadas con un modelo de 30 metros y los datos LIDAR de 5 metros, se pudo observar que con LIDAR se obtienen mejores resultados, debido a la resolución de los datos. Por otra parte la estimación de las alturas de la vegetación los datos son útiles para este objetivo además de ser una de las tendencias de uso para inventarios forestales, vegetación riparia entre otros.

En la CASC la vegetación de mayor altura se encuentra en las zonas riparias, aunque puede confundirse con rocas graníticas de dimensiones similares o mayores, por lo que es recomendable realizar un filtro o análisis más detallado de los datos.

Debido a que una de las variables requeridas por la ecuación 10 para la estimación del factor C de RUSLE es la altura de la vegetación, los datos LIDAR pudiera ayudar a la estimación de esta variable, por lo que es importante adecuarlos a dicha necesidad.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para la estimación de la erosión media anual, es de gran utilidad la metodología de RUSLE y Sistemas de Información Geográfica. Estos métodos han sido ampliamente utilizados para el cálculo de la erosión en cualquier tipo de paisaje, debido a la facilidad de uso y el entendimiento conceptual de los mismos.

El modelo digital de elevación es insumo fundamental para los modelos de distribución espacial, ya que puede proporcionar información espacial de altitud, pendiente y aspecto, decisivos en el modelo. Además son una herramienta para el análisis de sistemas hidrológicos, específicamente cuando se habla de la delimitación de cuencas, subcuencas y trazo de la hidrología superficial.

Los sistemas de información geográfica son una gran herramienta para el análisis *multi-layer* de información espacial y cuantitativa de la cuenca. Además de proporcionar resultados precisos, también se vuelve un medio de análisis eficaz al reducir los tiempos de ejecución.

La cuenca del arroyo San Carlos, no presenta grandes alteraciones en la cubierta vegetal, debido a que solo una pequeña superficie se destina para actividades agrícolas, esto en los alrededores de la comunidad de Ojos Negros y Maneadero.

La cantidad de estaciones meteorológicas y los datos contenidos en cada una de ellas, fue suficiente para obtenerlos valores del factor R en la cuenca del arroyo San Carlos.

No se presenta variación en los análisis granulométricos realizados a las muestras de suelo obtenidas en campo, por lo que se retomó el suelo predominante en la cuenca para determinar el factor K.

Los datos de cubierta vegetal para el factor C, se obtuvieron a través de transectos de 30 metros, se retomaron estos datos para obtener el Índice de Vegetación por Programación Genética, con esta metodología se ha obtenido una estimación de erosión mayor comparada con una cubierta de vegetación homogénea en la cuenca, por lo tanto la cubierta vegetal es un factor determinante para la adecuada estimación de la erosión.

La discretización de la cuenca permite identificar y cuantificar los diversos atributos que tiene influencia en cada una de las subcuencas.

Para la obtención del índice de severidad de incendio la fecha de adquisición de la imagen pre y post-incendio son extremadamente importantes para determinar los valores para los intervalos de clases y variación de la severidad del mismo.

Se mostro un incremento en la erosión de 2007 a 2009, principalmente en las subcuencas donde se presento el incendio forestal.

Los datos reportados de la estación San Carlos son representativos de los procesos analizados que ocurren en los alrededores de la localización espacial de la misma, toda vez que la distancia y condiciones topográficas de la parte alta de la cuenca, salen del rango aceptable (15 km) de análisis para el primero y son complejas y diferentes para el segundo caso.

Se recomienda analizar la serie de tiempo de los datos de la estación para los años subsecuentes a los analizados, esto para conocer los periodos de retorno, los efectos que genera la ENSO en caudal y sedimentos.

Los requerimientos de información para el empleo de SWAT pueden ser satisfechos con dificultades sorteables. Siempre será necesario recurrir a funciones de transferencia y criterios de experto, como en los casos de la información de suelo, crecimiento de cultivo y labores de manejo. Debe tenerse presente que las estimaciones de datos de entrada pueden afectar la calidad de

las simulaciones, y por lo tanto, es conveniente efectuar análisis de sensibilidad ante ellas para obtener aproximaciones al efecto que causarían errores en su estimación sobre el comportamiento de las salidas de interés.

SWAT se muestra como una buena herramienta de estudio y conocimiento de una cuenca y los procesos que ocurren dentro de ella. Permite establecer un balance global de los flujos y la distribución espacial y temporal, siempre que se trabaje sobre datos ya conocidos.

Calibrado bajo determinadas situaciones, permite realizar extrapolaciones espaciales y temporales de los datos que se posean durante esas situaciones. Sin embargo, la predicción ante situaciones nuevas, extremas (que son muchas veces las que interesa estudiar) ya sea climatológicas, o que afecten evidentemente a las características físico-químicas de alguna parte del área de estudio, no son fiables dado el fuerte carácter empírico con el que trabaja el modelo. Los parámetros de calibración pierden su validez frente a estas condiciones climatológicas o geográficas nuevas.

La modelación hidrológica es una herramienta fundamental en el manejo, planeación y aprovechamiento de los recursos hídricos, ya que muestran de forma cuantificable los puntos o causas de posibles problemas que pueden afectar una región desde el punto de vista del recurso hídrico.

Se recomienda retomar los datos integrados a SWAT para realizar una mejor estimación de los parámetros requeridos, sobre todo en la parte de análisis de sensibilidad y autocalibración de los datos observados. Del mismo modo continuar la investigación a cerca de la funcionalidad y aplicación del modelo SWAT para climas semiáridos, toda vez que hay bibliografía que reporta la poca eficacia del modelo en estos ecosistemas.

Se recomienda considerar los datos de altura de vegetación obtenidos mediante LIDAR para adecuarlo a la estimación del factor C de RUSLE.

VII. LITERATURA CITADA

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J., 1986. An introduction to the European Hydrological System— Systeme Hydrologique Europeen, SHE. 1. History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87: 45–59.

ASCE., 1999. GIS Modules and Distributed Models of the Watershed, Task Committee GIS Modules and Distributed Models of the Watershed, American Society of Civil Engineers, Reston, Va. p. 120.

Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, and N.B. Sammons., 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.

Arnold J. G., Di Luzio, M., and Srinivasan R., 2002. Soil and Water Assessment Tool (WATER 2000). Blackland Research Center, TAES and USDA-ARS. Temple. Texas. USA.

Bauer, H. L., 1943. The statistical analysis of Chaparral and other plant communities by means of transect samples. *Ecology*, 24: 45-60.

