



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA DISCRETIZACIÓN DE
LA CUENCA Y MODELO DIGITAL DE
ELEVACIONES EN LA ESTIMACIÓN DE
LA EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS DE
GRAN TAMAÑO**

VIRGINIA ISABEL GONZÁLEZ VALDERRAMA

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
CARLOS A. BONILLA MELÉNDEZ

Santiago de Chile, Septiembre, 2013

© 2013, Virginia González



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

EFECTO DE LA DISCRETIZACIÓN DE LA CUENCA Y MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES EN LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS DE GRAN TAMAÑO

VIRGINIA ISABEL GONZÁLEZ VALDERRAMA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

CARLOS A. BONILLA MELÉNDEZ

JORGE A. GIRONÁS LEÓN

FERNANDO R. SANTIBAÑEZ QUEZADA

LUIS CARVACHO BART

JORGE R. VERA ANDREO

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Septiembre, 2013

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de tesis fue posible gracias a la colaboración de importantes personas e instituciones que me apoyaron en el ámbito académico, personal y económico. En primer lugar agradezco al Dr. Carlos A. Bonilla, profesor guía de esta investigación, por su constante orientación y motivación que permitió culminar exitosamente mi trabajo. Su aporte ha sido invaluable para el desarrollo de esta tesis y también para mi formación como profesional.

Especial reconocimiento también merecen los compañeros que conforman el equipo de trabajo dirigido por el Prof. Bonilla, por su valioso aporte. En especial a Athena Carkovic y Gabriel Lobo, ya que su apoyo para la realización de las simulaciones y para el desarrollo del método de comparación de redes fue muy significativo, además por sus sugerencias que siempre fueron muy acertadas. También a Rocío Céspedes y Tessa Maurer por contribuir con la preparación de los archivos de entrada para el modelo.

Me gustaría agradecer también a los profesores Jorge Gironás, Fernando Santibañez, Luis Carvacho y Jorge Vera. Sus acertadas observaciones, en cada una de sus áreas de especialidad, enriquecieron enormemente el trabajo realizado.

Un agradecimiento muy especial merecen mis padres y mis hermanos, por el apoyo, comprensión y ánimo recibidos de su parte, así como por sus oportunos consejos que siempre me han ayudado.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a los amigos con los que compartí durante mi estadía en la Pontificia Universidad Católica de Chile, quienes me demostraron que además de ser excelentes amigos, son excelentes profesionales, y pude contar con sus consejos tanto a nivel personal como académico. Y a quién además de ser mi amigo es mi compañero de vida: Eduardo Valenzuela, te agradezco tu paciencia e incondicional apoyo, sigamos construyendo un futuro juntos.

Finalmente, quiero agradecer a la Fundación Canal del Maipo por otorgarme la Beca Arturo Cousiño Lyon. Y a la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF) quienes, a través del Proyecto 050/2011 del Fondo de Investigación del Bosque Nativo, financiaron esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ABREVIATURAS	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Empleo de herramientas SIG para modelar erosión hídrica.....	4
1.1.1. El modelo de erosión hídrica WEPP	4
1.1.2. La interfaz geo-espacial del modelo WEPP.....	7
1.2. Discretización de cuencas	8
1.2.1. El modelo TOPAZ	9
1.2.2. El programa Arc Hydro Tools.....	11
1.3. Objetivos y estructura del documento.....	12
2. MATERIALES Y MÉTODOS	14
2.1. Descripción del área de estudio.....	14
2.2. Modelos Digitales de Elevación.....	16
2.3. Discretización de las cuencas	19
2.4. Comparación cuantitativa de redes hidrográficas	22
2.5. Implementación del modelo de erosión	25
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
3.1. Discretización de la cuenca	27
3.2. Efecto sobre las estimaciones de erosión y escorrentía.....	33
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS.....	57

ANEXO A: CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS

TRES PASOS Y RINCÓN	58
---------------------------	----

A.1. Curvas Hipsográficas.....	58
--------------------------------	----

A.2. Índice de Gravelius	59
--------------------------------	----

A.3. Distribución de pendientes	59
---------------------------------------	----

ANEXO B: COMPARACIÓN DE REDES HIDROGRÁFICAS	61
---	----

B.1. Preprocesamiento de la carta topográfica de la cuenca Tres Pasos	61
---	----

B.2. Preprocesamiento de la carta topográfica de la cuenca Rincón	64
---	----

ANEXO C: VARIABLES METEOROLÓGICAS PARA LA MODELACIÓN EN

GEOWEPP	66
---------------	----

ANEXO D: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN GEOWEPP	69
--	----

D.1. Resultados de la simulación TP16.....	70
--	----

D.2. Resultados de la simulación TP26.....	73
--	----

D.3. Resultados de la simulación TP24.....	75
--	----

D.4. Resultados de la simulación R16.....	77
---	----

D.5. Resultados de la simulación R05.....	80
---	----

D.6. Resultados de la simulación R06.....	84
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Propiedades del tipo de suelo Luvic Phaeozems ingresadas para la simulación en WEPP.....	26
Tabla 3-1: Estimaciones de la descarga de sedimentos de la cuenca Tres Pasos usando nueve combinaciones de CSA y MSCL y tres MDE. La diferencia por fuente fue calculada comparando los resultados de los MDE SRTM y ASTER de 90 m, mientras que la diferencia por resolución se calculó comparando los MDE ASTER de 30 m y 90 m. Adicionalmente se muestran los valores promedio, mínimo y máximo obtenidos en cada serie, así como la diferencia entre el mínimo y el máximo.....	37
Tabla 3-2: Estimaciones de la descarga de sedimentos de la cuenca Rincón usando nueve combinaciones de CSA y MSCL y tres MDE. La diferencia por fuente fue calculada comparando los resultados de los MDE SRTM y ASTER de 90 m, mientras que la diferencia por resolución se calculó comparando los MDE ASTER de 30 m y 90 m. Adicionalmente se muestran los valores promedio, mínimo y máximo obtenidos en cada serie, así como la diferencia entre el mínimo y el máximo.....	38
Tabla 3-3: Estimaciones de la descarga de sedimentos máxima en una ladera de la cuenca Tres Pasos usando nueve combinaciones de CSA y MSCL y tres MDE. La diferencia por fuente fue calculada comparando los resultados de los MDE SRTM y ASTER de 90 m, mientras que la diferencia por resolución se calculó comparando los MDE ASTER de 30 m y 90 m. Adicionalmente se muestran los valores promedio, mínimo y máximo obtenidos en cada serie, así como la diferencia entre el mínimo y el máximo.....	39
Tabla 3-4: Estimaciones de la descarga de sedimentos máxima en una ladera de la cuenca Rincón usando nueve combinaciones de CSA y MSCL y tres MDE. La diferencia por fuente fue calculada comparando los resultados de los MDE SRTM y ASTER de 90 m, mientras que la diferencia por	

<p>resolución se calculó comparando los MDE ASTER de 30 m y 90 m. Adicionalmente se muestran los valores promedio, mínimo y máximo obtenidos en cada serie, así como la diferencia entre el mínimo y el máximo.....</p>	40
<p>Tabla 3-5: Variación que provoca el rango apropiado de ΔF en el número de laderas y canales, área, escorrentía y erosión.</p>	44
<p>Tabla A-1: Área, perímetro e índice de Gravelius de las cuencas Tres Pasos y Rincón.</p>	59
<p>Tabla D-1: Código de identificación de las simulaciones realizadas en GeoWEPP para las cuencas Tres Pasos y Rincón.</p>	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

- Figura 1-1: Representación de una ladera con cambio de pendiente en el modelo WEPP. En la figura, la sedimentación ocurre luego de que la descarga de sedimentos (línea punteada) excede la capacidad de transporte del fluido (línea segmentada). Fuente: Adaptado de Flanagan & Nearing (2000)... 6
- Figura 1-2: Diagrama de funcionamiento del modelo GeoWEPP. Los datos sobre pendientes, tipo y uso de suelo son extraídos de capas de información y enlazados con archivos de parámetros de WEPP junto a los datos climáticos. La discretización de la cuenca es determinada con el modelo TOPAZ. Fuente: Elaboración propia. 8
- Figura 2-1: Ubicación de las cuencas Tres Pasos y Rincón. Ambas cuencas poseen superficies y condiciones climáticas similares. Fuente: Elaboración propia..... 15
- Figura 2- 2: Mapas de elevaciones, pendiente y exposición de la cuenca Tres Pasos para distintos MDE. Fuente: Elaboración propia. 18
- Figura 2-3: Mapas de elevaciones, pendiente y exposición de la cuenca Rincón para distintos MDE. Fuente: Elaboración propia. 18
- Figura 2-4: Imágenes de redes hidrográficas de la cuenca Tres Pasos provenientes de a) cartas topográficas del IGM en escala 1:50.000, b) aplicación de Arc Hydro Tools usando el MDE ASTER de 30 m con un umbral de 200 celdas, c) MDE SRTM 90 m con un umbral de 80 celdas y d) MDE ASTER 90 m con un umbral de 50 celdas. Fuente: Elaboración propia. 20
- Figura 2-5: Imágenes de redes hidrográficas de la cuenca Rincón provenientes de a) cartas topográficas del IGM en escala 1:50.000, b) aplicación de Arc Hydro Tools usando el MDE ASTER de 30 m con un umbral de 200 celdas, c) MDE SRTM 90 m con un umbral de 50 celdas y d) MDE ASTER 90 m con un umbral de 50 celdas. Fuente: Elaboración propia. 21
- Figura 2-6: Representación visual de la variación de la red hidrográfica de la cuenca para las combinaciones de CSA y MSCL seleccionadas en este estudio. Fuente: Elaboración propia. 21

- Figura 2-7: Diagrama esquemático sobre la forma en que se obtuvieron las redes hidrográficas utilizadas en este estudio y las comparaciones que se llevaron a cabo entre ellas a través del método cuantitativo aplicado. Fuente: Elaboración propia. 22
- Figura 3-1: Discretizaciones de las cuencas Tres Pasos y Rincón obtenidas usando TOPAZ con tres MDE y nueve combinaciones de CSA y MSCL. El ancho de los canales varía de acuerdo a la resolución del MDE. Los distintos colores representan las laderas. Fuente: Elaboración propia. ... 28
- Figura 3-2: Comparación entre las configuraciones de cuencas determinadas con TOPAZ para las cuencas Tres Pasos y Rincón. En los tres MDE utilizados, el aumento de los valores de CSA y MSCL provocó un aumento en el área promedio de las laderas debido a que el número de laderas y canales disminuyó, y el área total de la cuenca permaneció constante. Fuente: Elaboración propia. 29
- Figura 3-3: Valores de F calculados para cada red hidrográfica de la cuenca Tres Pasos usando como referencias la carta topográfica IGM y las redes hidrográficas obtenidas con Arc Hydro Tools. El ΔF permite comparar en términos relativos las redes hidrográficas obtenidas con TOPAZ de acuerdo al mejor F obtenido en la serie (encerrado en un círculo en la figura). Fuente: Elaboración propia. 30
- Figura 3-4: Valores de F calculados para cada red hidrográfica de la cuenca Rincón usando como referencias la carta topográfica IGM y las redes hidrográficas obtenidas con Arc Hydro Tools. Estos muestran menor variabilidad que en la cuenca Tres Pasos. Los mejores F obtenidos en cada serie están encerrados en un círculo. Fuente: Elaboración propia. . 31
- Figura 3-5: Distribución espacial de la descarga de sedimentos en las cuencas Tres Pasos y Rincón de acuerdo al MDE y nivel de discretización. La distribución espacial de la erosión varió significativamente de acuerdo a la discretización de la cuenca. Fuente: Elaboración propia. 33
- Figura 3-6: Discretización y distribución espacial de la descarga de sedimentos obtenidas para la cuenca Tres Pasos utilizando una combinación de CSA 10 ha y MSCL 1500 m y tres MDE. Se observa que los resultados de

erosión varían de acuerdo a la superficie de las laderas. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 3-7: Estimaciones de la descarga de sedimentos para las cuencas Tres Pasos y Rincón con diferentes discretizaciones para tres MDE. Las estimaciones de la descarga de sedimentos máxima en una ladera presentaron mayor variabilidad que la descarga total, calculada como la suma de los valores generados en cada ladera ($t \text{ año}^{-1}$) divididos entre el área total de la cuenca (ha). La cuenca Rincón presentó menor variabilidad que la cuenca Tres Pasos debido a que la superficie de sus laderas presento menor variabilidad. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 3-8: Variación de las estimaciones de erosión y escorrentía del modelo WEPP de acuerdo a la longitud de la ladera para distintas pendientes. Se observa que los resultados de escorrentía permanecen casi constantes mientras que las estimaciones de erosión varían de forma importante. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 3-9: Resultados de las estimaciones de erosión del modelo WEPP distribuidos en la ladera, para pendientes de 10% y 40% en laderas de 65 m y 140 m de longitud. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 3-10: Curvas de regresión entre la variación de la discretización, representada a través del ΔF y la variación en la descarga de sedimentos. El análisis estadístico demostró que la fuente y resolución del MDE tiene efecto en la estimación de la descarga de sedimentos. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 3-11: Curvas de regresión entre la variación de la discretización, representada a través del ΔF y la variación en el número de laderas y canales. Se observa que la relación es directa. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 3-12: Curvas de regresión entre la variación de la discretización, representada a través del ΔF y la variación en los resultados de área y escorrentía. Se observa que la variación es mínima. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura A-1: Curvas hipsográficas de las cuencas Tres Pasos y Rincón determinadas usando el MDE SRTM de 90 m. Fuente: Elaboración propia.	58

- Figura A-2: Distribución de pendientes de las cuencas Tres Pasos y Rincón. Las curvas se determinaron usando los datos de los mapas de pendientes construidos con los MDE de SRTM 90 m y ASTER de 30 m. Fuente: Elaboración propia. 60
- Figura B-1: Imágenes utilizadas en la comparación cuantitativa de redes hidrográficas para la cuenca Tres Pasos y los MDE de 90 m. (a) Imagen de referencia obtenida a partir del preprocesamiento realizado a la carta topográfica de la cuenca Tres Pasos aplicando el algoritmo de identificación de canales ajustando el ancho para las redes obtenidas con los MDE de 90 m. (b) Redes hidrográficas obtenidas con el modelo TOPAZ usando el MDE SRTM de 90 m y (c) ASTER de 90 m de la cuenca Tres Pasos. Fuente: Elaboración propia. 62
- Figura B-2: Imágenes utilizadas en la comparación cuantitativa de redes hidrográficas para la cuenca Tres Pasos y el MDE de 30 m. (a) Imagen de referencia obtenida a partir del preprocesamiento realizado a la carta topográfica de la cuenca Tres Pasos aplicando el algoritmo de identificación de canales ajustando el ancho para las redes obtenidas con el MDE de 30 m. (b) Redes hidrográficas obtenidas con el modelo TOPAZ usando el MDE ASTER de 30 m de la cuenca Tres Pasos. Fuente: Elaboración propia. 63
- Figura B-3: Imágenes utilizadas en la comparación cuantitativa de redes hidrográficas para la cuenca Rincón y los MDE de 90 m. (a) Imagen de referencia obtenida a partir del preprocesamiento realizado a la carta topográfica de la cuenca Rincón aplicando el algoritmo de identificación de canales ajustando el ancho para las redes obtenidas con los MDE de 90 m. (b) Redes hidrográficas obtenidas con el modelo TOPAZ usando el MDE SRTM de 90 m y (c) ASTER de 90 m de la cuenca Rincón. Fuente: Elaboración propia. 64
- Figura B-4: Imágenes utilizadas en la comparación cuantitativa de redes hidrográficas para la cuenca Rincón y el MDE de 30 m. (a) Imagen de referencia obtenida a partir del preprocesamiento realizado a la carta topográfica de la cuenca Rincón aplicando el algoritmo de identificación

de canales ajustando el ancho para las redes obtenidas con el MDE de 30 m. (b) Redes hidrográficas obtenidas con el modelo TOPAZ usando el MDE ASTER de 30 m de la cuenca Rincón. Fuente: Elaboración propia.	65
.....	65
Figura C-1: Distribución anual de la precipitación y temperatura utilizados en la simulación. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura C-2: Distribución mensual como promedio de 30 años de la precipitación y la temperatura utilizados en la simulación. Fuente: Elaboración propia. ...	67
Figura C-3: Distribución anual de la radiación solar, velocidad del viento y temperatura de rocío utilizados en la simulación. Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura C-4: Distribución mensual como promedio de 30 años de la radiación solar, velocidad del viento y temperatura de rocío utilizados en la simulación. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura D-1: Interfaz del modelo GeoWEPP. En la figura se muestra como ejemplo: El mapa cartográfico, la red hidrográfica y la delimitación de laderas generadas con TOPAZ para la cuenca Tres Pasos. Fuente: GeoWEPP..	69

ABREVIATURAS

ASTER:	Radiómetro avanzado aerotransportado de emisión y reflexión termal, por sus siglas en inglés.
CIC:	Capacidad de intercambio catiónico.
CSA:	Área crítica de fuente, por sus siglas en inglés.
DGA:	Dirección General de Aguas, Chile.
FAO:	Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, por sus siglas en inglés.
GeoWEPP:	Interfaz geo-espacial del proyecto de predicción de erosión hídrica, por sus siglas en inglés.
IGM:	Instituto Geográfico Militar, Chile.
MDE:	Modelo digital de elevación.
MOS:	Materia orgánica del suelo.
MSCL:	Longitud mínima de un canal de fuente, por sus siglas en inglés.
SIG:	Sistemas de información geográfica.
SRTM:	Misión de topografía por radar del transbordador espacial, por sus siglas en inglés.
TOPAZ:	Parametrización topográfica, por su acrónimo en inglés.
USDA:	Departamento de agricultura de Estados Unidos, por sus siglas en inglés.
WEPP:	Proyecto de predicción de erosión hídrica, por sus siglas en inglés.

RESUMEN

El empleo de modelos de erosión hídrica acoplados a Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha facilitado el análisis a escala de cuenca. Modelos como la interfaz geo-espacial del Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (GeoWEPP) son capaces de determinar la erosión, distribuida espacial y temporalmente. Para ello requieren una discretización, con el fin de identificar las laderas y canales que conforman la cuenca. GeoWEPP incorpora el modelo de Parametrización Topográfica (TOPAZ) que extrae esta información a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE). Al analizar las estimaciones de erosión en cuencas pequeñas, estudios previos han demostrado que estos se ven afectados por las características de las laderas y la distribución de los canales. En cuencas de gran tamaño, los efectos sobre las estimaciones de la erosión no se han probado hasta el momento. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la discretización sobre las estimaciones de erosión utilizando GeoWEPP. Se seleccionaron dos cuencas de gran tamaño, las cuales se discretizaron variando los parámetros del modelo TOPAZ y los MDE. Las redes hidrográficas construidas con TOPAZ se compararon con mapas topográficos usando un método cuantitativo especialmente desarrollado para este propósito. Adicionalmente, se compararon con capas de acumulación de flujo obtenidas usando Arc Hydro Tools. Los resultados mostraron que la discretización afectó las estimaciones de erosión y su distribución espacial, pero no la escorrentía total. En particular, la estimación de la erosión máxima en una ladera fue altamente sensible a los parámetros de TOPAZ y los MDE. Considerando un 10% como una variación aceptable en las estimaciones de erosión total, los resultados mostraron que, dependiendo del MDE, este valor se alcanza con una variación de hasta el 60% en el número de laderas y canales. En consecuencia, en la comparación de estimaciones de GeoWEPP entre distintas cuencas, se recomienda utilizar el mismo MDE y un método cuantitativo para remover la subjetividad al determinar la discretización.

Palabras claves: discretización de cuencas, modelos digitales de elevación, erosión hídrica, sistemas de información geográfica, TOPAZ, GeoWEPP

ABSTRACT

The use of water erosion models coupled with geographic information systems (GIS) has simplified the soil loss analysis at the watershed scale. Models such as the Geospatial interface for the Water Erosion Prediction Project model (GeoWEPP) provides a convenient temporal and spatially distributed soil loss estimate, but requires a discretization in order to identify the watershed hillslopes and channels. In GeoWEPP, the Topographic Parameterization TOPAZ model is used as an automated procedure that extracts hillslopes and channels from a Digital Elevation Model (DEM). When testing the soil loss estimates in small watersheds, previous studies have shown that they are affected by the hillslopes size and channels distribution. In large watersheds, the effects on the soil loss estimates have not been tested so far. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of the watershed discretization on the soil loss estimates by using GeoWEPP. Two large watersheds were selected and discretized varying the TOPAZ parameters and the DEM. The drainage networks built with TOPAZ were compared to topographic maps using a quantitative method specially developed for this purpose. In addition to these maps, TOPAZ networks were also compared with a flow accumulation layer obtained with Arc Hydro Tools. The results showed that the discretization affected soil loss estimates and their spatial distribution, but not total runoff. Particularly, the maximum hillslope sediment yields were highly sensitive to the TOPAZ parameters and DEM. Using 10% as an acceptable variation in the soil loss estimates, the results showed that, depending on the DEM, this value is reached with a variation of up to 60% in the number of hillslopes and channels. In consequence, if the purpose is comparing GeoWEPP estimates among different watersheds, we recommend the use of the same DEM, and a quantitative method to remove subjectivity when determining the discretization.

Keywords: watershed discretization, digital elevation model, water erosion, geographic information systems, TOPAZ, GeoWEPP

1. INTRODUCCIÓN

El suelo cumple un rol fundamental en el ecosistema y es un elemento clave para el sustento de la vida en el planeta (Yang et al., 2003). Cuando el suelo pierde algunas de sus propiedades esenciales para el crecimiento de los vegetales tales como la capacidad para almacenar agua y nutrientes, materia orgánica y microorganismos, se dice que el suelo ha experimentado un nivel de degradación (CIREN, 2010).

La degradación del suelo es un proceso biofísico regido por factores naturales como el tipo de suelo, el clima y la vegetación, pero también puede verse afectado por factores antropogénicos relacionados con el uso y manejo (Lal, 2001). La erosión, en sus diversos tipos, es una de las principales causas de la degradación del suelo (Lal, 2001; Oldeman, 1992). Propiedades tales como la textura, estructura, contenido de materia orgánica, retención de humedad y capacidad de intercambio catiónico influyen la susceptibilidad del suelo a la erosión o erodabilidad (Lal, 2001; Pimentel et al., 1995). Pero, por tratarse de una propiedad dinámica, la erodabilidad también se ve influenciada por el uso de suelo, factores climáticos y características topográficas (Lal, 2001).

Las actividades humanas han intensificado los procesos de erosión, los que a su vez provocan la disminución de la productividad del suelo, aumentan la contaminación de los cuerpos de agua debido al arrastre de sedimentos y la emisión de gases que aportan al efecto invernadero (Lal, 2001; Yang et al., 2003). Un estudio realizado por Pimentel et al. (1995) determinó que en 40 años se había perdido cerca de un tercio de la superficie cultivable del planeta debido a la erosión tanto hídrica como eólica, con una tasa de pérdida de más de 100 mil km² al año. Estudios más recientes han estimado que el 60% de la erosión hídrica actual fue inducida por actividades humanas principalmente relacionadas con la agricultura (Yang et al., 2003).

El tipo de erosión más común a nivel mundial es la erosión hídrica, y es la causa principal del 50% de las superficies degradadas del planeta (Oldeman, 1992). La erosión hídrica es un proceso natural que está regido por la precipitación y principalmente por la intensidad de la misma (Nearing et al., 2005). Las actividades

humanas han intensificado este proceso a través de la alteración de la cobertura y la estructura del suelo por el aumento de superficie de cultivos para satisfacer la alta demanda de alimentación de la población mundial (Pimentel et al., 1995; Yang et al., 2003). Lo anterior disminuye la capacidad que tiene la vegetación de disipar la energía suministrada por los agentes erosivos y proteger el suelo de la erosión (Lal, 2001).

Las regiones más afectadas por la erosión hídrica son el sur de Asia, África subsahariana, Centroamérica, el Caribe y la región andina de Suramérica (Oldeman, 1992). La degradación de suelos en Chile está explicada en gran medida por la erosión. La superficie de suelos erosionados es de 368.000 km² (CIREN, 2010) lo que representa aproximadamente un 50% de la superficie del territorio nacional. La superficie de suelos sin limitaciones en Chile es de 7.000 km² y el resto presenta limitaciones debido a la profundidad, pedregosidad, topografía, desertificación y salinidad, entre otros (Universidad de Chile, 2010).

Adicionalmente, las proyecciones sobre la erosión para el próximo siglo indican que el cambio climático puede aumentar la ocurrencia de precipitaciones más intensas. Esto impactaría de manera importante el problema de la erosión, incluso en mayor medida que los cambios de uso de suelo (Nearing et al., 2005; Yang et al., 2003). Se espera que en promedio la erosión hídrica aumente a nivel mundial en un 9% como consecuencia del cambio climático y 5% debido a los cambios en el uso de suelo (Yang et al., 2003). Las regiones que enfrentarían mayores problemas de erosión son Suramérica y África debido a que la tendencia al aumento de la población y de precipitación es más marcada (Yang et al., 2003).

Debido a lo anterior, se necesita tomar medidas de mitigación para reducir el impacto de la erosión hídrica. La implementación de dichas estrategias de control tendrá beneficios tanto económicos como ambientales. Algunos ejemplos de estas mejoras serían el incremento en la productividad de los suelos y la posibilidad de secuestrar carbono en la vegetación y el suelo mismo (Lal, 2001; Pimentel et al., 1995). Para identificar las estrategias de manejo, es fundamental desarrollar una base de datos confiable sobre el nivel de erosión hídrica en la condición actual (Lal, 2001). En este

propósito es crucial el uso de los modelos de erosión y de técnicas modernas de manejo de información espacial como los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los modelos de erosión han sido desarrollados con el objetivo de comprender los procesos de erosión e implementar herramientas de evaluación, con propósitos académicos, de gestión y legislativos (Renschler & Harbor, 2002). Estos modelos varían en su formulación, desde modelos empíricos simples, basados en observaciones y relaciones estadísticas, hasta modelos complejos de base física (Croke & Nethery, 2006).

En general, los modelos empíricos no son capaces de describir ni simular el proceso de erosión como un conjunto de fenómenos físicos (Amore et al., 2004). En contraste los modelos de base física, son mejores en términos de su capacidad de evaluar la variabilidad espacial y temporal del proceso de erosión. Además tienen un mayor rango de aplicabilidad (Amore et al., 2004). Pese a sus limitaciones, los modelos empíricos siguen siendo utilizados debido a que su estructura es simple y son de fácil aplicación (Amore et al., 2004). Dos de los principales ejemplos son la versión revisada de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE, Renard et al., 1997) y su predecesor USLE (Wischmeier & Smith, 1965) los cuales han sido ampliamente utilizados en todo el mundo.

RUSLE fue diseñado para estimar la tasa promedio anual de erosión de largo plazo. Una de las principales limitaciones de RUSLE es que no permite estimar el transporte de sedimentos en los canales, por lo que su aplicación se limita a áreas pequeñas (Nearing et al., 2005). Además presenta la limitación de que no considera procesos de sedimentación en su formulación (Yang et al., 2003).

Varios modelos de erosión de base física han sido desarrollados, entre ellos el modelo de erosión y escorrentía cinemática (KINEROS, Woolhiser et al., 1990), el modelo para estimación de compuestos químicos, escorrentía y erosión de sistemas agrícolas (CREAMS, Knisel, 1980), el simulador de respuesta ambiental de cuencas y contaminación difusa (ANSWERS, Beasley et al., 1980) y el proyecto de predicción de erosión hídrica (WEPP, Nearing et al., 1989). En particular en modelo WEPP,

desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, es un modelo de base física que permite estimar la erosión a través de una simulación continua (Flanagan & Livingstone, 1995; Nearing et al., 1989). Además recientemente ha sido implementado en una plataforma SIG que facilita su aplicación a escala de cuenca hidrográfica (Renschler, 2003).

1.1. Empleo de herramientas SIG para modelar erosión hídrica

Los modelos de erosión usualmente manejan un gran número de parámetros y datos espacialmente distribuidos, los que al ser geo-referenciados, se pueden acoplar a los SIG para un manejo más simple y rápido de los datos de entrada y salida (Amore et al., 2004). Al combinar los SIG con modelos de predicción de erosión es posible tomar decisiones de manejo de cuencas hidrográficas apoyándose en la capacidad de análisis espacial que estos sistemas tienen. Usando esta aproximación, la información necesaria para llevar a cabo la simulación está contenida en capas de información geo-referenciadas, sobre tipo y uso del suelo, topografía, vegetación, etc. Un ejemplo de esto es la implementación del modelo WEPP en una plataforma SIG, llamada GeoWEPP, la cual combina los procesos físicos del modelo de erosión y las capacidades de distribución espacial de los SIG (Minkowski & Renschler, 2008; Renschler, 2003).

1.1.1. El modelo de erosión hídrica WEPP

El modelo WEPP ha sido utilizado y validado en varios países alrededor del mundo. El modelo utiliza la ecuación de continuidad de sedimentos en estado estacionario, para simular la erosión que ocurre en los regueros y entre-regueros, proporcionando información sobre la descarga de sedimentos como valor total y distribuido según el tamaño de partícula (Croke & Nethery, 2006; Flanagan & Nearing, 2000; Nearing et al., 1989). Por ser un modelo de base física, un gran número de parámetros deben ser ingresados al modelo para llevar a cabo una simulación. Una serie de parámetros de entrada sobre clima, suelo, topografía y vegetación son utilizados por los distintos módulos que componen WEPP para calcular la infiltración, escorrentía, crecimiento de plantas, acumulación de residuos y su descomposición (Miller et al., 2011). El

modelo climático CLIGEN (Nicks et al., 1995) incorporado en WEPP, se emplea para generar series de variables climáticas tales como precipitación, temperaturas y radiación solar, entre otros.

El componente de erosión del modelo utiliza una ecuación de continuidad de sedimentos en estado estacionario para calcular la pérdida de suelo y sedimentación:

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (1.1)$$

donde G ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) es la descarga de sedimentos, x (m) es la distancia ladera abajo, D_f es la tasa de erosión en regueros y D_i es la descarga de sedimentos que ocurre en los sectores entre regueros (Nearing et al., 1989). La tasa de erosión en regueros (D_f) es positiva cuando ocurre pérdida de suelo y negativa cuando se produce sedimentación.

En la Ec. 1.1, la pérdida de suelo en regueros ocurre cuando el esfuerzo de corte del fluido es mayor que el esfuerzo crítico del suelo, mientras que la sedimentación ocurre cuando la descarga de sedimentos es mayor que la capacidad de transporte de sedimentos en el fluido, tal como se ejemplifica en la Fig. 1-1 (Flanagan & Nearing, 2000; Nearing et al., 1989). La descarga de sedimentos que ocurre en los sectores entre regueros (D_i) depende de la intensidad de la precipitación y otros factores que consideran la cobertura de suelo y de la canopia. Para realizar los cálculos el modelo divide la ladera en 100 nodos equidistantes y determina la descarga de sedimentos en cada uno considerando los sedimentos provenientes del nodo anterior.

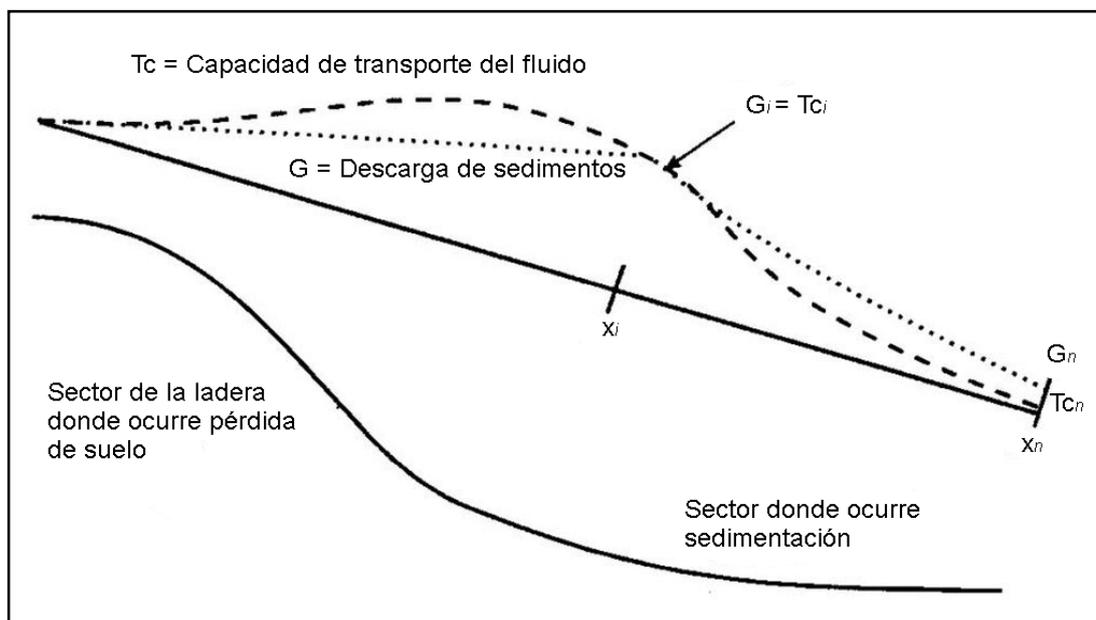


Figura 1-1: Representación de una ladera con cambio de pendiente en el modelo WEPP. En la figura, la sedimentación ocurre luego de que la descarga de sedimentos (línea punteada) excede la capacidad de transporte del fluido (línea segmentada). Fuente: Adaptado de Flanagan & Nearing (2000).

El modelo WEPP puede ser aplicado a escala de ladera o de cuenca (Ascough et al., 1997). La cuenca es representada a través de múltiples laderas (rectangulares), canales y embalses (Amore et al., 2004). La reciente implementación de WEPP en una plataforma SIG (GeoWEPP) ha facilitado sus aplicaciones a una amplia gama de escalas espaciales y temporales. Sin embargo, las rutinas de canales de WEPP no simulan el transporte de sedimentos a través de canales perennes, por lo que no es posible determinar la descarga de sedimentos en la salida de la cuenca si su superficie es mayor a $2,6 \text{ km}^2$ debido a que se comienzan a formar canales perennes (Ascough et al., 1997; Flanagan & Livingstone, 1995). Sin embargo, varios investigadores están trabajando para integrar WEPP con modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos (Conroy et al., 2006; Papanicolaou et al., 2010), para así poder estimar de manera más realista la descarga de sedimentos en la salida de cuencas de mayor tamaño. Para lograr esto, las estimaciones de la descarga de sedimentos y escorrentía generadas en las laderas que va hacia los canales son clave,

ya que estos resultados pasan a ser los datos de entrada para los modelos de transporte de sedimentos.

1.1.2. La interfaz geo-espacial del modelo WEPP

El modelo GeoWEPP es capaz de extraer los parámetros necesarios para la simulación en WEPP usando capas de información con datos de elevaciones, suelo y cobertura. Además, a diferencia del enfoque tradicional donde la cuenca se divide en celdas de igual tamaño, este modelo trabaja sobre una combinación de laderas y canales de dimensiones variables, todo ello en respuesta a la topografía local, gracias a la incorporación del modelo para delineación automatizada de cuencas TOPAZ. Para su funcionamiento TOPAZ requiere el MDE y los autores de GeoWEPP recomiendan que se use una referencia de la red hidrográfica de la zona de estudio, por ejemplo una carta topográfica (Minkowski & Renschler, 2008). El diagrama de la Figura 1-2 muestra el funcionamiento de GeoWEPP.

La precisión del modelo WEPP ha sido evaluada en varios estudios con mediciones de erosión, escorrentía y descarga de sedimentos en cultivos (Laflen et al., 2004; Pieri et al., 2007), bosques (Dun et al., 2009; Elliot & Robichaud, 2001; Elliot & Hall, 1999; Laflen et al., 2004), en cuencas pequeñas (Abaci & Papanicolaou, 2009; Laflen et al., 2004; Liu et al., 1997; Pandey et al., 2009) y en cuencas de diversos tamaños usando GeoWEPP (Cochrane & Flanagan, 2005; Ebrahimpour et al., 2011; Miller et al., 2011; Renschler & Harbor, 2002; Yu et al., 2009; Zhang et al., 2009). La mayoría de estos estudios concluyen que el modelo se comporta adecuadamente, que es muy sensible a los parámetros de entrada y que al calibrar previamente el modelo para las zonas de estudio las estimaciones mejoran notablemente.

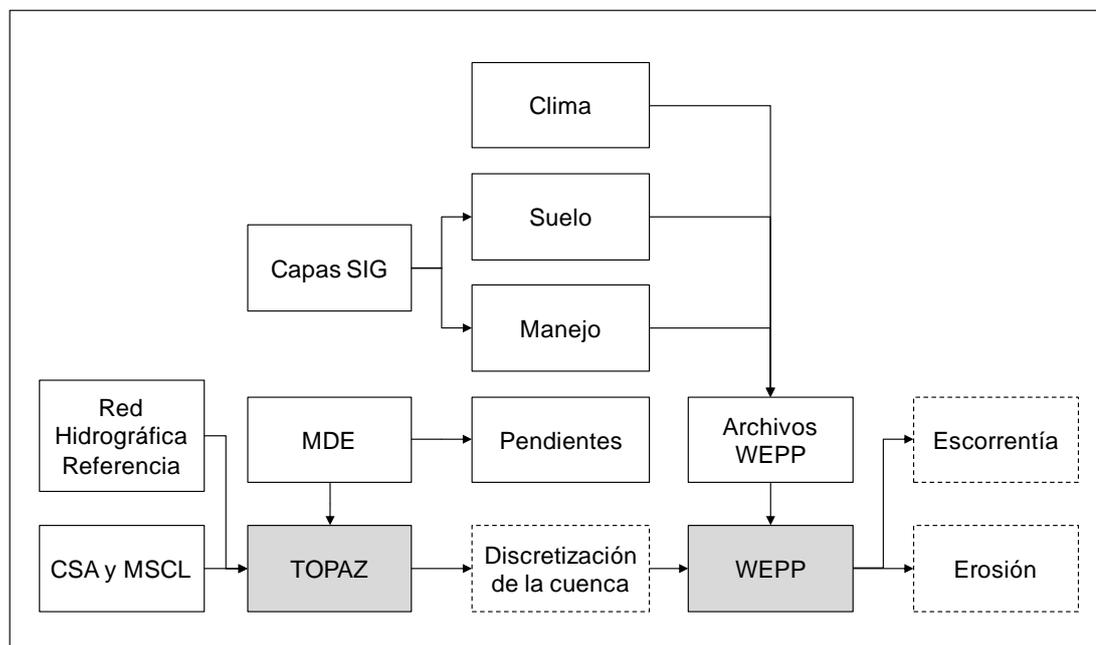


Figura 1-2: Diagrama de funcionamiento del modelo GeoWEPP. Los datos sobre pendientes, tipo y uso de suelo son extraídos de capas de información y enlazados con archivos de parámetros de WEPP junto a los datos climáticos. La discretización de la cuenca es determinada con el modelo TOPAZ. Fuente: Elaboración propia.