Bhattarai, R. and D. Dutta., 2007, Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS at catchment scale, *Water Resources Management*, no. 21, p. 1635–1647.

Beck, M.B., Jakeman, A.J., McAleer, M.J., 1995. Construction and evaluation of models of environmental systems. In: Beck, M.B., McAleer, M.J. (Eds.), *Modelling Change in Environmental Systems*. John Wiley and Sons, p. 3–35

Benson S. Sutherland J. and Gangi L.J., 2006. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD: LA-51.

Bennett, J.P., 1974. Concepts of mathematical modelling of sediment yield. *Water Resources Research* 10, p. 485–492.

Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology -the case of physically-based models. *Journal of Hydrology* 105, p. 157–172.

- Bloschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modelling. In: Kalma, J.D., Sivapalan, M. (Eds.), *Scale Issues in Hydrological Modelling*. John Wiley and Sons, England, p. 9–48.
- Brewer, C.K., J.C. Winne, R.L. Redmond, D.W. Opitz and M. V. Mangrich., 2005. *Classifying and Mapping Wildfire Severity: A Comparison of Methods*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(11).
- Bullock, S.H., 1999. La vegetación del noroeste de Baja California en el contexto de la inestabilidad ambiental. *Revista Chilena de Historia Natural*, 72:541-556.
- Chander, G., Markham B.L., and Helder D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no. 5, p. 893–903.
- Centini Giacomo., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143: 1-10
- DeBano, L. F., Mann, L. D. & Hamilton, D. A., 1970. Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 130–133.
- DeBano, L. F., Savage, S. M. & Hamilton, D. A., 1976. The transfer of heat and hydrophobic substances during burning. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 40: 779–782.
- DeBano, L. F., 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *J. Hydrol.* 231–232, 195–206.
- de Jong, S. M., 1994. Derivation of vegetative variables from a Landsat TM image for modeling soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 19:165–178.
- Diaz-Fierros, F., Benito Rueda, E. & Perez Moreira, R., 1987. Evaluation of the USLE for the prediction of erosion on burned forest areas in Galicia. *Catena* 14: 189–199.
- Dunin F., 1975. The use of physical process models. In: Chapman, T., Dunin, F. (Eds.), *Prediction in Catchment Hydrology—A National Symposium on Hydrology*. Australian Academy of Science, Canberra, p. 277–291.
- Eastman, J. R., 2004. *Idrisi Kilimanjaro. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Clark Labs, Clark University, USA.
- Erskine WD, Mahmoudzadeh A, Myers C., 2002. Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of Triassic sandstone near Sydney, NSW, Australia. *Catena* 49:271–287.

Ferro V, Porto P, Tusa G., 1998. Testing a distributed approach for modelling sediment delivery. *Hydrol Sci J* 43(2): 425–442

Foster, G.R., D.K. McCool, K.G. Renard, y W.C. Moldenhauer., 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI Metric Units. *J. Soil and Water Cons.* 36(6): 355-359.

French, N.H., Goovaerts P., y Kasischke E. S., 2004. Uncertainty in estimating carbon emissions from boreal fires. *Journal of Geophysical Research* 109 (D14S08): doi: 10.1029/2003JD003635.

Fraser, R.H., and Z. Li., 2002. Estimating fire-related parameters in boreal forest using SPOT VEGETATION. *Remote Sensing of Environment*, 82: 95-110

Gastil, R. G., 1975, Plutonic zones in the Peninsular Ranges of Southern California and Northern Baja California: *Geology*, vol. 3, p. 361-363.

Giovannini, G. & Lucchesi, S., 1983. Effect of fire on hydrophobic and cementing subsurface soil aggregates. *Soil. Sci.* 136: 231–236.

Giovannini, G., Lucchesi, S. & Giachetti, M., 1987. The natural evolution of a burned soil: a three-year investigation. *Soil Sci.* 143: 220–226.

Giovannini, G., Lucchesi, S. & Giachetti, M., 1988. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Sci.* 146: 255–261.

Green W.H., and G.A. Ampt., 1911. Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.*, 4(1): 1-24.

Griffin ML, Beasley DB, Fletcher JJ, Foster GR., 1988. Estimating soil loss on topographically nonuniform field and farm units. *J Soil Water Conserv* 43:326–331

Haan, C.T., Barfield, B.J., and J.C. Hayes., 1994. Design hydrology and sedimentology for small catchments. New York: Academic Press

Hairsine, P., Rose, C., 1992a. Modelling water erosion due to overland flow using physical principles: 2. Rill flow. *Water Resources Research* 28 (1): 245–250.

Howard, S.M., Ohlen, D.O., McKinley, R.A., Zhu, Z. Kitchen, J., 2002. Historical fire severity mapping from Landsat data. *Pecora 15/Land Satellite Information IV/ ISPRS Commission I Symposium, Proceedings.* American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Hudson, N.W., 1975. The factors determining the extent of soil erosion. In: Greenland, R. (Ed.), *Soil Conservation and Management in the Humid Tropics*. John Wiley and Sons.

Inbar, M., Tamir, M. & Wittenberg, L., 1998. Runoff and erosion after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphol.* 24: 17–33.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 2008, Modelo digital de elevación de alta resolución Lidar, Tipo terreno y superficie, H11BXXXX (datos y metadatos): Aguascalientes, México.

Jain Manoj K., Kothiyari Umesh C., 2000. Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol 45, No. 5, p: 771 – 786.

Jain MK, Kothiyari UC, Ranga Raju KG., 2004. A GIS based distributed rainfall runoff model. *J Hydrol, Elsevier Science* 299(1–2):107–135

Jain MK, Kothiyari UC, Rangaraju KG., 2005. Geographic information system based distributed model for soil erosion and rate of sediment outflow from catchments. *J Hydraul Eng ASCE* 131(7):755–769

Jakeman, A.J., Green, T.R., Beavis, S.G., Zhang, L., Dietrich, C.R., Crapper, P.F., 1999. Modelling upland and in-stream erosion, sediment and phosphorus transport in a large catchment. *Hydrological Processes* 13 (5): 745–752

Jakeman, A.J., Hornberger, G.M., 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research* 29 (8): 2637–2649.

Jia, G.J., I.C. Burke, A.F.H. Goetz, M.R. Kaufmann and B.C. Kindel., 2006. Assessing spatial patterns of forest fuel using AVRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 102: 318-327.