1.2. Discretización de cuencas

La discretización es el proceso de identificación de los canales y laderas que conforman una cuenca (Baffaut et al., 1997). El perfil de laderas y la dirección de flujo en ellas varía de acuerdo a los canales que se representa (Baffaut et al., 1997). Estudios a escala de cuenca usando modelos de erosión han demostrado que la discretización tiene efecto en los resultados de escorrentía y descarga de sedimentos (Baffaut et al., 1997; Miller et al., 2011; Zhang et al., 2009). Estos estudios se llevaron a cabo en cuencas pequeñas ($<10 \text{ km}^2$), por lo que no es posible asegurar si estas conclusiones son extrapolables a cuencas de mayor tamaño. El estudio de Amore et al. (2004), llevado a cabo en cuencas de más de 100 km^2 , sugiere que una subdivisión más fina de la cuenca, aunque representa mejor la realidad, no necesariamente produce estimaciones más reales de la erosión.

Al simular cuencas de mayor tamaño es conveniente el empleo de los SIG, pues facilitan su discretización mediante diversos procedimientos automatizados para la extracción las de laderas y canales a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Estos procedimientos están disponibles en varios modelos para delinear cuencas como Análisis de Terreno usando Modelos Digitales de Elevación (TAUDEM, Tarboton, 1997), Programa de Análisis de Terreno para las Ciencias Ambientales Versión de Grilla (TAPES-G, Gallant & Wilson, 1996) y el modelo de Parametrización Topográfica (TOPAZ, Garbrecht & Martz, 1999). La plataforma SIG ArcGIS (ESRI, Redlands) también ofrece herramientas para la discretización automatizada de cuencas, a través de su programa complementario Arc Hydro Tools. En particular el modelo TOPAZ ha sido incorporado en la interfaz GeoWEPP.

Los MDE permiten caracterizar el relieve de una zona para distintas aplicaciones tales como los modelos de erosión. La exactitud y resolución del MDE puede afectar las predicciones de los modelos de erosión implementados en SIG. Estudios llevados a cabo en cuencas pequeñas han demostrado que la resolución del MDE y su precisión afecta la longitud de las laderas y sus pendientes, y en consecuencia la configuración de la red hidrográfica varía (Cochrane & Flanagan, 2005; Miller et al., 2011; Renschler & Harbor, 2002; Zhang et al., 2009). Sin embargo, se requieren estudios adicionales para determinar el efecto del MDE sobre las predicciones de los modelos de erosión en cuencas de gran tamaño, especialmente porque a esta escala los MDE con resoluciones finas son costosos o de difícil acceso.

1.2.1. El modelo TOPAZ

GeoWEPP utiliza el modelo TOPAZ para discretizar la cuenca automáticamente en base a un MDE. Además del MDE de la cuenca, TOPAZ requiere que el usuario ingrese las coordenadas de salida de la cuenca y dos parámetros: El Área Crítica de Fuente y la Longitud Mínima del Canal en la Fuente (CSA y MSCL, por sus siglas en inglés respectivamente). Estos parámetros controlan la topología y propiedades de la red hidrográfica y su correspondiente perfil de laderas generados por TOPAZ y se deben ajustar manualmente hasta conseguir en el modelo una red hidrográfica similar

a la existente en la zona de estudio (Garbrecht & Martz, 1999; Renschler, 2003). En particular, el CSA es un umbral que controla la generación de canales en base a un área mínima de acumulación de flujo. Mientras que el MSCL controla la aparición de los canales de primer orden, fijando para ello una longitud mínima.

El usuario puede estimar los parámetros CSA y MSCL a partir de mapas o estudios de campo, o seleccionar su valor para ajustarse a la escala y resolución de una aplicación en particular (Miller et al., 2011). En este proceso, típicamente los estudios de erosión utilizan cartas topográficas o alguna otra referencia de la red hidrográfica (Ebrahimpour et al., 2011; Zhang et al., 2009) ya que esto es lo que recomiendan los autores de GeoWEPP (Minkowski & Renschler, 2008). Sin embargo, no está claro cuál es la magnitud del error que se puede cometer en la estimación de la erosión, al ajustar la red de forma visual sin utilizar métodos de base física como el de las curvas pendiente-área, entre otros (Ijjasz-Vasquez & Bras, 1995; Tarboton et al., 1991).

Los datos del MDE son procesados en TOPAZ por un sistema de programas computacionales interdependientes basados en el método D8 (Fairfield & Leymarie, 1991; O'Callaghan & Mark, 1984) complementado con el concepto de direccionamiento de flujo cuesta abajo (Morris & Heerdegen, 1988) y el concepto de área crítica de fuente (Martz & Garbrecht, 1992). El concepto de área crítica de fuente selecciona los canales que pasan a formar la red de drenaje, como aquellas celdas de la capa raster que tienen un área de drenaje aguas arriba superior a un área definida como umbral, llamada el área crítica de fuente (CSA, por sus siglas en inglés). El método del D8 determina la dirección y acumulación de flujo para cada una de las celdas de la capa raster de elevaciones a través de la evaluación de dicha celda y sus ocho celdas adyacentes.

TOPAZ es versátil ya que puede ser acoplado con varios modelos, por lo cual sus aplicaciones son variadas. Los modelos hidrológicos que incorporan TOPAZ han sido desarrollados para investigar una amplia gama de temas relacionados con la hidrología (Lacroix et al., 2002; Shaw et al., 2005). TOPAZ también ha sido implementado con modelos para predicción de erosión para determinar opciones

sustentables de manejo y uso del suelo (Cochrane & Flanagan, 2005; Conroy et al., 2006; Ebrahimpour et al., 2011; Miller et al., 2011; Renschler & Harbor, 2002; Zhang et al., 2009). La mayoría de estos estudios concluyeron que el uso de TOPAZ reduce el costo y el tiempo requerido para discretizar una cuenca, mientras que los valores estimados en los modelos utilizados fueron similares a los valores observados.

El usuario debe estar consciente de los supuestos y limitaciones de TOPAZ que mencionan Garbrecht & Martz (1999). Por ejemplo, TOPAZ no es capaz de generar directamente propiedades de drenaje asociadas a cuerpos de agua tales como lagos. Por su parte Toma et al. (2001) no recomiendan la aplicación de TOPAZ en superficies sobre los 100 km² por su limitación para procesar grandes cantidades de datos.

1.2.2. El programa Arc Hydro Tools

ArcHydro es un programa complementario para ArcGIS que contiene herramientas para facilitar el análisis de recursos hídricos. En particular las herramientas *Fill*, *Flow Direction*, *Flow Accumulation* y *Con* permiten identificar la red hidrográfica de una cuenca a partir de su MDE. Estas herramientas están basadas en el concepto de área crítica de fuente y en el método D8 al igual que TOPAZ, pero en este caso el único umbral definido por el usuario es el CSA, y no está claro cuál es su equivalencia en la combinación CSA y MSCL de TOPAZ.

La herramienta *Fill* (Tarboton et al., 1991) se usa para corregir las imperfecciones existentes en la superficie del MDE. Con la herramienta *Flow Direction* (Jenson & Domingue, 1988) se genera, en base al MDE corregido, una capa raster donde define la dirección de flujo en cada celda. Para determinar la dirección de flujo esta herramienta hace el cálculo de la pendiente en términos porcentuales como el cambio en la elevación sobre la distancia entre las celdas, luego asigna la dirección hacia donde se presente el descenso con la mayor pendiente. Si la pendiente de descenso es similar para todas las celdas adyacentes, entonces se amplía el rango de búsqueda hasta conseguir una pendiente más pronunciada. Luego se utiliza la herramienta

Flow Accumulation (Jenson & Domingue, 1988), basada en el método D8 (O'Callaghan & Mark, 1984), el MDE corregido y la capa de dirección de flujo para generar una capa raster con la acumulación de flujo en cada celda. En términos simples, esto es el número de celdas aguas arriba que vierte sobre cada una de las celdas inmediatamente aguas debajo de ella. Finalmente, a través de la herramienta *Con* se clasifican las celdas con acumulación de flujo superior a un umbral especificado (CSA), como celdas pertenecientes a la red hidrográfica. Este umbral debe ser calculado de acuerdo a la escala de trabajo, ya que representa el lugar donde un canal permanente comienza. Se debe seleccionar cuidadosamente, considerando además de la topografía, otras características de la zona como el clima y las propiedades del suelo (Tarboton et al., 1991).

Las herramientas de Arc Hydro Tools han sido utilizadas en varios estudios para determinar la red hidrográfica y la delimitación de cuencas de diversos tamaños, y su aplicación ha sido eficaz siempre y cuando se utilice un MDE de buena calidad (Ebrahimpour et al., 2011; Ganapuram et al., 2009; López-Vicente et al., 2009).

1.3. Objetivos y estructura del documento

Hasta el momento se ha hecho una revisión sobre el contexto global de la erosión hídrica, incluyendo los modelos comúnmente utilizados para predecir la pérdida de suelo, con especial énfasis en el modelo WEPP. También se han mencionado los desafíos para simular los procesos de erosión a escala de cuenca hidrográfica y como las plataformas SIG han contribuido de manera importante. Se describió el modelo TOPAZ que permite discretizar automáticamente la cuenca en base a un MDE y como se ha incorporado en la interfaz SIG de WEPP denominada GeoWEPP. También se mencionaron los problemas y necesidades hallados, que justifican la realización de este estudio. Esto da paso a definir los objetivos de esta tesis a continuación.

El objetivo general de este estudio es cuantificar el efecto de la discretización sobre las estimaciones de la erosión hídrica en cuencas de gran tamaño (~100 km²). Para ello se definen los siguientes objetivos específicos: (1) Evaluar el efecto de la

variación en la discretización sobre las estimaciones de largo plazo de erosión y escorrentía del modelo GeoWEPP. (2) Determinar si la fuente y resolución del MDE tienen efecto sobre la magnitud y distribución espacial de dichas estimaciones. (3) Desarrollar una metodología simple para determinar la discretización más apropiada basándose en una comparación cuantitativa con cartas topográficas.

En el capítulo subsiguiente se realiza una descripción de los materiales empleados y los métodos utilizados para llevar a cabo los objetivos. Este capítulo se inicia con una descripción del área de estudio, los MDE seleccionados y una explicación de cómo se varió la discretización en las cuencas. También se muestran las redes hidrográficas obtenidas usando Arc Hydro Tools, que fueron comparadas con las redes obtenidas con TOPAZ para determinar la equivalencia de sus umbrales. En este capítulo también se explica en detalle una metodología simple especialmente desarrollada para comparar cuantitativamente las redes hidrográficas generadas por el modelo con las cartas topográficas y redes de Arc Hydro Tools. Finalmente, se mencionan las características de la implementación del modelo de erosión usado en el estudio.

En el tercer capítulo se muestran y analizan los resultados de la estimación de pérdida de suelo. Se discuten los efectos de la discretización y la fuente y resolución del MDE sobre la descarga de sedimentos y la escorrentía. En el quinto y último capítulo se presentan las conclusiones de esta tesis y se plantean una serie de recomendaciones para futuros trabajos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describen las cuencas seleccionadas para el estudio en términos de su topografía, clima, tipo y uso de suelo. Además se explica cómo se llevó a cabo la representación de estas cuencas en el modelo de erosión, incluyendo la información topográfica tomada de los MDE, la forma en que se varió la discretización y las redes hidrográficas que se usaron como referencia. Finalmente, se desarrolla y propone un método simple para comparar cuantitativamente las redes hidrográficas con cartas topográficas.

2.1. Descripción del área de estudio

Este estudio fue realizado en dos cuencas ubicadas en la cuenca del río Serrano, en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena. La cuenca del río Serrano tiene una superficie de 6.673 km², y se ubica entre los paralelos 50°33' S al 51°32' S y entre los meridianos 72°10' W al 73°34' W. La mitad del área de la cuenca (51%) forma parte de los Parques Nacionales Torres del Paine y Bernardo O'Higgins (CADE-IDEPE, 2004).

Ambas cuencas, llamadas Tres Pasos y Rincón, están localizadas en los extremos sureste y sur de la cuenca del río Serrano respectivamente (Fig. 2-1). Estas cuencas fueron seleccionadas por poseer características similares en cuanto a superficie (70 km² y 73 km² respectivamente) y condiciones climáticas. Adicionalmente, ambas cuencas presentan una forma similar, esto se demostró a través del cálculo del índice de Gravelius que representa la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo que contenga la misma área de la cuenca. Este índice es de alrededor de 1,5 para ambas cuencas. Finalmente, a través de la determinación de las curvas hipsográficas, se observó que el área de drenaje varía con respecto a la altura de forma similar en ambas cuencas. En el Anexo A se muestran las características geomorfológicas de Tres Pasos y Rincón.

La cuenca Tres Pasos está ubicada entre los paralelos 51°20' S al 51°24' S y entre los meridianos 72°30' W al 72°42' W. Las cubiertas de suelo predominantes son Estepa

Patagónica (42% de la superficie) y Bosque Nativo del tipo Lengua (*Nothofagus pumilio* (Poepp&Endl.) Krasser) (30% de la superficie) de acuerdo al Catastro de Bosque Nativo del Proyecto CONAF-CONAMA-BIRF (Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, & Universidad Católica de Temuco, 1999). Las condiciones climáticas pueden ser descritas de acuerdo a la estación meteorológica más cercana que es Cerro Castillo dependiente de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas de Chile. Los registros de los últimos 30 años muestran una precipitación promedio anual de 331 mm, distribuidas uniformemente a lo largo del año; y un promedio anual de temperaturas de 7 °C que van desde un mínimo promedio de 3 °C a un máximo promedio de 11 °C. El suelo en la cuenca Tres Pasos se clasifica como Luvic Phaeozems de acuerdo a la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo y tiene una textura limo-arcillosa (IUSS grupo de trabajo WRB, 2007).

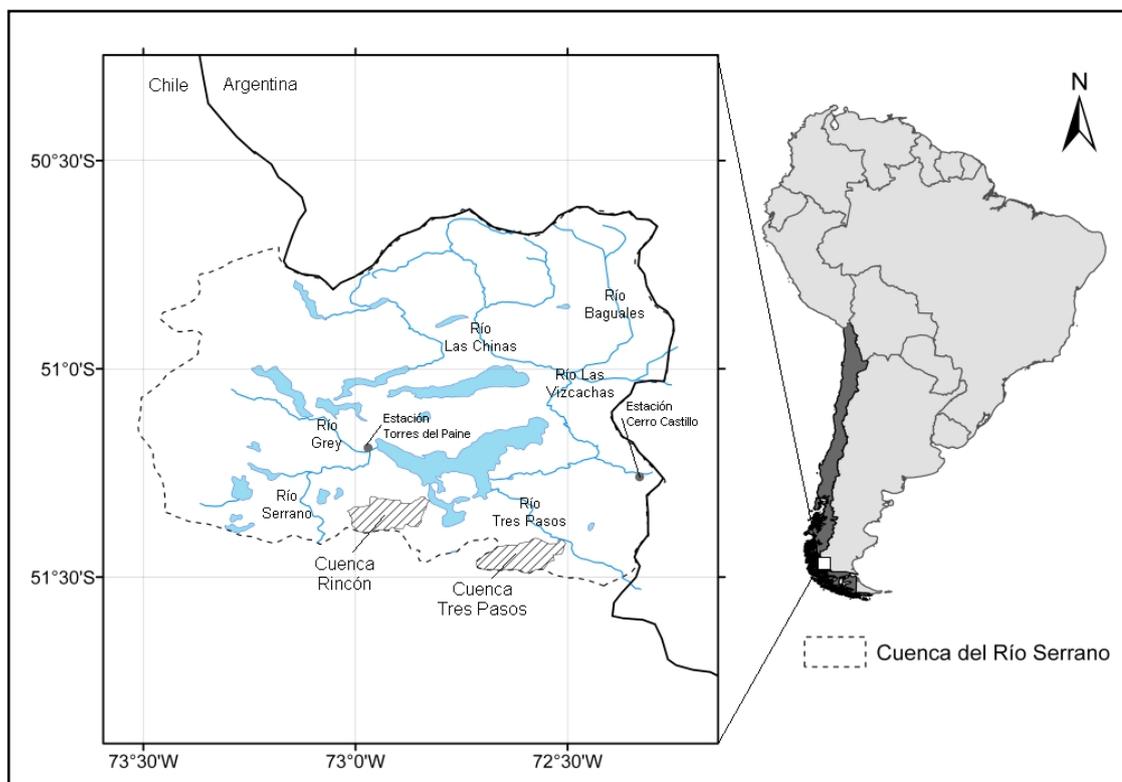


Figura 2-1: Ubicación de las cuencas Tres Pasos y Rincón. Ambas cuencas poseen superficies y condiciones climáticas similares. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la cuenca Rincón está entre los paralelos 51°18' S al 51°24' S y entre los meridianos 72°00' W al 72°50' W. Las cubiertas de suelo predominantes son áreas sobre el límite de vegetación (49% de la superficie) y Bosque Nativo Adulto del tipo Lengua (20% de la superficie) de acuerdo al Catastro de Bosque Nativo. La estación meteorológica más cercana es Torres del Paine, dependiente de la Dirección General de Aguas, DGA. Los registros de los últimos treinta años en esta estación muestran una precipitación promedio anual de 729 mm distribuidas uniformemente en el año; y un promedio anual de temperaturas de 8 °C que van desde un mínimo promedio de 3 °C a un máximo promedio de 12 °C. El suelo en la cuenca Rincón se clasifica como Distric Cambisols con una textura limo-arcillosa según la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (2007).

Con el objetivo de reducir la variabilidad de los parámetros de entrada, y focalizar la atención en el efecto de la discretización sobre las estimaciones de erosión y escorrentía, en este estudio el tipo de suelo, uso de suelo y variables meteorológicas de las cuencas Rincón y Tres Pasos se representaron en el modelo de manera uniforme e idéntica para ambas. Las características seleccionadas, que serán mencionadas en la sección de implementación del modelo WEPP, estuvieron basadas en condiciones representativas de la cuenca del río Serrano. Cabe acotar que al fijar los parámetros CSA y MSCL, en cierta forma, se plasman las características locales de la cuenca y su influencia en la red de drenaje.

2.2. Modelos Digitales de Elevación

Los MDE utilizados en este estudio provienen de dos fuentes: a) Misión de topografía por radar del transbordador espacial (SRTM, por sus siglas en inglés) con una resolución de 90 m (Jarvis et al., 2008); b) Radiómetro avanzado aerotransportado de emisión y reflexión termal (ASTER, por sus siglas en inglés) con una resolución de 30 m (Tachikawa et al., 2011). Ambas capas están georeferenciadas al geoide WGS84/EGM96. La precisión horizontal es de 20 m y 30 m respectivamente. Por su parte la precisión vertical es de 10 m y 20 m respectivamente.

Con el objetivo de determinar el efecto de la resolución del MDE evitando los errores por usar capas de distintas fuentes, se creó un MDE con una resolución de 90 m a partir del MDE ASTER de 30 m disponible, utilizando la herramienta *Aggregate* de ArcGIS 9.2. Los MDE SRTM y ASTER de 90 m de resolución se compararon para cada cuenca. En este proceso se observó que las diferencias entre las elevaciones están espacialmente distribuidas y que el 90% del área de ambas cuencas mostró diferencias menores a 25 m.

En la Figura 2-2 se muestran los mapas de elevaciones, pendientes y exposición de la cuenca Tres Pasos elaborados con cada uno de los MDE seleccionados. El rango de elevaciones en la cuenca Tres Pasos va de 121 a 1324 m; 110 a 1332 m y 116 a 1326 m de acuerdo a los MDE (SRTM 90 m, ASTER 30 m y ASTER 90m respectivamente). Las elevaciones promedio son similares para todos los MDE, alrededor de 680 m. Las pendientes varían de cero a 121%, cero a 204% y de cero a 103% respectivamente. La pendiente promedio fue de 50% (27°) para los MDE de 90 m y de 92% (43°) para el MDE de 30 m.