Kinnell P., 2005. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. *Hydrological Process* 19: 851–854. DOI: 10.1002/hyp.581

Key, C.H., N. Benson, D. Ohlen, S. Howard and Z. Zhu. 2003. Data acquisition timing for burned area remote sensing and relationships to measures of burn severity. 2nd Int. Wildland Fire Ecology & Fire Management Congress / 5th Symp. Fire & Forest Meteorology, Orlando, FL., USA. Nov 16-20 Paper J7G.3

Key, C.H., and N. C. Benson., 2006. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index: and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In D.C. Lutes; R.E. Keane; J.F. Caratti; C.H. Key; N.C.

Kothyari UC, Jain MK, Ranga Raju KG., 2002. Estimation of temporal variation of sediment yield using GIS. *Hydrol Sci* 47(4):693–705

Kummerow J. Krause D. Jow W., 1977. Root systems of chaparral shrubs. *Oecologia* 29: 163-177.

Kurczyn Robledo J.A. 2005. Evaluación del potencial de escurrimiento superficial al noroeste del Valle de Guadalupe, B.C. usando el método de las Curvas numeradas e imágenes de satélite. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de maestría. 90 pp.

Lane, L., Nichols, M., Paige, G., 1995. Modeling erosion on hillslopes: Concepts, theory and data. In: *International Congress on Modelling and Simulation Proceedings (Agriculture, Catchment Hydrology and Industry)*, 1. p. 1–17

Lane, L.J., M.R. Kidwell, and M.A. Weltz., 2000. Watershed sediment yield and rangeland health. *International Journal of Sediment Research* 15(1): 51-59.

Lentile, L. B., Z. A. Holden, A. M. S. Smith, M. J. Falkowski, A. T. Hudak, P. Morgan, S. A. Lewis, P. E. Gessler, and N. C. Benson., 2006. Remote sensing techniques to assess fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire* 15: 319-345.

Loch, R.J., Silburn, D.M., 1996. Constraints to sustainability—soil erosion. In: Clarke, L., Wylie, P.B. (Eds.), *Sustainable Crop Production in the Sub-tropics: an Australian Perspective*. QDPI.

Maidment, D. R., 2002. *Arc Hydro GIS for Water Resources*, ESRI Press, Redlands, California, U.S.A. 203 p.

Merritt W.S., Letcher R.A., Jakeman A.J., 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software* 18:761–799.

Meyer, L. D. & Wischmeier, W. H., 1969. Mathematical simulation of the processes of soil erosion by water. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs* 12(6): 754-758.

Miller, J.D. y Yool, S.R., 2002. Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data, *Remote Sensing of Environment*, 82 (2002): 481-496.

Myneni, R. B., F. G. Hall, P.J. Sellers, and A.L. Marshak., 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33: 481-486.

- Minnich, R. A., and E. Franco Vizcaíno. 1997. Mediterranean vegetation of Baja California. *Fremontia* 25:3–12.
- Moore I, Burch G., 1986a. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Sci Soc Am J* 50: 1294–1298
- Moore I, Burch G., 1986b. Modeling erosion and deposition: topographic effects. *Trans ASAE* 29(5):1624–1630, 1640
- Moore I, Wilson JP. 1992. Length slope factor for the revised universal soil loss equation: simplified method of solution. *J Soil Water Conserv* 47(4): 423–428
- Morad, M. y Treviño A., 2001. Sistemas de Información Geográfica y modelizaciones hidrológicas: Una aproximación a las Ventajas y Dificultades de su Aplicación. *Boletín de la A.G.E.*, Volumen, No. 31, p. 23-46.
- Montoya J., Francés F., Vélez J., Julien P., 2006. Desarrollo de un modelo distribuido de producción, transporte y depositación de sedimentos. Aplicación en una cuenca experimental. Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana, Venezuela.
- Morad, M., Treviño, A., 2001. Sistemas de Información Geográfica y Modelizaciones Hidrológicas: Una Aproximación a las Ventajas y Dificultades de su Aplicación, *Boletín de la A.G.E.*, No. 31, p. 23-46.
- Moraila Martinez T., 2010 Modelación hidrológica de escurrimiento superficial en la cuenca Santa Rosa, B.C. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de maestría. 65 pp.
- Nearing, M.A., Lane, L.J., Lopes, V.L., 1994. Modelling soil erosion. In: Lad, R. (Ed.), *Soil Erosion: Research Methods*, p. 127–156.
- Neitsch, S.L. Arnold, J.G. Kiniry, J.R. Srinivasan, R. Williams J.R., 2005, *Soil and Water Assessment Tools*, (<http://swatmodel.tamu.edu/documentation>)
- Novotny, V. and H. Olem., 1994. *Water Quality. Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Ogden, F. L., Garbrecht, J., DeBarry, P. A., Johnson, L. E., 2001. GIS and Distributed Watershed Models. II: Modules, Interfaces, and Models, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vo. 6, No. 6, p. 515-523.
- Onyando JO, Kisoyan P, Chemelil MC., 2005. Estimation of potential soil erosion for river Perkerra catchment in Kenya. *Water Resour Manag* 19:133–143

Ortega-Rivera M. A., 1997. Geochronological Constraints on the Termal and Tilting History of the Peninsular Ranges Batholith of Alta California and Baja California: Tectonic implications for Southwestern Northamerica (México). (Ph. D. Thesis) Department of Geological Sciences, Queen' University, Kingston, Ontario, Canada, Appendix 1, Appendix I.-2.

Pandey A, Chowdary VM, Mal BC., 2007. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. *Water Resour Manag*, Springer 21:729–746. doi:10.1007/s11269-006-9061-z

Peinado, M., F. Alcaraz, J. L. Aguirre, J. Delgadillo, and J. Aguado., 1995. Shrubland formations and associations in Mediterranean-desert transitional zones of northwestern Baja California. *Vegetation* 117: 165–179.

Prosser, I.P., Rutherford, I.D., Olley, J.M., Young, W.J., Wallbrink, P.J., Moran, C.J., 2001a. Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia. *Marine and Freshwater Research* 52: 81–99.

Puente C. Olague G, Smith S.V. Bullock S. Gonzalez M. Hinojosa A., 2009, Genetic programming methodology that synthesize vegetation indices for the estimation of soil cover. doi 10.1145/1569901.1570114

Poli, R. W. Langdon, and N. F. McPhee., 2008. A field guide to genetic programming. Disponible en <http://www.gp-field-guide.org.uk>.

Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Porter JP., 1991. RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation. *J Soil Water Conserv* 46(1):30–33

Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, and D. C. Yoder, coordinators., 1996. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Handbook Number 703. USDA, Washington, D.C., USA.

Renard, K. G., and J. R. Freimund., 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157: 287–306.

Rose, C.W., 1993. Erosion and sedimentation. In: Bonell, M., Hufschmidt, M.M., Gladwell, J.S. (Eds.), *Hydrology and Water Management in the Humid Tropics: Hydrological Research Issues and Strategies for Water Management*. Cambridge University Press, p.301–343

Rulli, M. C., 2000. Sulla valutazione della produzione di sedimenti da parte di un'area percorsa da incendio mediante un approccio idrologico distribuito. *Proc.*

Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche IDRA, 2000, 109 -117, Ed. Bios.

Sadeghi SHR, Singh JK, Das G., 2004. Efficacy of annual soil erosion models for storm-wise sediment prediction: a case study. In *Agric Eng J* 13: 1–1

Sanchez R. Antolin y Brovelli M. A. 2008. GRASS GIS for the distinction of vegetation from buildings using LiDAR altimetric data. II JORNADA DE SIG LIBRE, UNiversitat de Girona.

Savage, S. M., Osborn, J., Letey, J. & Heaton, C., 1972. Substances contributing to fire-induced water repellency in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 674–678.

Seyfried, M.S., Wilcox, B.P., 1995. Scale and the nature of spatial variability: field examples having implications for hydrologic modeling. *Water Resources Research* 31 (1):173–184.

Shirazi, M.A., y Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 142-147

Smith, S. V., S. H. Bullock, A. Hinojosa-Corona, E. Franco-Vizcaíno, M. Escoto-Rodríguez, T. G. Kretzschmar, L. M. Farfán, and J. M. Salazar-Ceseña., 2007. Soil Erosion and Significance for Carbon Fluxes in a Mountainous Mediterranean-Climatic Watershed. *Ecological Applications* 17:1379–1387. [doi:10.1890/06-0615.1]

Sorooshian S., 1991. Parameter estimation, model identification and model validation: conceptual type models. In: Bowles, D.S., O'Connell, P.E. (Eds.), *Recent Advances in the Modelling of Hydrological Systems*. Kluwer Academic, p. 443– 467.

USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service), 1972. *National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, Section 4*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., and Anderson, W. P., 1987. AGNPS, Agricultural Nonpoint Source Pollution Model; A Large Watershed Analysis Tool, Conservation Research Report 35, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Zippin, D. B., and J. M. Vanderwier. 1994. Scrub community descriptions of the Baja California peninsula, Mexico. *Madroño* 41:85–119.

Weltz, M.A., Renard K.G. y Simanton J.R. 1987, Revised universal soil loss equation for western rangelands. P.104-111. En *Symp-Strategies for Classification*

and Management of Native Vegetation for Food Productions in Arid Zones. USDA-GTR, RM-150, Tucson, Arizona.

Williams, J. R., 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resour. Bull.* 11: 965–974.

Williams JR, Berndt HD., 1972. Sediment yield computed with universal equation. *J Hydrol Div ASCE* 98(12): 2087–2098.

Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold., 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(6): 970-986.

Wischmeier, W. H. y Smith D. D., 1978. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. USDA Handbook no. 537, 58p.

Weber, M.G. y Stocks B.J., 1998. Forest fires and sustainability in the boreal forest of Canada. *Ambio* 27:545-550

Wheater, H.S., Jakeman, A.J., Beven, K.J., 1993. Progress and directions in rainfall-runoff modelling. In: Jakeman, A.J., Beck, M.B.,

Wu S, Li J, Huang G., 2005. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models. *Environ Model Assess* 10:33–42. G.

Crop type Parameters			
Crop Name		CPNM (4 character)	
CHAPARRAL		CHAP	
IDC	<input checked="" type="checkbox"/> Crop is fertilized		
Trees			
BIO_E [(kg/ha)/(MJ/m ²)]	HVST1 [(kg/ha)/(kg/ha)]	BLAI (m ² /m ²)	
10	0.1	0.5	
FRGRW1 (fraction)	LAIMX1 (fraction)	CHTMX (m)	RDMX (m)
0	0	2	0.3
FRGRW2 (fraction)	LAIMX2 (fraction)	DLAI (heat units/heat units)	
0	0	0.15	
T_OPT (C)	T_BASE (C)	CNYLD(kg N/kg seed)	CPYLD(kg P/kg)
35	13	0.0015	0.0001
BN1 (kg N/kg biomass)	BN2 (kg N/kg biomass)	BN3 (kg N/kg biomass)	
0.004	0.002	0.001	
BP1 (kg P/kg biomass)	BP2 (kg P/kg biomass)	BP3 (kg P/kg biomass)	
0.0005	0.0002	0.0003	
wSYF [(kg/ha)/(kg/ha)]	USLE_C	GSI (m/s)	VPDFR (kPa)
0	0.041	0	1.5
FRGMAX (fraction)	WAVP (rate)	CO2HI (uL/L)	BIDEHI (ratio)
0	0	300	5
RSDDC_PL (fraction)	ALAI_MIN (m ² /m ²)	BIO_LEAF (fraction)	
0.01	0	0	
MAT_YRS (years)	BMX_TREES (tons/ha)	EXT_COEF	BM_DIEOFF
0	0	0	0

Hydrological Parameters			
OV_N	SCS Runoff Curve Numbers		
Manning's N (roughness)	A	B	C
0.14 LU	25	71	81
			89
			LU

Crop type Parameters			
Crop Name		CPNM (4 character)	
SUELO DESNUDO		SUEO	
IDC	<input type="checkbox"/> Crop is fertilized		
Perennial			
BIO_E [(kg/ha)/(MJ/m ²)]	HVST1 [(kg/ha)/(kg/ha)]	BLAI (m ² /m ²)	
10	0.1	0.5	
FRGRW1 (fraction)	LAIMX1 (fraction)	CHTMX (m)	RDMX (m)
0	0	0.1	0
FRGRW2 (fraction)	LAIMX2 (fraction)	DLAI (heat units/heat units)	
0	0	0.15	
T_OPT (C)	T_BASE (C)	CNYLD(kg N/kg seed)	CPYLD(kg P/kg)
11	0	0.0015	0.0001
BN1 (kg N/kg biomass)	BN2 (kg N/kg biomass)	BN3 (kg N/kg biomass)	
0.004	0.002	0.001	
BP1 (kg P/kg biomass)	BP2 (kg P/kg biomass)	BP3 (kg P/kg biomass)	
0.0005	0.0002	0.0003	
wSYF [(kg/ha)/(kg/ha)]	USLE_C	GSI (m/s)	VPDFR (kPa)
0	0.45	0	1.5
FRGMAX (fraction)	WAVP (rate)	CO2HI (uL/L)	BIDEHI (ratio)
0	0	300	5
RSDDC_PL (fraction)	ALAI_MIN (m ² /m ²)	BIO_LEAF (fraction)	
0.01	0	0	
MAT_YRS (years)	BMX_TREES (tons/ha)	EXT_COEF	BM_DIEOFF
0	0	0	0

Hydrological Parameters			
OV_N	SCS Runoff Curve Numbers		
Manning's N (roughness)	A	B	C
0.14 LU	25	80	87
			93
			LU

Parámetros utilizados en SWAT para los dos tipos de cubierta de suelos que se presentan en la cuenca del arroyo San Carlos.

ANEXO II. DATOS ANALIZADOS DE LA ESTACIÓN SAN CARLOS.

Datos hidrometeorológicos registrados en la estación San Carlos.

MES	PRECIP mm	T.MÁX °C	T. MÍN °C	CAUDAL m ³ /10 ³ /día	SEDIMENTOS Ton/10 ³ /día	PRECIP mm	T.MÁX oC	T. MÍN °C	CAUDAL m ³ /10 ³ /día	SEDIMENTOS Ton/10 ³ /día
1972						1973				
E	0	18.7	5.1	92620.8	S/D	65.3	16.9	5.8	138412.8	0.9
F	3	20.9	7.7	73872	S/D	73.5	18.7	8.9	272764.8	169.6
M	0.0	21.7	7.4	47692.8	S/D	141.0	16.1	7.5	1097625.6	10974.4
A	1.5	23.1	9.4	51408	S/D	7.0	20.0	8.6	158284.8	S/D
M	5.0	23.5	10.6	29721.6	S/D	2.5	21.9	11.1	94953.6	S/D
J	3	24.6	13.7	81734.4	S/D	0	26.0	13.4	47174.4	S/D
J	0	29.1	16.1	34560	S/D	0	26.5	13.7	27302.4	S/D
A	0	30.0	17.4	17452.8	S/D	0	27.3	14.8	21427.2	S/D
S	3	27.2	14.5	17020.8	S/D	0	26.2	12.5	19008.0	S/D
O	40.5	23.9	12.9	34732.8	S/D	0	27.6	11.8	8035.2	S/D
N	58.3	20.9	9.6	147571.2	198.7	33.4	20.9	9.1	16156.8	S/D
D	62	19.1	6.8	183254.4	160.7	5	21.2	7.1	54345.6	S/D
1974						1975				
E	76.5	18.5	6.8	195177.6	4	8	20.1	7.5	147225.6	S/D
F	2.2	21.3	6.2	134438.4	S/D	17	18.3	6.0	137289.6	S/D
M	47.6	18.9	8.1	165283.2	S/D	90	17.8	6.4	198028.8	140
A	6.8	22.2	8.6	133401.6	S/D	68	17.2	6.9	212284.8	80.4
M	0.5	21.9	11.4	65232	S/D	3.3	20.1	9.4	105235.2	S/D
J	0	24.7	13.0	54518.4	S/D	2	23.3	11.9	40867.2	S/D
J	5.2	25.0	13.9	219369.6	82.7	0	26.5	14.6	14601.6	S/D
A	0	26.6	14.0	68169.6	S/D	0	27.5	14.4	7257.6	S/D
S	0.8	26.9	14.5	48124.8	S/D	3.2	28.7	16.2	32227.2	124.8
O	61.4	24.3	12.8	41817.6	S/D	1.9	24.8	11.5	34128	S/D
N	4.3	22.8	11.0	53136	S/D	58.6	23.5	9.4	69206.4	36.9
D	46.3	20.6	6.9	95731.2	0.5	16.5	19.9	7.1	85708.8	S/D
1976						1977				
E	2	23.3	8.0	101174.4	S/D	63.8	19.5	8.7	111196.8	S/D
F	131	19.7	8.7	256262.4	177.5	12	23.5	9.3	90288	S/D
M	40.5	20.2	7.7	165196.8	12.2	27.5	18.4	6.4	85881.6	S/D
A	47.1	18.8	9.3	148608	0.2	11	21.9	8.4	74476.8	S/D
M	0	21.6	5.5	77760	S/D	29.5	20.5	9.8	57110.4	S/D
J	0	27.2	6.3	27734.4	S/D	0	25.4	12.5	23932.8	S/D
J	0.5	27.0	15.6	38361.6	26.7	0	28.6	13.4	31449.6	3015.7
A	0	28.4	13.1	23760	S/D	35.5	28.0	16.6	294451.2	S/D
S	85	28.0	17.7	65923.2	1.3	0	27.5	14.6	84672	92.5
O	37	26.2	13.7	52444.8	S/D	12.3	26.7	13.1	36547.2	S/D
N	48	25.9	11.6	126835.2	11.4	6.6	25.5	11.9	42854.4	S/D
D	28.5	22.5	8.6	48384	S/D	95.1	21.4	10.8	138672	64

Datos hidrometeorológicos registrados en la estación San Carlos (continuación).