Por su parte, en la Figura 2-3 se presentan los mapas de elevaciones, pendientes y exposición de la cuenca Rincón. Se observa que en general esta cuenca presenta pendientes más pronunciadas y mayores elevaciones que la cuenca Tres Pasos. El rango de elevaciones en la cuenca Rincón va de 40 a 1544 m, 23 a 1526 m y de 30 a 1545 m de acuerdo a los MDE (SRTM 90 m, ASTER 30 m y ASTER 90 m respectivamente). Al igual que en la cuenca Tres Pasos, las elevaciones promedio son similares en los tres MDE, en este caso alrededor de 761 m. Las pendientes van de cero a 154%, cero a 213% y de cero a 133% respectivamente. La pendiente promedio para los MDE de 90 m es de 63% (32°) y para el MDE de 30 m es de 100% (45°).

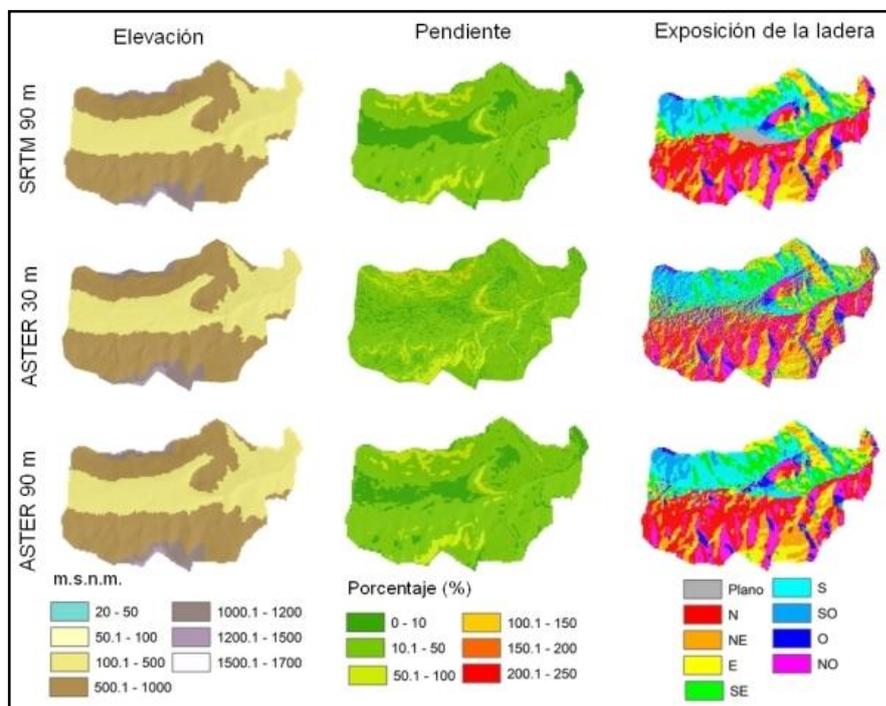


Figura 2- 2: Mapas de elevaciones, pendiente y exposición de la cuenca Tres Pasos para distintos MDE. Fuente: Elaboración propia.

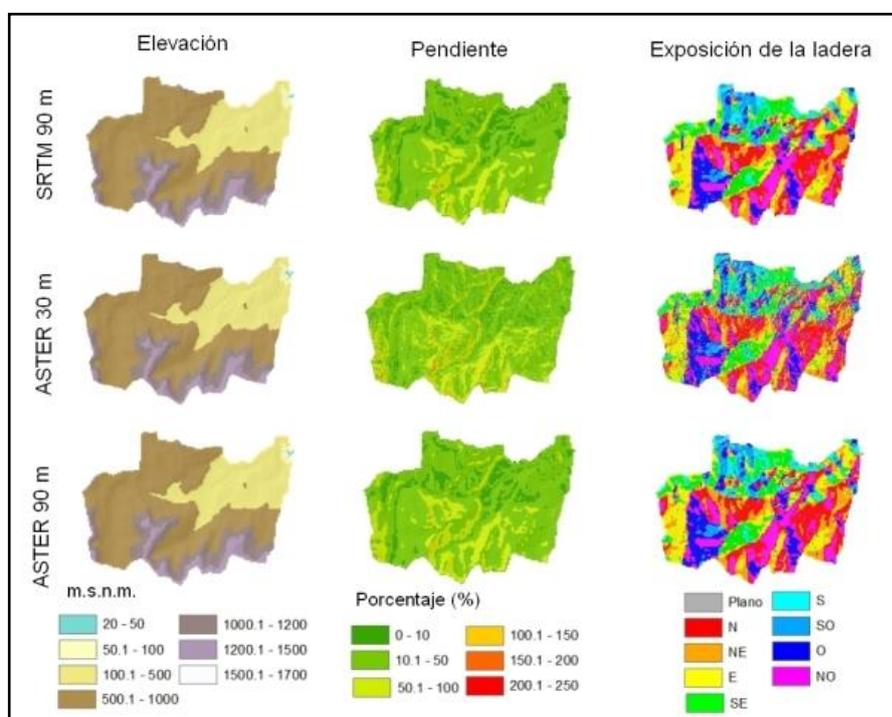


Figura 2-3: Mapas de elevaciones, pendiente y exposición de la cuenca Rincón para distintos MDE. Fuente: Elaboración propia.

2.3. Discretización de las cuencas

Para determinar la discretización de las cuencas se utilizaron como referencia imágenes de redes hidrográficas provenientes de cartas topográficas a escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar de Chile (IGM). Dicha cartografía es construida utilizando equipos para ortorectificación y restituidores, que permiten dibujar elementos como curvas de nivel y cotas, caminos, hidrografía, fisiografía, construcciones a escala, entre otros, a partir de la información de imágenes satelitales, fotografías aéreas y mediciones de terreno. Específicamente, para la cuenca Tres Pasos se utilizó la carta topográfica de código K089, mientras que para la cuenca Rincón se utilizó la K088. Adicionalmente, se utilizó el programa Arc Hydro Tools de ArcGIS 9.2 con los MDE seleccionados para obtener la red hidrográfica de las cuencas Tres Pasos y Rincón, y compararlas con las redes obtenidas con TOPAZ, para determinar la equivalencia entre sus umbrales.

En Arc Hydro Tools se definieron los valores de umbral de la capa de acumulación de flujo realizando una inspección visual de las capas de elevaciones, acumulación y dirección de flujo. Para la cuenca Tres Pasos se utilizó un umbral de 80 celdas (que equivale a 65 ha) para el MDE SRTM 90 m, 200 celdas (que equivale a 18 ha) para el MDE ASTER 30 m y 50 celdas (que equivale a 40 ha) para el MDE ASTER 90 m. Mientras que para la cuenca Rincón se seleccionó un umbral de 50 celdas para los MDE SRTM y ASTER de 90 m, y de 200 celdas para el MDE ASTER de 30 m. Estas redes se compararon con las redes obtenidas con TOPAZ para identificar qué combinación de CSA y MSCL es equivalente al umbral fijado en Arc Hydro Tools.

En la Figura 2-4 se observan las redes hidrográficas de la carta IGM y de Arc Hydro Tools para la cuenca Tres Pasos y en la Figura 2-5 para la cuenca Rincón. En base a las cartas topográficas se determinaron visualmente los valores de CSA y MSCL que se debían ingresar al modelo TOPAZ, para obtener una red hidrográfica similar a la físicamente existente en la zona. Se seleccionaron nueve combinaciones de CSA y MSCL para variar la discretización en ambas cuencas. Para ello tres valores de CSA (5, 10 y 15 ha) se combinaron factorialmente con tres valores de MSCL (1000, 1500 y 2000 m) tal como se muestra en la Figura 2-6. Posteriormente se realizó una

comparación de las redes hidrográficas generadas con TOPAZ con las cartas topográficas y las redes de Arc Hydro Tools, con el objetivo de determinar cuantitativamente su similitud. Esta comparación se realizó aplicando un método desarrollado para este estudio, que será explicado en la siguiente sección. Las redes hidrográficas obtenidas con Arc Hydro Tools también fueron comparadas indirectamente con las cartas topográficas. En la Figura 2-7 se muestra un diagrama explicativo acerca de la forma en que se obtuvieron las redes hidrográficas y las comparaciones que se llevaron a cabo entre ellas.

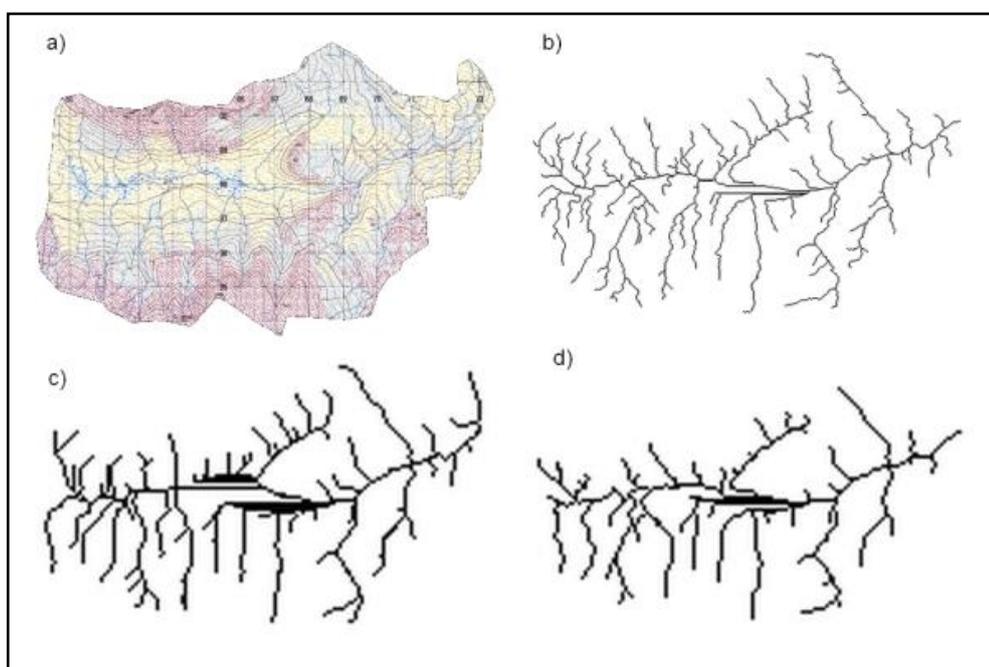


Figura 2-4: Imágenes de redes hidrográficas de la cuenca Tres Pasos provenientes de a) cartas topográficas del IGM en escala 1:50.000, b) aplicación de Arc Hydro Tools usando el MDE ASTER de 30 m con un umbral de 200 celdas, c) MDE SRTM 90 m con un umbral de 80 celdas y d) MDE ASTER 90 m con un umbral de 50 celdas. Fuente: Elaboración propia.

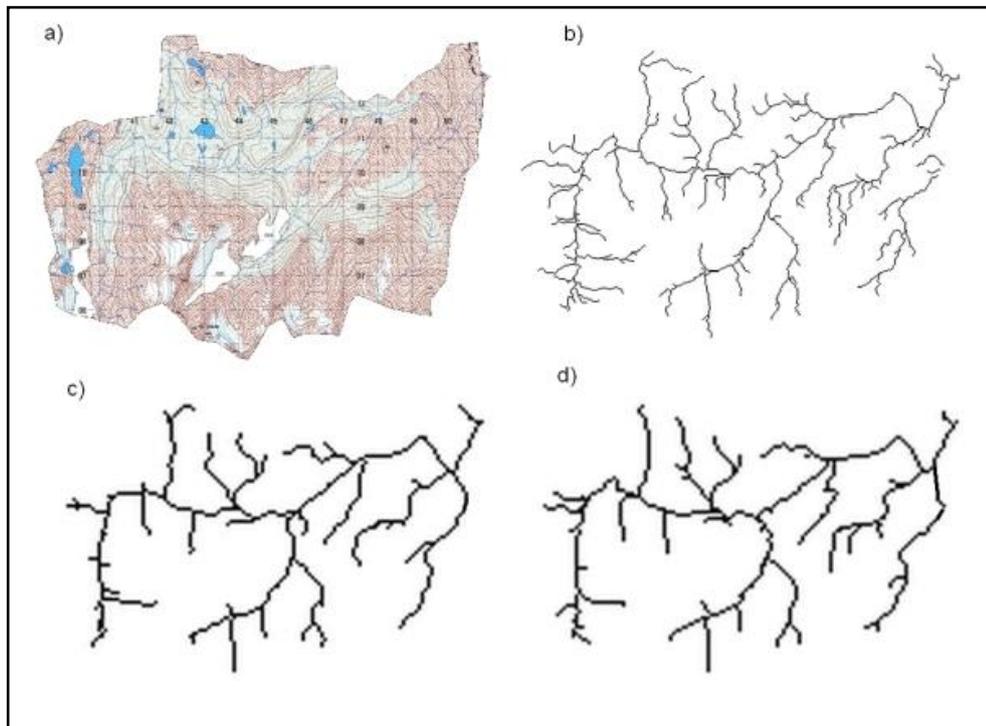


Figura 2-5: Imágenes de redes hidrográficas de la cuenca Rincón provenientes de a) cartas topográficas del IGM en escala 1:50.000, b) aplicación de Arc Hydro Tools usando el MDE ASTER de 30 m con un umbral de 200 celdas, c) MDE SRTM 90 m con un umbral de 50 celdas y d) MDE ASTER 90 m con un umbral de 50 celdas. Fuente: Elaboración propia.

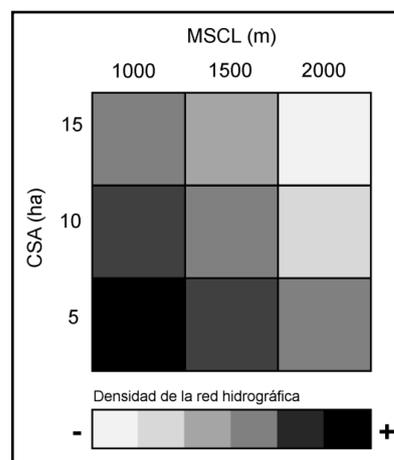


Figura 2-6: Representación visual de la variación de la red hidrográfica de la cuenca para las combinaciones de CSA y MSCL seleccionadas en este estudio. Fuente: Elaboración propia.

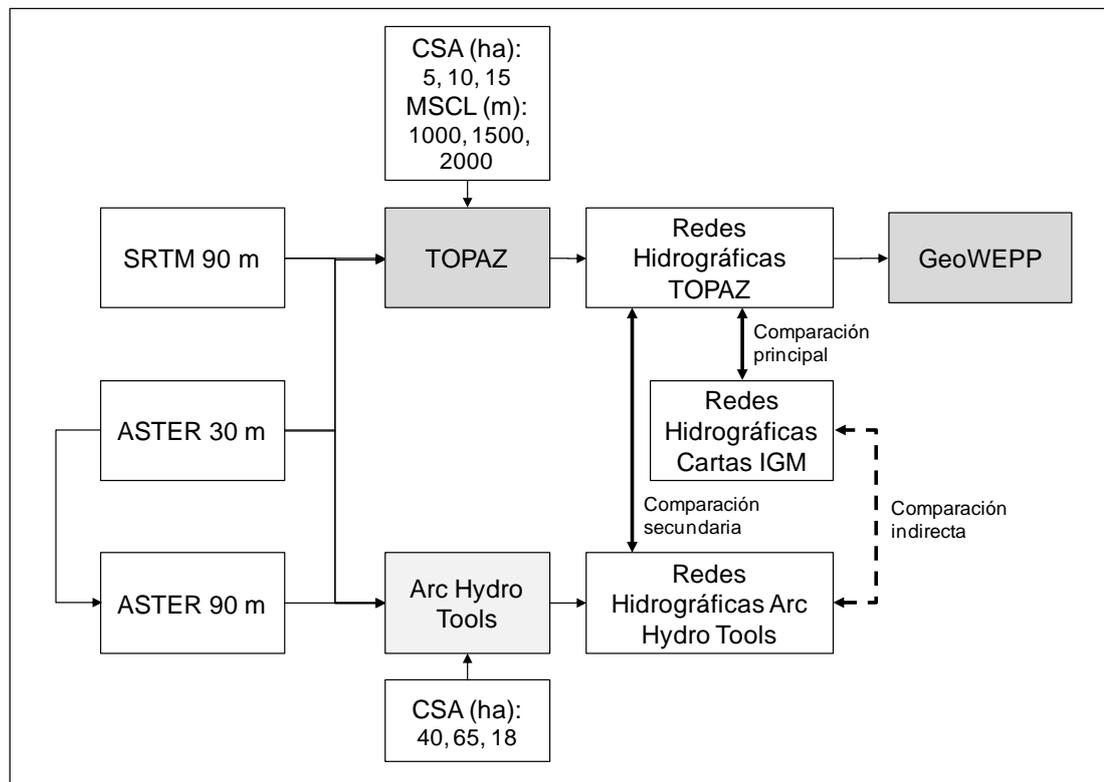


Figura 2-7: Diagrama esquemático sobre la forma en que se obtuvieron las redes hidrográficas utilizadas en este estudio y las comparaciones que se llevaron a cabo entre ellas a través del método cuantitativo aplicado. Fuente: Elaboración propia.

2.4. Comparación cuantitativa de redes hidrográficas

Los autores de GeoWEPP recomiendan seleccionar los parámetros CSA y MSCL comparando visualmente la red hidrográfica obtenida con TOPAZ con una red hidrográfica de una carta topográfica de la zona. Para complementar esta inspección visual se desarrolló en este estudio un nuevo método, basado en comparar el número de píxeles que representan canales en ambas imágenes (de ahora en adelante, la imagen obtenida con TOPAZ y la carta topográfica). Para realizar esto, primero es necesario extraer los canales de la carta topográfica y esto se realizó en un algoritmo en Matlab (MathWorks, Natick EE.UU.). Este algoritmo detecta los canales de la carta topográfica por color, y los convierte en cuadrados con las mismas dimensiones que la red hidrográfica generada por TOPAZ, de esta forma se crea la red hidrográfica de referencia. Se realizan correcciones manuales con un editor de

imágenes a la red hidrográfica de referencia para eliminar aquellos posibles errores en la detección de canales. Los resultados de la aplicación de este algoritmo en las cartas topográficas de las cuencas Tres Pasos y Rincón se representa en el Anexo B. Finalmente los pixeles de ambas imágenes se cuentan con una función en Matlab.

Una vez obtenido el número de pixeles que representan canales, la comparación cuantitativa de ambas imágenes se realizó a través del cálculo de un índice denominado F , el cual corresponde al cociente entre el número de pixeles de la red hidrográfica generada con TOPAZ y la red de la carta topográfica. En términos hidrológicos, este índice representa la relación entre las densidades de drenaje de ambas redes. A través de este índice es posible determinar cuantitativamente las diferencias entre las redes hidrográficas generadas por el modelo y a su vez determinar cuál de ellas se aproxima más a la carta topográfica, pero tiene la limitación de que no considera la ubicación espacial de los canales. La red hidrográfica generada por el modelo que obtenga con el valor de F más cercano a 1 (llamado mejor F) se considera la que representa mejor la realidad por ser más parecida a la referencia. Si el valor de F es menor a 1 indica que la red hidrográfica se está subestimando y si es mayor a 1 indica que se está sobreestimando con respecto a la referencia.

Existen otros índices o coeficientes hechos para cuantificar los parámetros que influyen en el comportamiento hidrológico de una cuenca real, tales como los índices de Horton (Horton, 1945), que podrían complementar el análisis. Pero en esta aplicación en particular se decidió aplicar el índice F ya que apunta a comparar las redes generadas por un modelo con una carta topográfica y por esto es más conveniente en este caso.

Este método para comparación cuantitativa de redes hidrográficas hasta ahora descrito, se aplicó a cada una de las redes generadas con TOPAZ para ambas cuencas, comparando con la carta topográfica del IGM y también con las imágenes de redes hidrográficas obtenidas con Arc Hydro Tools. La comparación con las redes de Arc Hydro Tools se hizo para determinar la equivalencia entre sus umbrales y los de TOPAZ. Para cada MDE de ambas cuencas se determinó la red hidrográfica que

generó el valor de F más cercano a 1 (mejor F) y para poder comparar con las demás redes en términos relativos se calculó el ΔF con la siguiente relación:

$$\Delta F = \left(\frac{F - \text{mejor}F}{\text{mejor}F} \right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

donde ΔF representa la variación porcentual de los F de cada red hidrográfica obtenida con TOPAZ, variando los parámetros CSA y MSCL, con respecto al mejor F obtenido para el mismo MDE. Si $\Delta F > 0$ indica que la densidad de la red se está sobreestimando y $\Delta F < 0$ indica que la red se está subestimando.

Asumiendo que la red hidrográfica con el mejor F , en relación a la carta topográfica, genera los resultados más confiables de erosión, se comparó dicha estimación con los resultados obtenidos para las demás redes calculando el valor $\Delta \text{Sedimentos}$ de la siguiente forma:

$$\Delta \text{Sedimentos} = \left(\frac{\text{Sedimentos} - \text{Sedimentos}_{\text{mejor}F}}{\text{Sedimentos}_{\text{mejor}F}} \right) \cdot 100 \quad (2.2)$$

donde $\Delta \text{Sedimentos}$ representa la diferencia relativa entre las estimaciones de las redes hidrográficas comparadas con la estimación de descarga de sedimentos obtenida para la red con el mejor F . Un análisis similar fue realizado también para el número de laderas y canales, área de la cuenca y escorrentía.

Los resultados obtenidos utilizando la Ec. 2.2, comparando con las cartas topográficas, se graficaron con su correspondiente ΔF para cada MDE y cuenca. Un análisis de los ajustes de regresión lineal (Zar, 2010) fue realizado para evaluar los efectos de la fuente del MDE (SRTM y ASTER) y su resolución (30 m y 90 m) en las estimaciones de GeoWEPP.

Las curvas de regresión se compararon en pares a través de una prueba de t-Student. Si habían diferencias estadísticamente significativas en la pendiente o el intercepto se consideró que había un efecto de la variable probada (fuente y resolución del MDE). El nivel de significancia utilizado en las pruebas estadísticas fue $\alpha=0.05$. Este análisis estadístico se hizo para los tres MDE de ambas cuencas, cada uno con nueve puntos

que representan cada una de las combinaciones de CSA y MSCL utilizadas. Para este análisis se considero sólo la comparación principal de redes hidrográficas, es decir la comparación de las redes obtenidas con TOPAZ y las cartas topográficas del IGM. La comparación entre las redes obtenidas con TOPAZ y Arc Hydro Tools, no fue considerada para el análisis estadístico ya que fue realizada sólo para determinar la equivalencia entre sus umbrales.

2.5. Implementación del modelo de erosión

Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando el método de cuenca de GeoWEPP para determinar la descarga de sedimentos y la esorrentía generada en cada ladera, con un período de simulación de 30 años para una estimación adecuada del promedio de erosión. Los resultados de cada discretización de la cuenca fueron comparados en base a la descarga de sedimentos y esorrentía generada de las laderas hacia los canales, y no en el punto de salida de la cuenca. Esto último en consideración a que las rutinas de canales de WEPP no fueron desarrolladas para transportar los sedimentos a través de canales perennes. En este estudio se aplicó la interfaz geoespacial GeoWEPP 2008.2. Como se mencionó anteriormente este modelo integra el modelo WEPP con una plataforma SIG; en este caso, WEPP 2012.8 y ArcGIS 9.2.

Tal como se mencionó anteriormente, los parámetros de entrada de clima, uso y tipo de suelo fueron idénticos en ambas cuencas. El archivo climático fue construido en base a 30 años de datos diarios de precipitación y temperatura de la estación Torres del Paine (51°11' S, 72°58' W). También fueron utilizados registros horarios de radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, de la misma estación. Esta información fue proporcionada por la DGA. A través del modelo climático CLIGEN 5.3 (Nicks et al., 1995) incorporado en WEPP, se realizó la distribución horaria de los datos y se generaron las series de variables climáticas requeridas para la simulación. Para mayor detalle sobre las variables meteorológicas utilizadas para la simulación ver el Anexo C.

Para las simulaciones se utilizaron las propiedades del suelo del tipo Luvic Phaeozems, por ser el mayoritario en la cuenca del río Serrano de acuerdo al mapa

digital de suelos de la FAO, cuya escala es 1:5.000.000 (IUSS grupo de trabajo WRB, 2007). De acuerdo a los datos de dicho mapa este suelo presenta una textura franco arcillosa, con contenidos de materia orgánica en el suelo (MOS) de 1,8% y capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 48 cmol/kg. Para el porcentaje de roca y de saturación inicial de agua se seleccionaron 2% y 75% respectivamente. Los coeficientes de erodabilidad, esfuerzo de corte crítico y conductividad hidráulica efectiva que se calcularon a partir de las relaciones proporcionadas por el modelo WEPP. En la Tabla 3-1 se muestra el detalle de las propiedades del suelo del tipo Luvic Phaeozemes, para dos horizontes, ingresadas para la simulación en WEPP.

En cuanto al archivo de manejo, se seleccionó el archivo *fallow.rot* de la base de datos de WEPP, que representa suelo descubierto. Esto se hizo con el objetivo de visualizar de forma más evidente los efectos en las tasas de erosión, aunque esto no es representativo de la realidad de la cuenca.

Tabla 2-1: Propiedades del tipo de suelo Luvic Phaeozems ingresadas para la simulación en WEPP.

Suelo	Textura ⁽¹⁾	Profundidad (cm) ⁽²⁾	Arena (%) ⁽²⁾	Arcilla (%) ⁽²⁾	MOS (%) ⁽³⁾	Albedo ⁽⁴⁾	CIC (cmol/kg) ⁽²⁾
Luvic	Franco	30	39,1	34,6	2,5	0,2	54,0
Phaeozems	arcilloso	100	46,9	32,4	1,1	-	43,0

(1) Según triángulo de las texturas del USDA. (2) En base al mapa digital de suelos FAO. (3) Porcentaje de materia orgánica en el suelo calculado a partir del porcentaje de carbono orgánico (tomado del mapa digital de suelos FAO). Para hacer la conversión se multiplicó por un factor de 1,724, que asume un contenido de 58% de carbono orgánico. (4) Calculado en base a la materia orgánica utilizando la relación exponencial propuesta por los creadores de WEPP.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de este estudio, iniciando con los relativos a la discretización y posteriormente el análisis de los efectos sobre las estimaciones de erosión y escorrentía del modelo GeoWEPP.

3.1. Discretización de la cuenca

La red hidrográfica varió de acuerdo a la combinación de CSA y MSCL y el MDE (Fig. 3-1). Los valores más pequeños de la combinación de CSA y MSCL generaron las redes hidrográficas más densas. Se observó que aunque la longitud del canal principal permaneció constante, su ancho varió de acuerdo a la resolución del MDE, tal como se observa en la Figura 3-1. Esto se debe a que la capa de la red hidrográfica generada con TOPAZ tiene la misma resolución que el MDE que le dio origen; por lo tanto, el ancho de los canales del MDE de 30 m son un tercio que los de los MDE de 90 m. Sin embargo, esto no afectó las simulaciones debido a que no fueron consideradas las rutinas de canales, y además en GeoWEPP el usuario puede especificar el ancho de los canales independientemente del ancho de los canales en la capa de red hidrográfica.

En el caso de las laderas, estas se obtuvieron seleccionando las coordenadas de salida de la cuenca, para delinear las laderas usando TOPAZ. Al aumentar los valores de CSA y MSCL el número de laderas y canales disminuyó. Sin embargo, como el área total de las cuencas permaneció constante, el área promedio de las laderas aumentó (Fig. 3-2). El área promedio de las laderas de la cuenca Tres Pasos fue de 52 ha, con máximos de 200 a 500 ha de acuerdo a la combinación de CSA y MSCL. Mientras que en la cuenca Rincón el área promedio de las laderas fue de 73 ha, con máximos de 200 a 700 ha. Las áreas de las laderas más pequeñas fueron similares en ambas cuencas y variaron de 0,09 a 0,63 ha. En comparación con Tres Pasos, la cuenca Rincón presentó mayores superficies de laderas, a pesar de que ambas cuencas son de tamaño similar. Esto se debe a que las pendientes más pronunciadas en la cuenca Rincón hacen que el número de canales sea menor.

Al comparar las laderas obtenidas con los distintos MDE, las capas de 30 m de resolución produjeron redes hidrográficas más densas en ambas cuencas, y en consecuencia laderas más pequeñas. Esto ocurrió debido a que en este caso el método D8 posee información más detallada al determinar la dirección de flujo y puede variar en comparación con los MDE más gruesos. Este efecto fue más notorio en la cuenca Tres Pasos porque sus pendientes son más suaves, por lo tanto, tiene más posibilidades de tener una dirección de flujo diferente como resultado de un aumento en la resolución del MDE.

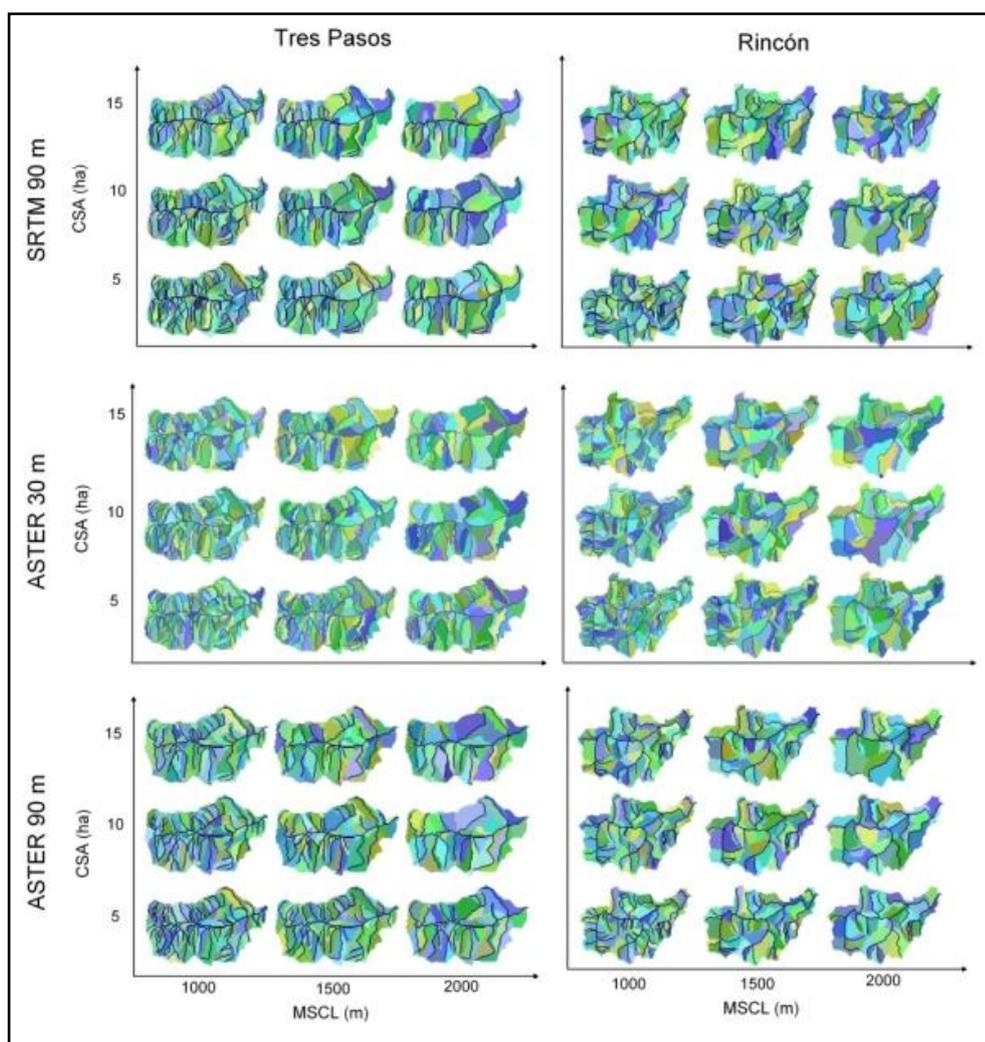


Figura 3-1: Discretizaciones de las cuencas Tres Pasos y Rincón obtenidas usando TOPAZ con tres MDE y nueve combinaciones de CSA y MSCL. El ancho de los canales varía de acuerdo a la resolución del MDE. Los distintos colores representan las laderas. Fuente: Elaboración propia.

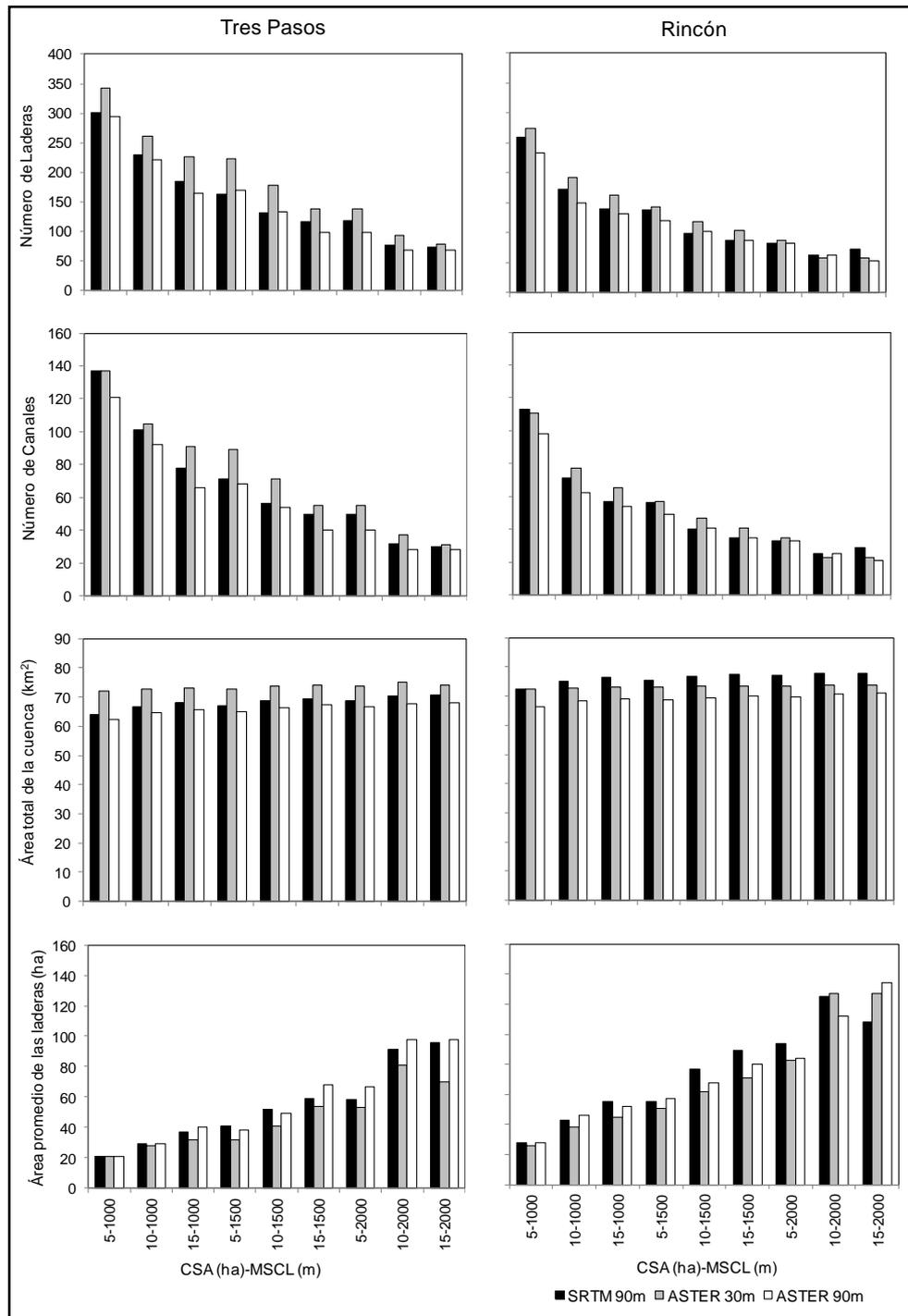


Figura 3-2: Comparación entre las configuraciones de cuencas determinadas con TOPAZ para las cuencas Tres Pasos y Rincón. En los tres MDE utilizados, el aumento de los valores de CSA y MSCL provocó un aumento en el área promedio de las laderas debido a que el número de laderas y canales disminuyó, y el área total de la cuenca permaneció constante. Fuente: Elaboración propia.

Hasta aquí se han analizado las distintas discretizaciones en términos cualitativos, pero con la aplicación de la metodología para comparación de redes hidrográficas fue posible comparar las distintas redes hidrográficas en términos cuantitativos. Los resultados de los valores de F y ΔF calculados se presentan en la Figura 3-3 para la cuenca Tres Pasos y en la Figura 3-4 para la cuenca Rincón. En ambas figuras se muestran los resultados comparando con la carta topográfica del IGM y con las redes hidrográficas obtenidas utilizando Arc Hydro Tools.

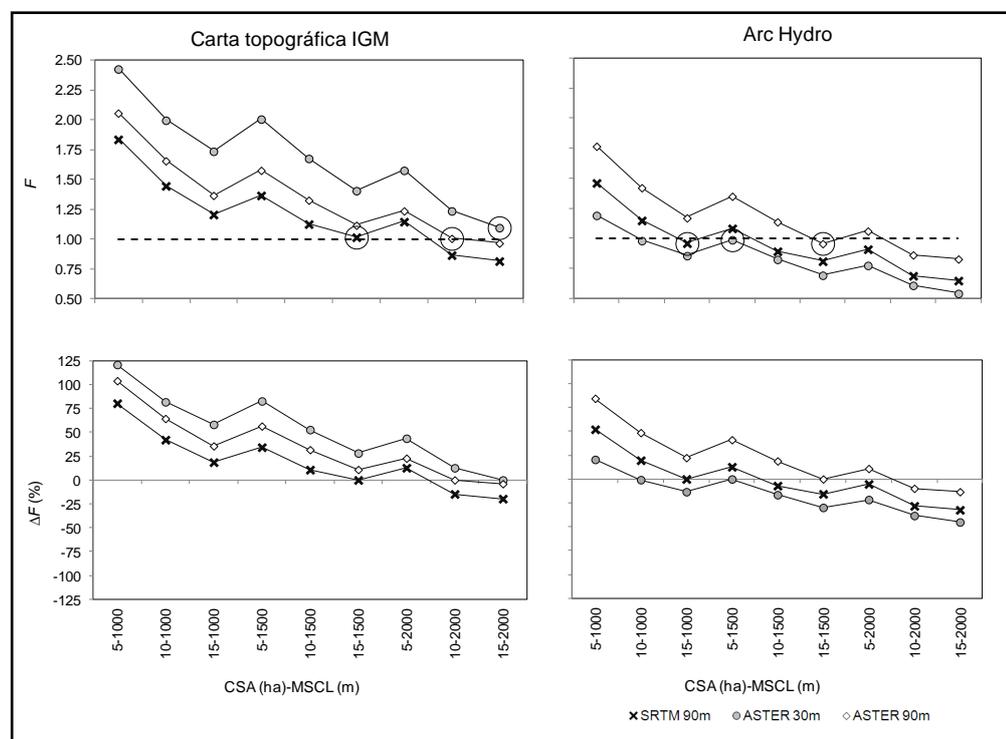


Figura 3-3: Valores de F calculados para cada red hidrográfica de la cuenca Tres Pasos usando como referencias la carta topográfica IGM y las redes hidrográficas obtenidas con Arc Hydro Tools. El ΔF permite comparar en términos relativos las redes hidrográficas obtenidas con TOPAZ de acuerdo al mejor F obtenido en la serie (encerrado en un círculo en la figura). Fuente: Elaboración propia.