MES	PRECIP mm	T. MÁX °C	T. MÍN °C	CAUDAL m ³ /d/10 ³	SEDIMENTOS Ton/día/10 ³	PRECIP mm	T. MÁX °C	T. MÍN °C	CAUDAL m ³ /d/10 ³	SEDIMENTOS Ton/día/10 ³
1978						1979				
E	202.1	18.9	10.1	2198880.2	7005.7	96.1	16.1	6.6	746323.2	1962
F	157.4	19.5	8.9	7713274.4	67167.6	30.6	18.6	6.3	7869485	S/D
M	169.6	20.9	11.5	29194559	265182.4	138.3	18.3	8.3	8048678	S/D
A	49.2	19.5	10.1	1746748.8	3177.1	5.2	21.3	9.1	3233952	S/D
M	0.5	24.4	11.8	398304	182.2	13.9	21.5	11.0	1386115	S/D
J	0	28.5	13.5	176083.2	13.6	2	26.9	13.9	1067990	S/D
J	0	27.8	14.0	116553.6	8.3	0	28.2	14.1	1113005	S/D
A	0	28.1	13.9	72835.2	3	0	27.9	15.3	337564.8	32.2
S	4.9	29.7	16.3	185414.4	955.2	0	31.1	16.1	249350.4	26.6
O	1.7	27.2	14.3	118972.8	11.8	6	25.6	11.7	367632	35.9
N	114	20.6	9.3	278208	414.7	16.5	23.6	9.5	409536	18.3
D	89.6	18.2	7.3	666316.8	S/D	9	23.1	9.2	394675.2	12.7
1980						1981				
E	218.9	19.6	9.8	3308083.2	21216.2	38.8	22	9.5	1553990	3840.8
F	211	21.7	11.1	14552017	153947.5	51.8	23	10.2	1532563	4719.5
M	117.5	19.3	8.4	20564323	181929.3	88	19.3	9.1	2567462	13597.7
A	22.7	22.4	10.3	6983625.6	51617.9	9	21.6	7.6	1063325	2910.9
M	0.4	20.4	10.2	4611600	31107.2	0.5	23.6	9.6	645494.4	22.4
J	0	25.5	11.1	2776982.4	12992.2	0	28.9	12.4	525484.8	3.1
J	0	29.2	15.5	1683072	3341	0	29.9	16.8	392774.4	7
A	0	29.2	16.5	2212272	6976.1	0	30.1	15.9	373766.4	12.9
S	0	27.0	13.5	1184112	2231.1	18	28.6	14.1	371606.4	7.1
O	4.5	26.5	12.7	1153440	2522.9	4.5	24.7	11.9	427334.4	6
N	0	24.5	9.2	1281312	3643.3	55	23.4	10.3	521078.4	12.6
D	6.5	23.7	8.4	1427068.8	3380.7	19	21.5	9.4	483840	5.8
1982										
E	88.5	17.8	7.6	638236.8	12.4					
F	59.5	20.4	9.0	1689724.8	11111.5					
M	88.8	19.2	9.1	2034288	9648.9					
A	6.6	22.2	9.6	1486857.6	3117.2					
M	1	21.1	11.5	636854.4	1048.4					
J	0	22.4	11.9	451699.2	13.9					
J	0	28.0	14.0	357177.6	1.7					
A	0	29.2	15.9	340070.4	396					
S	8	29.0	16.7	315532.8	396.4					
O	3	27.6	12.7	322876.8	10.5					
N	100.3	22.1	10.1	437270.4	16.8					
D	59.2	18.7	7.8	1905033.6	9436.4					

ANEXO III. RESULTADOS ESTIMADOS POR EL MODELO SWAT.

Tabla XXVIII: Valores de precipitación observados y simulados para el periodo 1972-1982.

MES	1972		1973		1974		1975		1976	
	OBS.	SIM.								
E	0	0	62	36.7	5	7.8	46.3	24.7	16.5	5.1
F	3	0.9	65.3	33.7	76.5	73.3	8	4.2	2	0.3
M	0	0	73.5	55.3	2.2	3.1	17	17.8	131	98.2
A	1.5	0.7	141	79.5	47.6	39.1	90	70.3	40.5	30.5
M	5	2.7	7	2.5	6.8	2.6	68	44.8	47.1	31.3
J	3	1.9	2.5	0.7	0.5	1.1	3.3	0.5	0	0.4
J	0	0.7	0	0	0	0	2	2.4	0	0
A	0	12.3	0	0	5.2	27.5	0	4.5	0.5	12.9
S	3	1.2	0	16.2	0	8.9	0	3.2	0	0
O	40.5	44.8	0	0	0.8	1.9	3.2	19.7	85	81.0
N	58.3	45.0	0	0	61.4	59.4	1.9	0.7	37	19.7
D	62	36.7	33.4	43.9	4.3	3.1	58.6	33.4	48	29.1

MES	1977		1978		1979		1980		1981		1982	
	OBS.	SIM.	OBS.	SIM.	OBS.	SIM.	OBS.	SIM.	OBS.	SIM.	OBS.	SIM.
E	28.5	20.8	95.1	99.1	89.6	84.8	9	15.7	6.5	21.3	19	6.1
F	63.8	40.6	202.1	134.6	96.1	133.9	218.9	195.2	38.8	33.5	88.5	84.3
M	12	4.8	157.4	110.9	30.6	12.7	211	232.9	51.8	63.6	59.5	71.2
A	27.5	37.5	169.6	148.7	138.3	112.8	117.5	82.5	88	87.6	88.8	110.7
M	11	6.1	49.2	19.6	5.2	1.3	22.7	23.8	9	19.4	6.6	16.3
J	29.5	9.9	0.5	0.8	13.9	11.9	0.4	12.8	0.5	2.92	1	0.1
J	0	0	0	0	2	0.3	0	0	0	0	0	0
A	0	10.7	0	8.6	0	0	0	6.5	0	16.7	0	4.9
S	35.5	92.9	0	9.9	0	11.7	0	19.1	0	15.9	0	43.7
O	0	10.6	4.9	4.1	0	11.2	0	0	18	15.6	8	6.4
N	12.3	15.6	1.7	9.9	6	8.1	4.5	3.9	4.5	3.3	3	3.7
D	6.6	3.5	114	79.8	16.5	14.6	0	0	55	34.3	100.3	123.

Archivo output.std de SWAT

SWAT Sept '05 VERSION2005
 General Input/output section (file.cio): ArcSWAT 2.3.4
 26/01/2011 12:00:00 a.m.ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for watershed in year 1 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC	N (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.03	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.98	0.00	0.00	0.01	0.07	0.00	0.56	0.46	3.27	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	NaN	NaN	6.84	0.02	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.73	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	NaN	NaN	6.57	0.01	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2.75	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	NaN	NaN	11.42	0.01	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	1.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	13.56	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	5.46	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	12.34	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	NaN	NaN	14.41	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	7.24	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	44.81	0.41	0.00	0.01	0.06	0.00	NaN	NaN	2.49	0.40	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
11	45.04	0.39	0.00	0.05	0.08	0.00	NaN	NaN	1.00	0.40	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
12	36.77	0.36	0.00	0.09	0.09	0.00	NaN	NaN	0.27	0.43	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.02	0.00	0.00	0.00
1972	147.27	1.17	0.00	0.21	0.30	0.00	NaN	NaN	73.11	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.06	0.00	0.01	0.00