Las redes hidrográficas de las cartas topográficas y de Arc Hydro Tools se compararon indirectamente, ya que tienen el mismo numerador (que es el número de píxeles de la red generada con TOPAZ). En la mayoría de los casos, en ambas

cuencas se observó que los valores de F de Arc Hydro Tools son menores que en la carta IGM (para la misma combinación CSA y MSCL) esto indica que las redes hidrográficas obtenidas con Arc Hydro Tools en este estudio tienden a sobreestimar la red con respecto a la carta topográfica del IGM. Esto se debe a que el umbral seleccionado para las capas de acumulación de flujo fue muy bajo, por lo que se recomienda utilizar algún método cuantitativo para definir dicho umbral, como por ejemplo el de las curvas área-pendiente (Ijjasz-Vasquez & Bras, 1995; Montgomery & Foufoula-Georgiou, 1994; D. G. Tarboton et al., 1991).

Los valores de F de la cuenca Rincón presentaron menor variabilidad ante las combinaciones de CSA y MSCL. Así, las redes hidrográficas obtenidas para la cuenca Rincón fueron similares entre sí, indicando que la cuenca con pendientes más pronunciadas fue menos sensible ante variaciones de los parámetros CSA y MSCL.

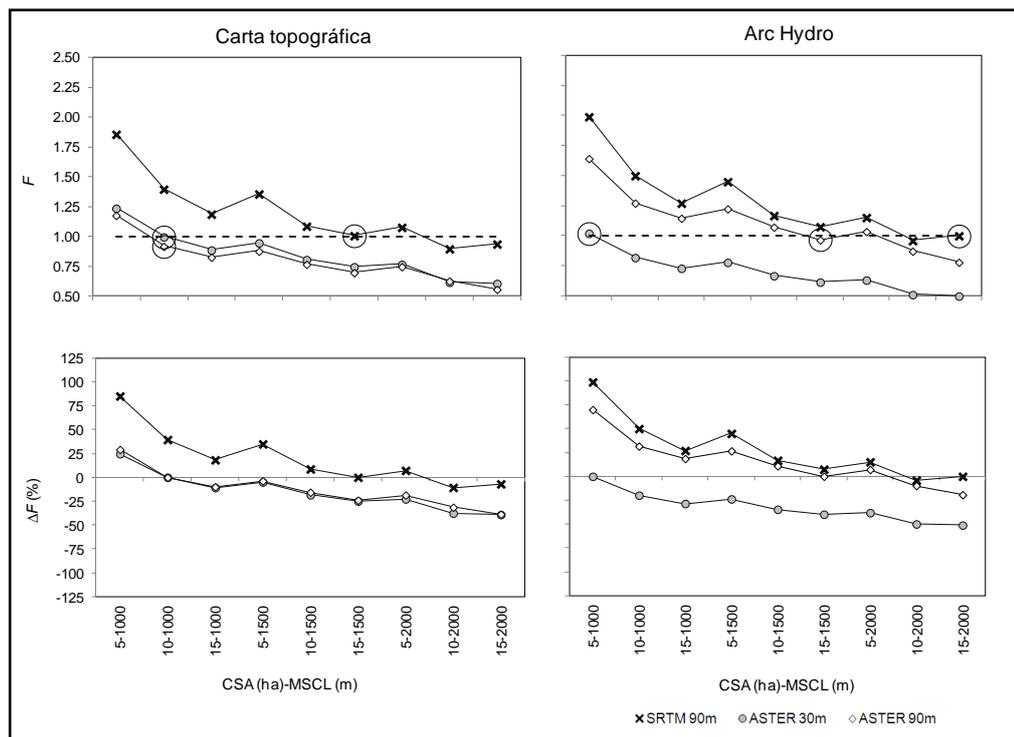


Figura 3-4: Valores de F calculados para cada red hidrográfica de la cuenca Rincón usando como referencias la carta topográfica IGM y las redes hidrográficas obtenidas con Arc Hydro Tools. Estos muestran menor variabilidad que en la cuenca Tres Pasos. Los mejores F obtenidos en cada serie están encerrados en un círculo. Fuente: Elaboración propia.

La combinación de CSA y MSCL que generó la red hidrográfica más similar a la imagen que se usó para la comparación (o el índice F más cercano a 1, o mejor F) varió de acuerdo a las características topográficas de la cuenca, la fuente y resolución del MDE. En las Figuras 3-3 y 3-4 se encierran en círculos los mejores F para facilitar su identificación. En la aplicación de la metodología para comparación de redes usando como imagen de referencia las cartas topográficas IGM, para la mayoría de los MDE utilizados en este estudio los mejores F fueron bastante cercanos a 1. Lo que indica que TOPAZ fue capaz de representar adecuadamente la red hidrográfica real con las combinaciones de CSA y MSCL seleccionadas. Los mejores F fueron de 1,01 a 1,10 para la cuenca Tres Pasos y de 0,92 a 1,01 para la cuenca Rincón.

Por otra parte, en la aplicación de la metodología para comparación de redes, usando como imagen de referencia las redes hidrográficas obtenidas utilizando Arc Hydro Tools, los mejores F fueron de 0,96 a 0,99 para la cuenca Tres Pasos y de 0,97 a 1,02 para la cuenca Rincón. Esto demuestra que las redes obtenidas con Arc Hydro Tools tienen un umbral equivalente en con las combinaciones de CSA y MSCL seleccionadas. Se puede concluir que para los MDE de 90 m, un umbral de 50 celdas (40 ha) en el Arc Hydro Tools equivale a una combinación de CSA 15 ha y MSCL 2000 m, mientras que un umbral de 80 celdas (65 ha) equivale a una combinación de 15 ha y 1000 m. Para los MDE de 30 m un umbral de 200 celdas (18 ha) equivale a una combinación de 5 ha y 1500 m. De este análisis se destaca que el área que representa la cantidad de celdas del umbral de Arc Hydro Tools no es igual al CSA por lo que se demuestra que para generar redes idénticas en Arc Hydro y TOPAZ no basta con colocar el mismo CSA si no que el valor del MSCL también influye.

La comparación en términos relativos a través del ΔF usando como referencia la carta topográfica demuestra que las combinaciones de CSA y MSCL probadas en este estudio, en la mayoría de los casos la red hidrográfica fue sobreestimada ($\Delta F > 0$) para la cuenca Tres Pasos y subestimada ($\Delta F < 0$) para la cuenca Rincón. Esto demuestra que la selección de parámetros CSA y MSCL es sensible a la topografía de la cuenca.

3.2. Efecto sobre las estimaciones de erosión y escorrentía

Los resultados de las estimaciones a largo plazo con GeoWEPP demostraron que la discretización de la cuenca no tiene un efecto significativo en la estimación de la escorrentía total. Sin embargo, las estimaciones de descarga de sedimentos mostraron una variación significativa, especialmente la estimación de la erosión máxima en una ladera y su distribución espacial (Fig. 3-5). A modo de ejemplo, en la Fig. 3-6 se muestra la discretización obtenida en la cuenca Tres Pasos usando una combinación de CSA 10 ha y MSCL 1500 m, y sus correspondientes resultados de erosión en los tres MDE. Allí es posible apreciar como varían los resultados de erosión según la superficie de la ladera.

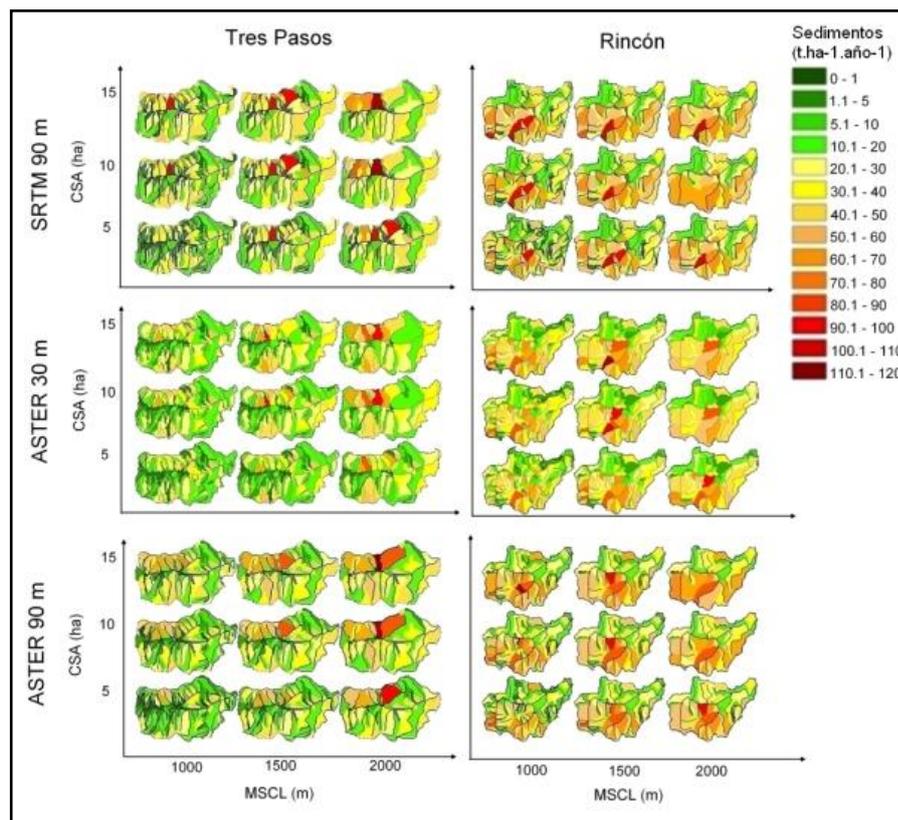


Figura 3-5: Distribución espacial de la descarga de sedimentos en las cuencas Tres Pasos y Rincón de acuerdo al MDE y nivel de discretización. La distribución espacial de la erosión varió significativamente de acuerdo a la discretización de la cuenca. Fuente: Elaboración propia.

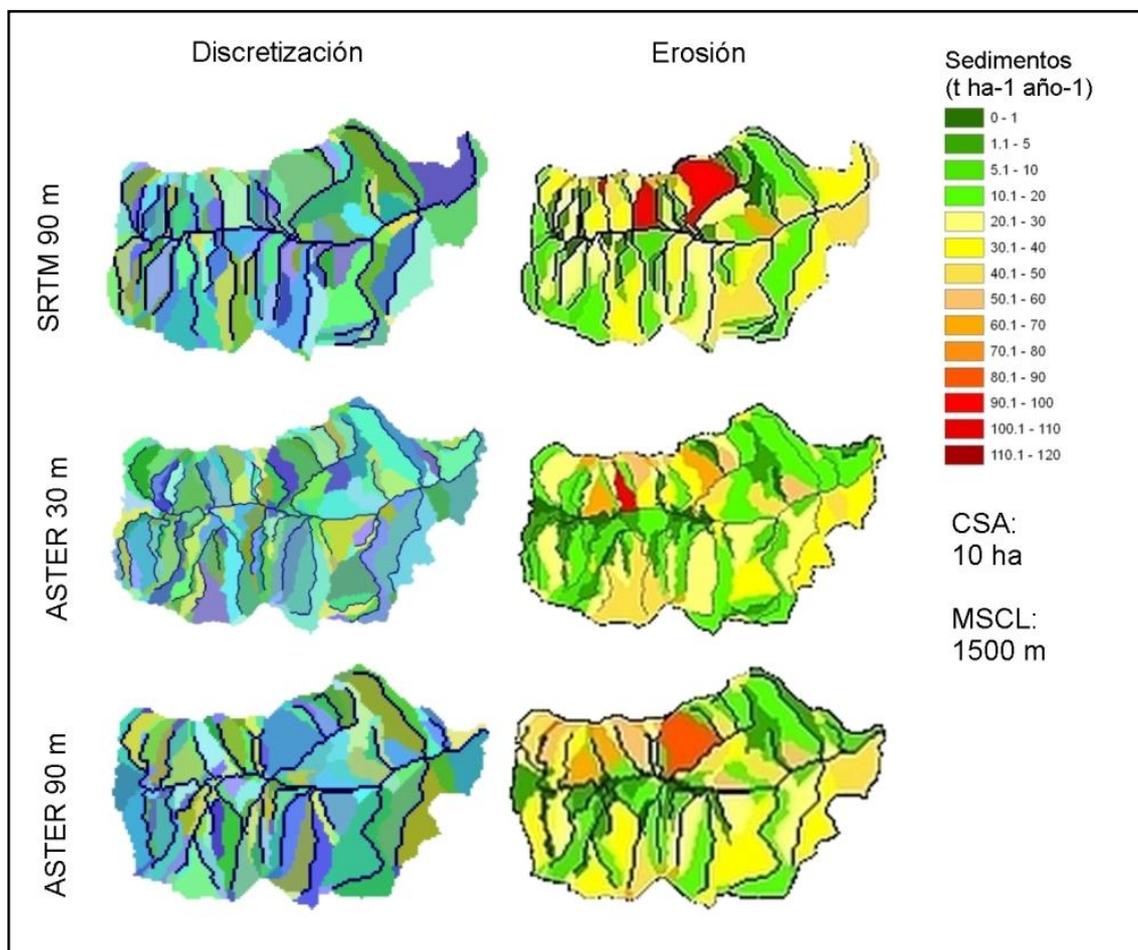


Figura 3-6: Discretización y distribución espacial de la descarga de sedimentos obtenidas para la cuenca Tres Pasos utilizando una combinación de CSA 10 ha y MSCL 1500 m y tres MDE. Se observa que los resultados de erosión varían de acuerdo a la superficie de las laderas. Fuente: Elaboración propia.

Para ambas cuencas, la estimación de la esorrentía total para las nueve combinaciones de CSA y MSCL y tres MDE utilizados, variaron de 18,1 a 18,9 mm año⁻¹. El hecho de que la superficie de la cuenca se mantuviera constante explica por qué la variación en las estimaciones de esorrentía fue mínima. Las estimaciones de descarga de sedimentos en la cuenca Tres Pasos variaron de 16 a 37 t ha⁻¹ año⁻¹ y de 30 a 47 t ha⁻¹ año⁻¹ para la cuenca Rincón. Mientras que la estimación de la descarga de sedimentos máxima en una ladera varió de 64 a 111 t ha⁻¹ año⁻¹ para la cuenca Tres Pasos; y de 82 a 113 t ha⁻¹ año⁻¹ para la cuenca Rincón (Fig. 3-7). El menor

valor de descarga de sedimentos se obtuvo usando los valores más bajos de la combinación CSA y MSCL, y el máximo valor de descarga de sedimentos con los valores más altos de la combinación de CSA y MSCL. Esto demuestra que las laderas de mayor superficie tienden a generar el mayor potencial de erosión, como ya lo notaron Baffaut et al. (1997), Zhang et al. (2009) y Miller et al. (2011) en cuencas pequeñas.

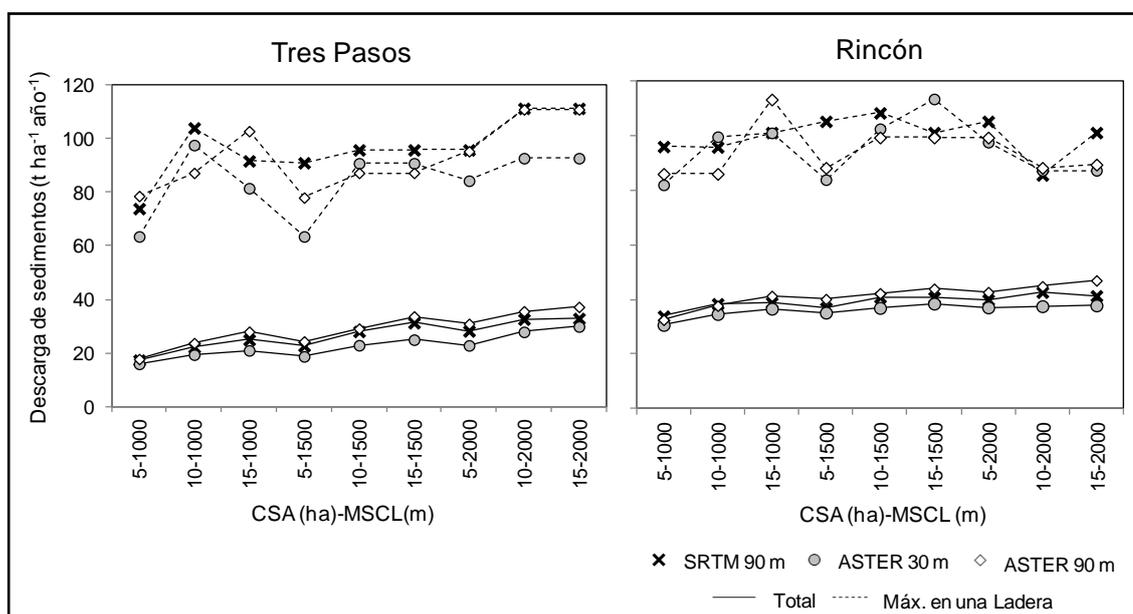


Figura 3-7: Estimaciones de la descarga de sedimentos para las cuencas Tres Pasos y Rincón con diferentes discretizaciones para tres MDE. Las estimaciones de la descarga de sedimentos máxima en una ladera presentaron mayor variabilidad que la descarga total, calculada como la suma de los valores generados en cada ladera (t año⁻¹) divididos entre el área total de la cuenca (ha). La cuenca Rincón presentó menor variabilidad que la cuenca Tres Pasos debido a que la superficie de sus laderas presentó menor variabilidad. Fuente: Elaboración propia.

Las estimaciones de descarga de sedimentos variaron de acuerdo a la discretización y a la fuente y resolución del MDE. En las Tablas 3-1 y 3-2 se muestran los resultados de las estimaciones de la descarga de sedimentos total, calculada como la suma de los sedimentos generados en las laderas divididos entre el área total de la cuenca, para las cuencas Tres Pasos y Rincón respectivamente. Por su parte en las Tablas 3-3

y 3-4 se muestran las estimaciones de la descarga de sedimentos máxima en una ladera para las cuencas Tres Pasos y Rincón respectivamente. Para evaluar el efecto de los distintos valores de CSA y MSCL en la descarga de sedimentos, se calculó la diferencia entre las máximas y mínimas estimaciones del mismo MDE. Estas diferencias fueron en promedio de $16 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la cuenca Tres Pasos (Tabla 3-1) y de $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la cuenca Rincón (Tabla 3-2). La descarga de sedimentos máxima en una ladera presentó mayor variabilidad, de $35 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la cuenca Tres Pasos (Tabla 3-3) y de $27 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en Rincón (Tablas 3-4). El efecto de la resolución del MDE se determinó calculando las diferencias entre las estimaciones de descarga de sedimentos de los MDE ASTER de 30 m y 90 m para los mismos valores de CSA y MSCL. Esta diferencia fue, en promedio, $6 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en Tres Pasos y $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en Rincón. El efecto de la fuente del MDE, calculado como la diferencia entre los MDE SRTM y ASTER de 90 m, presentaron valores menores (Tablas 3-1 y 3-2). Además, los efectos de la fuente y resolución del MDE en las estimaciones de la descarga de sedimentos máxima en una ladera fueron similares. En promedio, estas diferencias fueron de $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en Tres Pasos y $8 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en Rincón (Tablas 3-3 y 3-4). Esto demuestra que la resolución y fuente del MDE tiene efecto en las estimaciones de erosión, demostrado anteriormente por Renschler (2003) y Zhang et al. (2009) en cuencas pequeñas.

En ambas cuencas, las estimaciones de la descarga de sedimentos total presentaron poca variabilidad ante los valores de CSA y MSCL, especialmente la cuenca Rincón. Por otro lado, las estimaciones de la descarga de sedimentos máxima en una ladera presentaron una variabilidad significativa (Fig. 3-7), que debe ser considerada al planificar prácticas de restauración y conservación de suelos a escala de cuenca.

Tabla 3-1: Estimaciones de la descarga de sedimentos de la cuenca Tres Pasos usando nueve combinaciones de CSA y MSCL y tres MDE. La diferencia por fuente fue calculada comparando los resultados de los MDE SRTM y ASTER de 90 m, mientras que la diferencia por resolución se calculó comparando los MDE ASTER de 30 m y 90 m. Adicionalmente se muestran los valores promedio, mínimo y máximo obtenidos en cada serie, así como la diferencia entre el mínimo y el máximo.

Descarga de sedimentos (t ha ⁻¹ año ⁻¹)													
CSA (ha)- MSCL (m)	5- 1000	10- 1000	15- 1000	5- 1500	10- 1500	15- 1500	5- 2000	10- 2000	15- 2000	Promedio	Mínimo	Máximo	Diferencia Máx. y Mín.
SRTM 90 m	17,3	22,1	24,9 [†]	22,7	28,0	31,3 [*]	28,2	32,6	32,9	26,3	17,3	32,9	15,6
ASTER 30 m	15,9	19,4	21,0	18,7 [†]	22,9	25,0	22,8	27,9	29,9 [*]	22,1	15,9	27,9	12,0
ASTER 90 m	17,8	23,7	28,0	24,3	29,1	33,7 [†]	30,9	35,6 [*]	37,2	27,3	17,8	37,2	19,5
Diferencia por Fuente	0,4	1,6	3,0	1,7	1,1	2,4	2,7	3,0	4,3	2,2	0,4	4,3	3,9
Dif. por Resolución	1,8	4,3	7,0	5,6	6,2	8,7	8,1	7,7	7,3	6,3	1,8	8,7	6,9

*Resultado en la red hidrográfica con el mejor F según la comparación con la carta IGM.

†Resultado en la red hidrográfica con el mejor F según la comparación con la red de Arc Hydro Tools.

Tabla 3-2: Estimaciones de la descarga de sedimentos de la cuenca Rincón usando nueve combinaciones de CSA y MSCL y tres MDE. La diferencia por fuente fue calculada comparando los resultados de los MDE SRTM y ASTER de 90 m, mientras que la diferencia por resolución se calculó comparando los MDE ASTER de 30 m y 90 m. Adicionalmente se muestran los valores promedio, mínimo y máximo obtenidos en cada serie, así como la diferencia entre el mínimo y el máximo.

Descarga de sedimentos (t ha ⁻¹ año ⁻¹)													
CSA (ha)- MSCL (m)	5- 1000	10- 1000	15- 1000	5- 1500	10- 1500	15- 1500	5- 2000	10- 2000	15- 2000	Promedio	Mínimo	Máximo	Diferencia Máx. y Mín.
SRTM 90 m	33,9	38,4	38,9	36,9	40,8	40,8*	39,9	42,7	41,3 [†]	38,8	33,9	42,7	8,8
ASTER 30 m	30,7 [†]	34,7*	36,6	35,2	36,9	38,5	37,1	37,5	37,8	37,1	35,2	38,5	3,3
ASTER 90 m	32,5	37,7*	41,3	40,1	42,2	43,9 [†]	42,7	44,8	46,9	41,5	32,5	46,9	14,4
Diferencia por Fuente	1,3	0,7	2,4	3,3	1,4	3,2	2,8	2,2	5,6	2,5	0,7	5,6	4,9
Dif. por Resolución	1,9	3,0	4,7	5,0	5,3	5,4	5,6	7,3	9,1	5,2	1,9	9,1	7,3

*Resultado en la red hidrográfica con el mejor F según la comparación con la carta IGM.

[†]Resultado en la red hidrográfica con el mejor F según la comparación con la red de Arc Hydro Tools.

Tabla 3-3: Estimaciones de la descarga de sedimentos máxima en una ladera de la cuenca Tres Pasos usando nueve combinaciones de CSA y MSCL y tres MDE. La diferencia por fuente fue calculada comparando los resultados de los MDE SRTM y ASTER de 90 m, mientras que la diferencia por resolución se calculó comparando los MDE ASTER de 30 m y 90 m. Adicionalmente se muestran los valores promedio, mínimo y máximo obtenidos en cada serie, así como la diferencia entre el mínimo y el máximo.

Descarga de sedimentos máxima en una ladera ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)													
CSA (ha)- MSCL (m)	5- 1000	10- 1000	15- 1000	5- 1500	10- 1500	15- 1500	5- 2000	10- 2000	15- 2000	Promedio	Mínimo	Máximo	Diferencia Máx. y Mín.
SRTM 90 m	74	104	92 [†]	91	96	96 [*]	96	111	111	98	74	111	37
ASTER 30 m	64	98	82	64 [†]	91	91	84	93	93 [*]	86	64	98	34
ASTER 90 m	79	87	103	78	87	87 [†]	95	111 [*]	111	91	78	111	33
Diferencia por Fuente	5	17	11	13	9	9	1	0	0	7	0	17	16
Dif. por Resolución	15	10	21	15	4	4	11	18	18	13	4	21	18

*Resultado en la red hidrográfica con el mejor F según la comparación con la carta IGM.

†Resultado en la red hidrográfica con el mejor F según la comparación con la red de Arc Hydro Tools.

Tabla 3-4: Estimaciones de la descarga de sedimentos máxima en una ladera de la cuenca Rincón usando nueve combinaciones de CSA y MSCL y tres MDE. La diferencia por fuente fue calculada comparando los resultados de los MDE SRTM y ASTER de 90 m, mientras que la diferencia por resolución se calculó comparando los MDE ASTER de 30 m y 90 m. Adicionalmente se muestran los valores promedio, mínimo y máximo obtenidos en cada serie, así como la diferencia entre el mínimo y el máximo.

Descarga de sedimentos máxima en una ladera ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$)													
CSA (ha)- MSCL (m)	5- 1000	10- 1000	15- 1000	5- 1500	10- 1500	15- 1500	5- 2000	10- 2000	15- 2000	Promedio	Mínimo	Máximo	Diferencia Máx. y Mín.
SRTM 90 m	96	96	101	105	108	101*	105	86	101†	100	86	108	23
ASTER 30 m	82†	100*	101	84	102	113	98	87	87	96	84	113	30
ASTER 90 m	86	86*	113	88	99	99†	99	88	89	95	86	113	27
Diferencia por Fuente	10	10	12	17	9	2	6	3	12	9	2	17	15
Dif. por Resolución	4	14	12	4	3	14	2	1	2	6	1	14	13

*Resultado en la red hidrográfica con el mejor F según la comparación con la carta IGM.

†Resultado en la red hidrográfica con el mejor F según la comparación con la red de Arc Hydro Tools.

En base a la evaluación realizada con el método para comparación de redes hidrográficas, la combinación de CSA y MSCL con la que se obtuvo el mejor F varió de acuerdo al MDE y a la red hidrográfica con la que se comparó, ya sea esta la carta topográfica o las redes obtenidas con Arc Hydro Tools. En las Tablas 3-1 y 3-2 se pueden observar los resultados de la descarga de sedimentos obtenida con las combinaciones de CSA y MSCL que generaron los mejores F en cada MDE comparando con la red de la carta topográfica (señalados con *) y con las redes de Arc Hydro Tools (señalados con †). Los resultados obtenidos con las redes de Arc Hydro Tools son menores los de la carta topográfica y presentan mayor variabilidad. Se puede concluir que al utilizar como referencia las redes hidrográficas obtenida de Arc Hydro Tools se subestimaron los resultados de erosión debido a que se sobreestimó la red hidrográfica con los umbrales seleccionados. El MDE que presentó mayor variabilidad en los resultados de descarga de sedimentos fue el de mayor resolución. En el Anexo D se muestra el detalle de los resultados de las simulaciones de GeoWEPP para las combinaciones de CSA y MSCL que obtuvieron los mejores F de acuerdo a la comparación con la carta topográfica.

De forma similar, en las Tablas 3-3 y 3-4 se pueden observar los resultados de la descarga de sedimentos máxima en una ladera obtenida con las combinaciones de CSA y MSCL que generaron los mejores F en cada MDE comparando con la red de la carta topográfica (*) y con las redes de Arc Hydro Tools (†). En estas estimaciones se observaron grandes diferencias. La variabilidad espacial de los resultados de descarga de sedimentos fue significativa, especialmente en el MDE de mayor resolución.

Esto demuestra que el modelo WEPP es muy sensible a cambios en la superficie de la ladera, principalmente al cambio en la longitud de la ladera. Esto lo demuestra el análisis de sensibilidad de la Fig. 3-8, hecho para las mismas condiciones de clima, uso y tipo de suelo que en las simulaciones de las cuencas Tres Pasos y Rincón, pero en este caso se hizo a escala de ladera variando sus pendientes y su longitud. De este análisis se observa que la escorrentía varía muy poco con respecto a la longitud de la ladera, pero presenta una pequeña variación de acuerdo a la pendiente. En cambio, los resultados de erosión varían de forma significativa de acuerdo a la longitud de la

ladera y su pendiente. Esto se debe a que al aumentar la longitud de la ladera aumenta la erosión que ocurre en los regueros, ya que el esfuerzo de corte del fluido excede el esfuerzo crítico del suelo (Flanagan & Nearing, 2000; Nearing et al., 1989).

Para ejemplificar lo que ocurre en cada sector de la ladera, en la Fig. 3-9 se graficaron los resultados de erosión obtenidos en cada nodo para laderas de 65 m y 140 m de longitud con pendientes de 10% y 40%. Se observa que la descarga de sedimentos aumenta de manera significativa debido al aumento en la longitud de la ladera y en mayor medida debido al aumento en la pendiente. Cuando se alcanza el final de la ladera se observa una disminución en la descarga debido a que hay un ligero cambio de pendiente (suavizado) que provoca sedimentación.

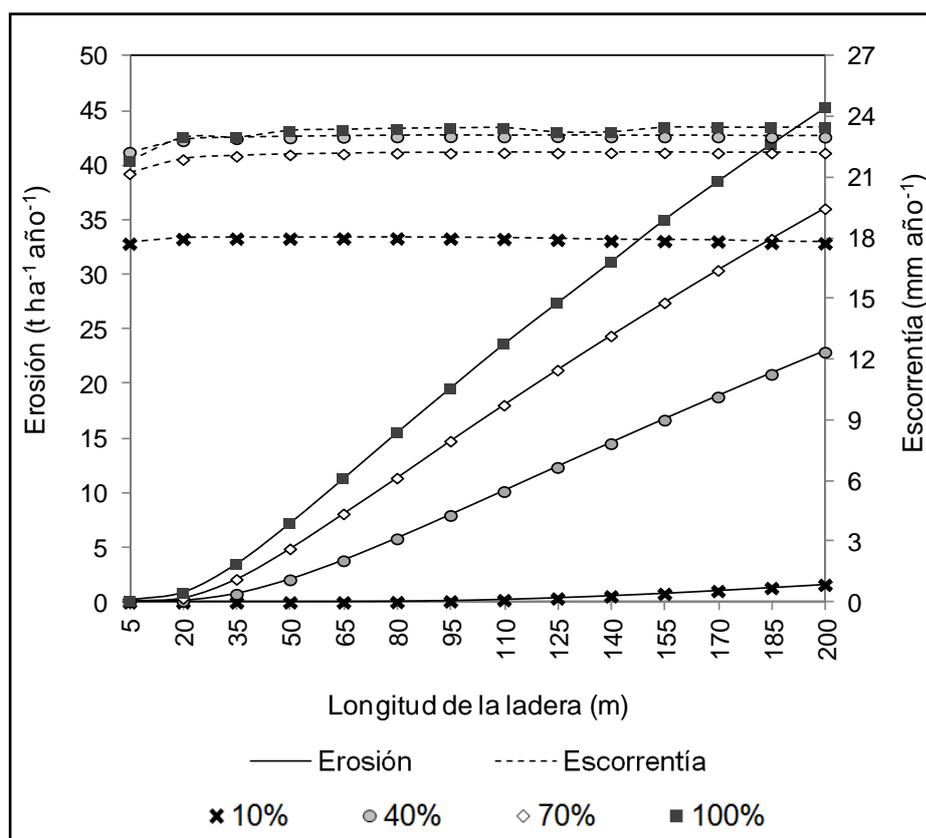


Figura 3-8: Variación de las estimaciones de erosión y escorrentía del modelo WEPP de acuerdo a la longitud de la ladera para distintas pendientes. Se observa que los resultados de escorrentía permanecen casi constantes mientras que las estimaciones de erosión varían de forma importante. Fuente: Elaboración propia.

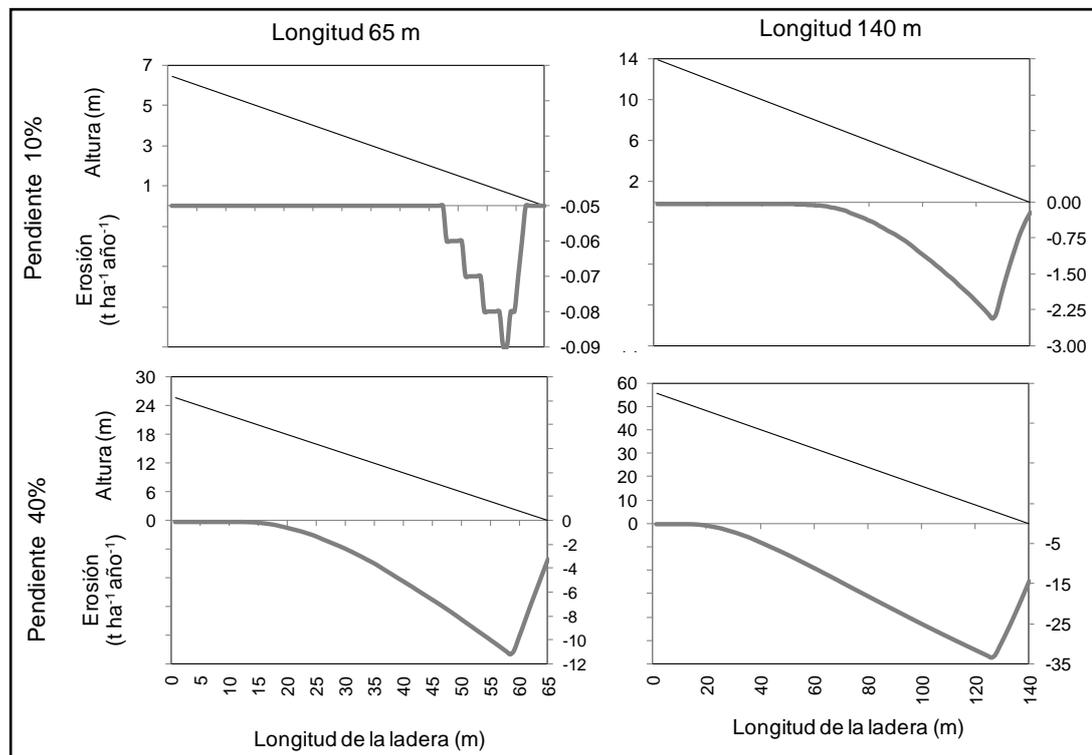


Figura 3-9: Resultados de las estimaciones de erosión del modelo WEPP distribuidos en la ladera, para pendientes de 10% y 40% en laderas de 65 m y 140 m de longitud. Fuente: Elaboración propia.

Hasta el momento, el análisis que se ha hecho de las estimaciones de erosión ha sido de forma discreta, por ejemplo como varían las estimaciones de acuerdo a la fuente y resolución del MDE y a los valores de CSA y MSCL. Sin embargo, relacionando el ΔF (Ec. 2-1) con $\Delta Sedimentos$ (Ec. 2-2) y ajustando una regresión lineal entre ellos, fue posible estimar el error en la descarga de sedimentos como consecuencia de una subjetividad en la discretización de la cuenca. Este análisis se hizo para cada MDE en ambas cuencas. Como se observa en la Fig. 3-10, se encontró una relación inversa entre el ΔF y $\Delta Sedimentos$. Además, del análisis estadístico se concluyó que las líneas de ajuste eran distintas, por lo tanto el efecto de los MDE es significativo.

Un análisis similar se hizo también para el número de laderas y canales (Fig. 3-11) y para el área total de la cuenca y la escorrentía (Fig. 3-12). Se observó que la relación entre el ΔF y la variación en el número de laderas y canales es directa, mientras que para el área y la escorrentía total la variación es insignificante.

Aunque los valores de r^2 del ajuste son bastante cercanos a 1 en todos los casos, el hecho de que el intercepto de distinto de cero demuestra que el fenómeno no es completamente lineal. Esto se debe a que el índice F combina la longitud y número de canales y los resultados no responden de la misma manera ante variaciones en estas características. Y en particular la estimación de la erosión de por sí es un proceso no lineal.

Con el objetivo de definir un umbral, se puede considerar aceptable una desviación de 10% en los resultados de erosión (señalado en las Fig. 3-10) (Baffaut et al., 1997). Así se determinó que el rango de ΔF apropiado sería de -25% a 25% (también señalado en la Fig. 4-7 y 4-8). Este rango de ΔF varía de acuerdo al MDE y la cuenca. La razón de esto es que el análisis realizado para comparar las curvas de regresión demostró que las diferencias entre los parámetros de regresión de las rectas eran estadísticamente significativas. Por lo tanto, la desviación estándar en la variación de la descarga de sedimentos según el MDE fue alrededor de 3%. Haciendo un análisis similar, se determinó la variación que provoca un rango apropiado de ΔF (-25% a 25%) en el número de laderas y canales, área y escorrentía. Las variación fueron de -60% a 60% para el número de laderas y canales (Fig. 3-11), -2% a 2% en el área de la cuenca, y de -1% a 1% en la escorrentía (Fig. 3-12). Estos rangos también varían de acuerdo al MDE y las desviaciones estándar fueron de 10% en el número de laderas, 20% en el número de canales, 1% en el área y 0,5% en la escorrentía. En todos los casos la mayor desviación se obtuvo con el MDE ASTER de 90 m. En la Tabla 3-5 se muestra una síntesis de estos resultados.

Tabla 3-5: Variación que provoca el rango apropiado de ΔF en el número de laderas y canales, área, escorrentía y erosión.