SWAT Sept '05 VERSION2005
 General Input/output section (file.cio): ArcSWAT 2.3.4
 26/01/2011 12:00:00 a.m.ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for watershed in year 2 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC	N (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	33.75	0.23	0.00	0.10	0.11	0.00	NaN	NaN	0.51	0.31	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.01	0.00	0.00	0.00
2	55.36	0.57	0.00	0.11	0.11	0.00	NaN	NaN	0.26	0.64	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.04	0.00	0.01	0.00
3	79.05	0.86	0.00	0.14	0.13	0.00	NaN	NaN	1.53	0.93	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.05	0.00	0.01	0.00
4	2.59	0.00	0.00	0.14	0.02	0.00	NaN	NaN	1.35	0.14	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.77	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	NaN	NaN	1.51	0.08	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	NaN	NaN	1.76	0.04	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	NaN	NaN	1.75	0.02	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00	0.00
8	16.24	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	NaN	NaN	2.17	0.01	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	1.50	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	1.01	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
11	43.94	0.60	0.00	0.00	0.06	0.00	NaN	NaN	0.52	0.58	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
12	7.83	0.01	0.00	0.04	0.04	0.00	NaN	NaN	0.23	0.04	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
1973	239.54	2.27	0.00	0.68	0.48	0.00	NaN	NaN	14.09	2.79	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.02

Annual summary for watershed in year 3 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC	N (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	73.32	0.92	0.00	0.06	0.08	0.00	NaN	NaN	0.23	0.96	0.01	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00	0.01
2	3.11	0.03	0.00	0.05	0.03	0.00	NaN	NaN	0.47	0.08	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00	0.00
3	39.12	0.47	0.00	0.06	0.06	0.00	NaN	NaN	0.99	0.50	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00	0.00
4	2.68	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	NaN	NaN	1.10	0.06	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
5	1.15	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	NaN	NaN	2.62	0.04	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	NaN	NaN	1.24	0.02	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
7	27.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	1.45	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
8	8.09	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	NaN	NaN	2.76	0.01	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
9	1.92	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	NaN	NaN	1.24	0.02	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
10	59.40	0.38	0.00	0.02	0.02	0.00	NaN	NaN	1.06	0.39	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
11	3.11	0.05	0.00	0.04	0.04	0.00	NaN	NaN	0.79	0.08	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
12	24.77	0.24	0.00	0.05	0.13	0.00	NaN	NaN	0.18	0.27	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
1974	244.18	2.12	0.00	0.41	0.43	0.00	NaN	NaN	14.11	2.43	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.02

SWAT Sept '05 VERSION2005
 General Input/output section (file.cio): ArcSWAT 2.3.4
 26/01/2011 12:00:00 a.m.ARCGIS-SWAT interface AV

Annual summary for watershed in year 4 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC	N (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	4.20	0.04	0.00	0.08	0.06	0.00	NaN	NaN	0.27	0.11	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00	0.00
2	17.82	0.16	0.00	0.08	0.07	0.00	NaN	NaN	0.55	0.23	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00	0.00
3	70.34	0.73	0.00	0.09	0.09	0.00	NaN	NaN	1.51	0.77	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00	0.00
4	44.83	0.55	0.00	0.11	0.09	0.00	NaN	NaN	1.12	0.62	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00	0.00
5	0.55	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	NaN	NaN	1.31	0.10	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
6	2.46	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	NaN	NaN	1.71	0.05	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
7	4.52	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	NaN	NaN	2.44	0.02	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
8	3.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	0.88	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
9	19.77	0.04	0.00	0.01	0.03	0.00	NaN	NaN	1.44	0.04	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
10	0.79	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	NaN	NaN	0.33	0.02	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
11	33.46	0.30	0.00	0.01	0.02	0.00	NaN	NaN	0.25	0.30	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
12	5.14	0.03	0.00	0.03	0.07	0.00	NaN	NaN	0.16	0.05	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.00
1975	207.11	1.85	0.00	0.60	0.44	0.00	NaN	NaN	11.96	2.33	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00	0.01

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC N (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	0.33	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	NaN	NaN	0.26	0.05	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
2	98.23	0.70	0.00	0.05	0.07	0.00	NaN	NaN	0.45	0.72	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
3	30.58	0.37	0.00	0.08	0.07	0.00	NaN	NaN	0.42	0.42	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
4	31.33	0.11	0.00	0.07	0.02	0.00	NaN	NaN	2.41	0.16	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
5	0.48	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	NaN	NaN	1.88	0.05	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	NaN	NaN	2.05	0.02	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
7	12.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	1.99	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	1.85	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
9	81.04	0.93	0.00	0.02	0.08	0.00	NaN	NaN	1.02	0.92	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.01
10	19.72	0.09	0.00	0.04	0.04	0.00	NaN	NaN	0.87	0.12	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
11	29.11	0.44	0.00	0.05	0.06	0.00	NaN	NaN	0.60	0.48	0.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	0.00
12	20.87	0.31	0.00	0.06	0.02	0.00	NaN	NaN	0.17	0.35	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
1976	324.62	2.94	0.00	0.50	0.40	0.00	NaN	NaN	13.96	3.30	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.02

1 SWAT Sept '05 VERSION2005

General Input/output section (file.cio): ArcSWAT 2.3.4
26/01/2011 12:00:00 a.m.ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for watershed in year 6 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC N (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	40.66	0.54	0.00	0.07	0.10	0.00	NaN	NaN	0.32	0.57	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
2	4.87	0.03	0.00	0.07	0.03	0.00	NaN	NaN	1.57	0.10	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
3	37.53	0.80	0.00	0.06	0.05	0.00	NaN	NaN	1.82	0.84	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
4	6.12	0.04	0.00	0.06	0.03	0.00	NaN	NaN	1.94	0.09	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
5	9.93	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	NaN	NaN	1.30	0.04	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	NaN	NaN	2.32	0.01	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
7	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	2.97	0.00	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
8	92.09	1.40	0.00	0.01	0.04	0.00	NaN	NaN	3.18	1.40	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.01
9	10.66	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	NaN	NaN	2.16	0.02	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
10	15.60	0.10	0.00	0.02	0.03	0.00	NaN	NaN	0.85	0.12	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
11	3.59	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	NaN	NaN	0.19	0.02	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	0.00
12	99.10	46.43	0.00	0.05	0.22	0.00	NaN	NaN	0.49	45.65	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
1977	330.22	49.33	0.00	0.43	0.50	0.00	NaN	NaN	19.11	48.86	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN

1 SWAT Sept '05 VERSION2005

General Input/output section (file.cio): ArcSWAT 2.3.4
26/01/2011 12:00:00 a.m.ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for watershed in year 8 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC N (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	134.59	1.79	0.00	0.44	0.12	0.00	NaN	NaN	0.71	2.17	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
2	110.87	1.01	0.00	0.37	0.11	0.00	NaN	NaN	0.64	1.32	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
3	148.73	1.08	0.00	0.30	0.12	0.00	NaN	NaN	0.99	1.32	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
4	19.65	0.15	0.00	0.20	0.05	0.00	NaN	NaN	2.43	0.33	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
5	0.08	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	NaN	NaN	2.65	0.12	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
6	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	NaN	NaN	1.88	0.05	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
7	8.66	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	NaN	NaN	2.69	0.02	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
8	9.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	0.76	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
9	4.16	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	NaN	NaN	1.77	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
10	9.90	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	NaN	NaN	1.19	0.02	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
11	79.85	0.95	0.00	0.03	0.09	0.00	NaN	NaN	0.44	0.95	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
12	84.80	2.62	0.00	0.08	0.10	0.00	NaN	NaN	0.44	2.59	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
1978	611.23	7.62	0.00	1.63	0.64	0.00	NaN	NaN	16.59	8.92	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN

1 SWAT Sept '05 VERSION2005

General Input/output section (file.cio): ArcSWAT 2.3.4
26/01/2011 12:00:00 a.m.ARCGIS-SWAT interface AV

Annual Summary for watershed in year 8 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	ORGANIC N (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	133.86	2.02	0.00	0.14	0.14	0.00	NaN	NaN	0.74	2.08	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
2	12.75	0.16	0.00	0.15	0.08	0.00	NaN	NaN	1.42	0.29	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
3	112.75	1.16	0.00	0.15	0.11	0.00	NaN	NaN	1.06	1.24	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
4	1.34	0.00	0.00	0.14	0.03	0.00	NaN	NaN	1.07	0.14	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
5	11.95	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	NaN	NaN	2.24	0.09	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
6	0.33	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	NaN	NaN	1.69	0.04	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
7	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	NaN	NaN	1.92	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
8	11.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	1.48	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
9	11.27	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	NaN	NaN	2.25	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
10	8.13	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00	NaN	NaN	0.80	0.03	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
11	14.06	0.18	0.00	0.02	0.03	0.00	NaN	NaN	0.55	0.19	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
12	15.07	9.11	0.00	0.04	0.09	0.00	NaN	NaN	0.38	8.85	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
1979	333.23	12.66	0.00	0.78	0.49	0.00	NaN	NaN	15.61	12.97	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	N ORGANIC (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	195.21	2.33	0.00	0.18	0.12	0.00	NaN	NaN	0.25	2.46	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
2	232.93	2.72	0.00	0.19	0.11	0.00	NaN	NaN	0.14	2.86	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
3	82.52	0.78	0.00	0.19	0.12	0.00	NaN	NaN	1.44	0.92	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
4	23.88	0.02	0.00	0.15	0.03	0.00	NaN	NaN	1.01	0.16	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
5	12.87	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	NaN	NaN	2.59	0.09	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
6	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	NaN	NaN	1.35	0.04	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
7	6.52	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	NaN	NaN	2.71	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
8	19.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	2.04	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	1.05	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
10	3.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	0.33	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	NaN	NaN	0.25	0.00	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
12	21.36	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	NaN	NaN	0.08	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
1980	598.41	5.85	0.00	0.86	0.43	0.00	NaN	NaN	13.23	6.56	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN

1
 SWAT sept '05 VERSION2005
 General input/output section (file.cio): ArcSWAT 2.3.4
 26/01/2011 12:00:00 a.m.ARCGIS-SWAT interface AV

Annual summary for watershed in year 10 of simulation

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	N ORGANIC (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	33.05	0.53	0.00	0.03	0.06	0.00	NaN	NaN	0.17	0.53	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
2	63.06	0.57	0.00	0.05	0.08	0.00	NaN	NaN	0.26	0.60	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
3	87.64	1.13	0.00	0.10	0.10	0.00	NaN	NaN	1.68	1.18	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
4	19.48	0.14	0.00	0.10	0.04	0.00	NaN	NaN	0.60	0.23	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
5	2.92	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	NaN	NaN	2.88	0.07	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
6	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	NaN	NaN	3.42	0.03	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
7	16.72	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	NaN	NaN	2.75	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
8	15.90	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	NaN	NaN	3.07	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
9	15.64	0.16	0.00	0.01	0.04	0.00	NaN	NaN	1.02	0.16	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
10	3.36	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	NaN	NaN	0.48	0.04	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
11	34.32	0.43	0.00	0.03	0.02	0.00	NaN	NaN	0.37	0.45	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
12	6.14	0.20	0.00	0.04	0.05	0.00	NaN	NaN	0.14	0.22	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
1981	298.24	3.18	0.00	0.51	0.43	0.00	NaN	NaN	16.85	3.52	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN

UNIT TIME	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCO LATE (mm)	TILE Q (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD (t/ha)	NO3 SURQ	NO3 LATQ	NO3 PERC	NO3 CROP	N ORGANIC (kg nutrient/ha)	P SOLUBLE	P ORGANIC
1	84.35	0.88	0.00	0.07	0.12	0.00	NaN	NaN	0.28	0.89	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
2	71.22	0.60	0.00	0.09	0.07	0.00	NaN	NaN	1.40	0.68	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
3	110.68	0.81	0.00	0.10	0.08	0.00	NaN	NaN	1.26	0.88	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
4	16.37	0.00	0.00	0.10	0.03	0.00	NaN	NaN	2.05	0.10	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
5	0.17	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	NaN	NaN	0.87	0.06	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
6	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	NaN	NaN	1.59	0.03	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
7	4.97	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	NaN	NaN	1.51	0.01	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
8	43.74	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	NaN	NaN	2.21	0.04	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
9	6.46	0.03	0.00	0.02	0.04	0.00	NaN	NaN	1.39	0.04	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
10	3.71	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	NaN	NaN	0.99	0.04	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
11	123.71	1.00	0.00	0.04	0.09	0.00	NaN	NaN	0.30	0.98	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
12	62.97	5.87	0.00	0.11	0.41	0.00	NaN	NaN	0.41	5.84	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN
1982	528.35	9.25	0.00	0.67	0.89	0.00	NaN	NaN	14.25	9.58	NaN	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN	0.00	NaN