	ΔF (%)	Δ Número de Laderas (%)	Δ Número de Canales (%)	Δ Área (%)	Δ Escorrentía (%)	Δ Sedimentos (%)
Tres pasos	25	60 ± 10	70 ± 10	2 ± 1	0,30 ± 0,04	12 ± 2
Rincón	25	50 ± 10	50 ± 10	2 ± 1	1,0 ± 0,5	9 ± 4
Promedio	25	60 ± 10	60 ± 20	2 ± 1	1,0 ± 0,5	11 ± 3

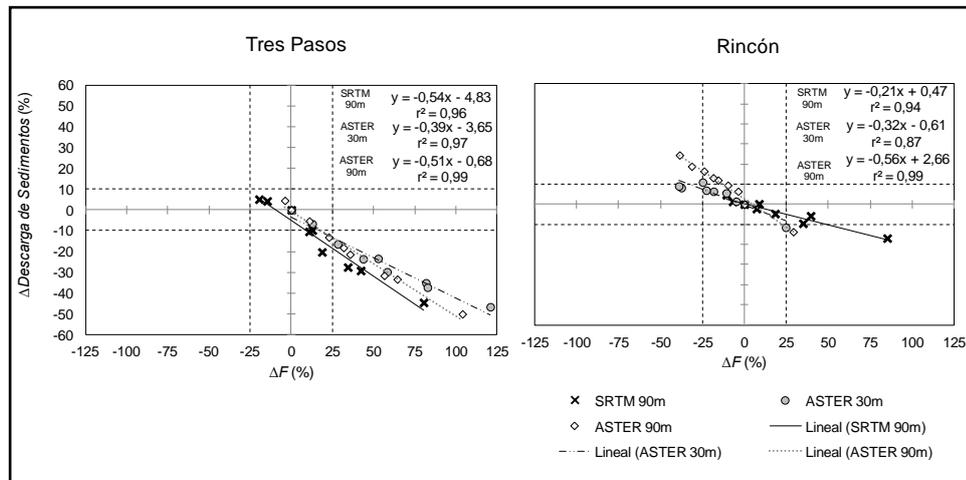


Figura 3-10: Curvas de regresión entre la variación de la discretización, representada a través del ΔF y la variación en la descarga de sedimentos. El análisis estadístico demostró que la fuente y resolución del MDE tiene efecto en la estimación de la descarga de sedimentos. Fuente: Elaboración propia.

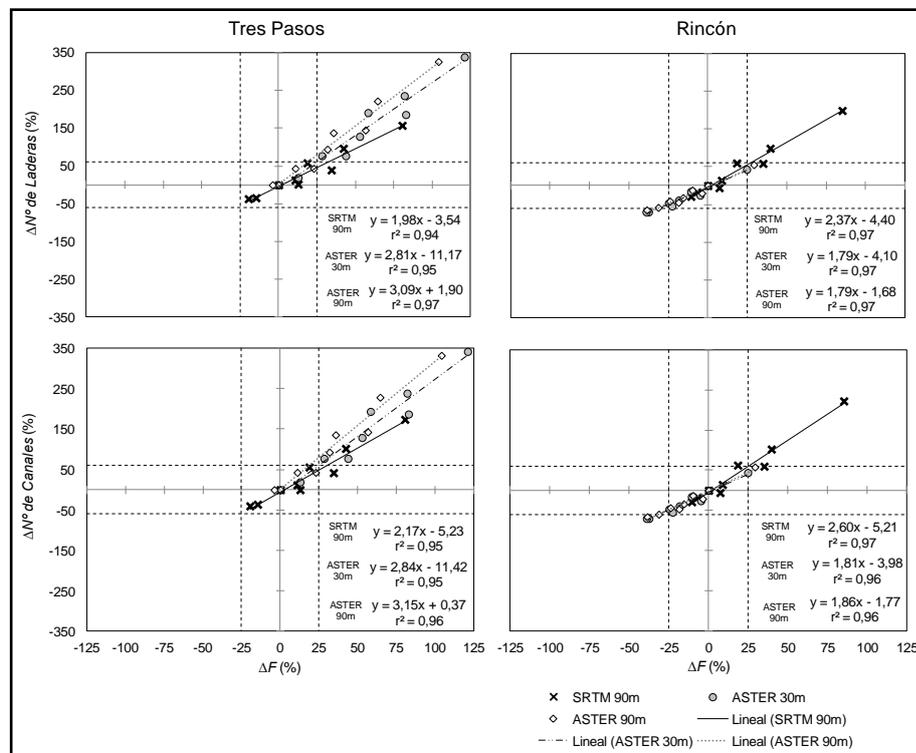


Figura 3-11: Curvas de regresión entre la variación de la discretización, representada a través del ΔF y la variación en el número de laderas y canales. Se observa que la relación es directa. Fuente: Elaboración propia.

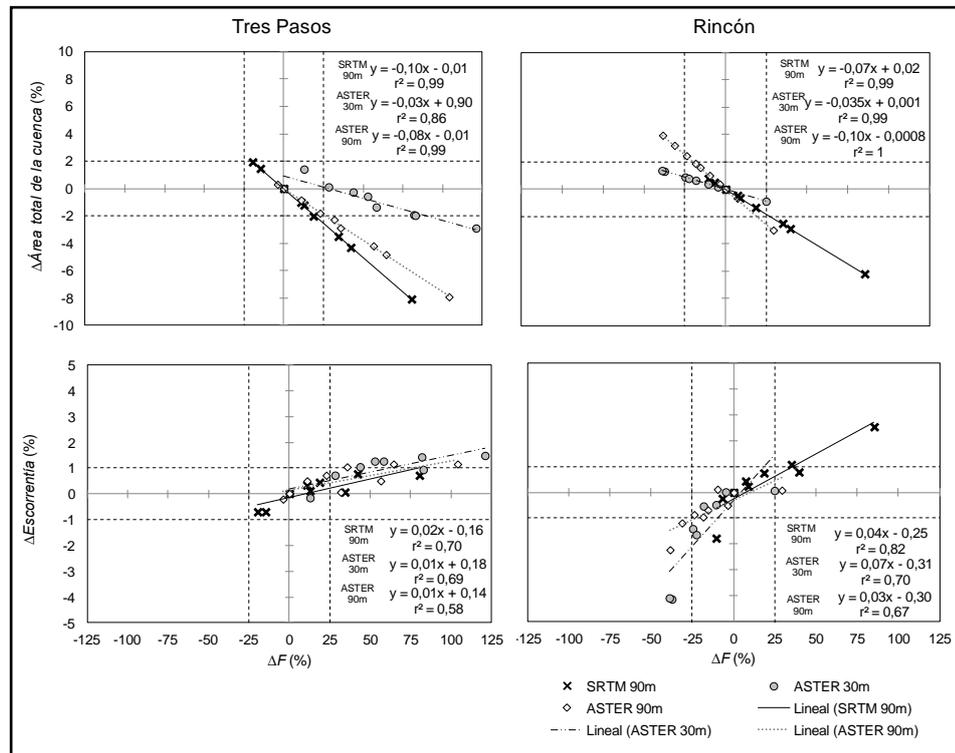


Figura 3-12: Curvas de regresión entre la variación de la discretización, representada a través del ΔF y la variación en los resultados de área y escorrentía. Se observa que la variación es mínima. Fuente: Elaboración propia.

Considerando lo anterior, se recomienda estandarizar las estimaciones de erosión en cuencas hidrográficas de GeoWEPP utilizando el mismo MDE (fuente y resolución) y una metodología cuantitativa para determinar la discretización más real de la cuenca. Si se aplica el método propuesto en este estudio, que consiste en replicar la red de una carta topográfica, se recomienda que el índice F de la red generada por el modelo sea de 0,8 a 1,2 y que se utilice una red hidrográfica de referencia que sea confiable, preferiblemente una carta topográfica con una escala adecuada para la zona de estudio.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de este estudio demuestran que la variación de la discretización de la cuenca tiene un efecto significativo en la estimación de la descarga de sedimentos y su distribución espacial, pero no así en estimación de la escorrentía para este caso en particular. Al disminuir los valores de los parámetros CSA y MSCL, la densidad de la red hidrográfica aumentó, y con ello el número de laderas y canales. Sin embargo, como el área total se mantuvo constante, el área promedio en las laderas disminuyó. Debido a esto, la descarga de sedimentos fue menor en las redes hidrográficas más densas.

En cuanto a las características del MDE, se demostró a través de un análisis estadístico que la fuente y resolución del MDE tienen efecto en la determinación del número de laderas, canales y descarga de sedimentos. Los MDE de resolución fina generan redes hidrográficas más densas, por lo tanto, las laderas son de menor superficie, lo que en consecuencia genera menor descarga de sedimentos. Las diferencias en las estimaciones entre los MDE se hicieron más evidentes en los valores extremos de CSA y MSCL usados en este estudio.

Se propuso el empleo del índice F como una medida de la densidad de la red hidrográfica. Si el valor de F es mayor a 1, indica que la red hidrográfica ha sido sobreestimada con respecto a la imagen de referencia. Si es menor a 1, indica que la red hidrográfica ha sido subestimada. El análisis de los valores de F demostró que las cuencas con pendientes pronunciadas tienden a generar redes hidrográficas similares entre sí para las combinaciones de CSA y MSCL probadas en este estudio. También se demostró que el valor de F es directamente proporcional al número de laderas y canales; y es inversamente proporcional a la descarga de sedimentos. Para mantener una variación aceptable en la descarga de sedimentos (10%) se recomienda usar un valor de F de 0,8 a 1,2 en base a una comparación con cartas topográficas.

Las redes hidrográficas con valores de F similares mostraron resultados similares de descarga de sedimentos. Esto explica el motivo por el cual en la cuenca Rincón las estimaciones de descarga de sedimentos fueron más constantes que en la cuenca Tres

Pasos. Los valores de F obtenidos en la cuenca Rincón fueron más parecidos entre sí. A través del cálculo del valor de F se demostró que la determinación de la combinación de parámetros CSA y MSCL más apropiada para las simulaciones depende de la resolución y fuente del MDE, de las características topográficas de la cuenca y de la imagen de referencia que utilice de la red hidrográfica real.

Tomando en cuenta que las estimaciones de descarga de sedimentos varían de forma importante de acuerdo a varios factores (discretización y fuente y resolución del MDE), se recomienda estandarizar las estimaciones de erosión en cuencas hidrográficas en GeoWEPP, utilizando el mismo MDE (fuente y resolución) y una metodología cuantitativa para determinar los parámetros CSA y MSCL que generan la discretización más real de la cuenca. Una posibilidad es aplicar la metodología propuesta en este estudio usando un valor de F cercano a 1 (de 0,8 a 1,2) y utilizando una red hidrográfica de referencia confiable. Sin embargo, este método sigue presentando limitaciones como por ejemplo que no considera la ubicación espacial de los canales en la comparación, esto se podría mejorar realizando una correlación espacial. Otra limitación es que este método está basado en una comparación con cartas topográficas, que no necesariamente sean la representación más real de la cuenca. Por lo que sería de interés, comparar dicha red con la estimación de redes hidrográficas realizadas con softwares como TOPAZ y Arc Hydro Tools a partir de MDE, pero fijando el umbral de CSA aplicando procedimientos disponibles en la bibliografía, como por ejemplo las curvas pendiente-área mencionadas anteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

Abaci, O., & Papanicolaou, A. (2009). Long-term effects of management practices on water-driven soil erosion in an intense agricultural sub-watershed: monitoring and modeling. *Hydrological Processes*, 23(19), 2818–2837. doi:10.1002/hyp

Amore, E., Modica, C., Nearing, M., & Santoro, V. (2004). Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of Hydrology*, 293(1-4), 100–114. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.01.018

Ascough, J., Baffaut, C., Nearing, M. A., & Liu, B. Y. (1997). The WEPP watershed model: I. Hydrology and erosion. *Transactions of the ASABE*, 40(4), 921–933.

Baffaut, C., Nearing, M. A., Ascough, J. C., & Liu, B. (1997). The WEPP Watershed Model: II. Sensitivity analysis and discretization on small watersheds. *Transactions of the ASABE*, 40(4), 935–943.

Beasley, D., Huggins, L., & Monke, E. (1980). ANSWER: A model for watershed planning. *Transactions of The ASABE*, 23(1), 938–944.

CADE-IDEPE. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de aguas.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Región de Magallanes y Antártica Chilena. Síntesis de Resultados. Santiago, Chile: Servicio Agrícola y Ganadero, Instituto de Desarrollo Agropecuario, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Corporación Nacional Forestal (CONAF), Ministerio de Agricultura.

Cochrane, T. A., & Flanagan, D. C. (2005). Effect of DEM resolutions in the runoff and soil loss predictions of the WEPP watershed model. *Transactions of the ASABE*, 48(1), 109–120.

Conroy, W. J., Hotchkiss, R. H., & Elliot, W. J. (2006). A Coupled upland-erosion and instream hydrodynamic-sediment transport model for evaluating sediment transport in forested watersheds. *Transactions of the ASABE*, 49(6), 1713–1722.

Croke, J., & Nethery, M. (2006). Modelling runoff and soil erosion in logged forests: Scope and application of some existing models. *Catena*, 67(1), 35–49. doi:10.1016/j.catena.2006.01.006

Dun, S., Wu, J. Q., Elliot, W. J., Robichaud, P. R., Flanagan, D. C., Frankenberger, J. R., Brown, R. E., Xu, A. C. (2009). Adapting the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for forest applications. *Journal of Hydrology*, 366(1), 46–54. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.019

Ebrahimpour, M., Balasundram, S. K., Talib, J., Anuar, A., & Memarian, H. (2011). Accuracy of GeoWEPP in estimating sediment load and runoff from a tropical watershed. *Malaysian Journal of Soil Science*, 15(1), 23–33.

Elliot, W., Hall, D., & Scheele, D. (1999). WEPP: Road. WEPP interface for predicting forest road runoff, erosion and sediment delivery. Technical Documentation. Fort Collins: USDA Forest Service. Rocky Mountain Research Station and San Dimas Technology and Development Center.

Elliot, W., & Robichaud, P. (2001). Comparing erosion risks from forest operations to wildfire. Seattle: College of Forest Resources, University of Washington and International Union of Forestry Research Organizations.

Fairfield, J., & Leymarie, P. (1991). Drainage networks from grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 30(6), 1681–1692.

Flanagan, D. C., & Livingstone, S. J. (1995). WEPP User Summary. NSERL Report No 11. West Lafayette: USDA Forest Service. Agricultural Research Service (ARS) National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL).

Flanagan, D. C., & Nearing, M. A. (2000). Sediment particle sorting on hillslope profiles in the WEPP model. *Transactions of the ASAE*, 43(3), 573–583.

- Gallant, J., & Wilson, J. (1996). TAPES-G: A grid-based terrain analysis program for the environmental sciences. *Computers & Geosciences*, 22(7), 713–722. doi:10.1016/0098-3004(96)00002-7
- Ganapuram, S., Kumar, G. T. V., Krishna, I. V. M., Kahya, E., & Demirel, M. C. (2009). Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Advances in Engineering Software*, 40(7), 506–518. doi:10.1016/j.advensoft.2008.10.001
- Garbrecht, J., & Martz, L. (1999). An Overview of TOPAZ: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parametrization. Report No GRL99-1. El Reno: USDA Forest Service. Agricultural Research Service (ARS), Grazinglands Research Laboratory.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(1), 275–370. doi:10.1130/0016-7606(1945)56
- Ijjasz-Vasquez, E. J., & Bras, R. L. (1995). Scaling regimes of local slope versus contributing area in digital elevation models. *Geomorphology*, 12(4), 299–311. doi:10.1016/0169-555X(95)00012-T
- IUSS grupo de trabajo WRB. (2007). Base de referencia mundial del recurso suelo 2006, primera actualización 2007. Reporte No 103. Roma: International Union of Soil Sciences (IUSC), World Soil Information ISRIC, Food and Agriculture Organization (FAO).
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled seamless SRTM data V4. International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Recuperado de: <http://srtm.csi.cgiar.org>

Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for Geographic Information System analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1593–1600.

Knisel, W. (1980). CREAMS, A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. Report No 26. Washington: USDA Forest Service.

Lacroix, M. P., Martz, L. W., Kite, G. W., & Garbrecht, J. (2002). Using digital terrain analysis modeling techniques for the parameterization of a hydrologic model. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 125–134. doi:10.1016/S1364-8152(01)00042-1

Laflen, J. M., Flanagan, D. C., & Engel, B. A. (2004). Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(2), 289–297.

Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539. doi:10.1002/ldr.472

Liu, B. Y., Nearing, M. A., Baffaut, C., & Ascough, J. C. (1997). The WEPP watershed model: III comparisons to measured data from small watersheds. *Transactions of the ASABE*, 40(4), 945–952.

López-Vicente, M., Navas, a., & Machín, J. (2009). Geomorphic mapping in endorheic catchments in the Spanish Pyrenees: An integrated GIS analysis of karstic features. *Geomorphology*, 111(1-2), 38–47. doi:10.1016/j.geomorph.2008.03.014

Martz, L., & Garbrecht, J. (1992). Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from Digital Elevation Models. *Computers & Geosciences*, 18(6), 747–761.

Miller, M. E., MacDonald, L. H., Robichaud, P. R., & Elliot, W. J. (2011). Predicting post-fire hillslope erosion in forest lands of the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 20(8), 982. doi:10.1071/WF09142

- Minkowski, M., & Renschler, C. (2008). *GeoWEPP for ArcGIS 9.x Full Version Manual*. Buffalo: Department of Geography, The State University of New York at Buffalo.
- Morris, D., & Heerdegen, R. (1988). Automatically derived catchment boundary and channel networks and their hydrological applications. *Geomorphology*, 1(2), 131–141.
- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & Finkler, S. C. (1989). A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASABE*, 32(5), 1587–1593.
- Nearing, M. A., Jetten, V., Baffaut, C., Couturier, A., Cerdan, O., Hernandez, M., Lebissonais, Y., Nichols, M., Nunes, J., Renschler, C. (2005). Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 61(2), 131–154. doi:10.1016/j.catena.2005.03.007
- Nicks, A., Lane, L., & Gander, G. (1995). Chapter 2: Weather generator. In *USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. D. C. Flanagan and M.A. Nearing, eds. NSERL Report No 10. West Lafayette: USDA Forest Service, Agriculture Research Service (ARS), National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL).
- O’Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, 323–344.
- Oldeman, L. R. (1992). *Global Extent of Soil Degradation*. Bi-Annual Report 1991-1992. Wageningen: World Soil Information ISRIC.
- Pandey, A., Chowdary, V. M., Mal, B. C., & Billib, M. (2009). Application of the WEPP model for prioritization and evaluation of best management practices in an Indian watershed. *Hydrological Processes*, 23(1), 2997–3005. doi:10.1002/hyp

- Papanicolaou, A. N., Bdour, A., & Wicklein, E. (2010). One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams. *Journal of Hydraulic Research*, 42(4), 357–375.
- Pieri, L., Bittelli, M., Wu, J. Q., Dun, S., Flanagan, D. C., Pisa, P. R., Ventura, F., Salvatorelli, F. (2007). Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. *Journal of Hydrology*, 336(1), 84–97. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.12.014
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffauri, R., Blair, R. (1995). Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science*, 267(5201), 1117–1123.
- Renard, K., Foster, G., Weesis, D., McCool, D., & Yoder, D. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agricultural Handbook No 703. Washington: USDA Forest Service.
- Renschler, C. S. (2003). Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach. *Hydrological Processes*, 17(5), 1005–1017. doi:10.1002/hyp.1177
- Renschler, C. S., & Harbor, J. (2002). Soil erosion assessment tools from point to regional scales - the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Science*, 47(1), 189–209.
- Shaw, D., Martz, L., & Pietroniro, A. (2005). A methodology for preserving channel flow networks and connectivity patterns in large-scale distributed hydrological models. *Hydrological Processes*, 19(1), 149–168. doi:10.1002/hyp.5765
- SSL. (1996). Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No 42. Version 3. USDA-SSL Soil Survey Laboratory.

Tachikawa, M., Hato, M., Kaku, & Iwasaki, A. (2011). The characteristics of ASTER GDEM version 2. IGARSS. Recuperado de: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>

Tarboton, D. (1997). A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309–319.

Tarboton, D. G., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 5(1), 81–100.

Toma, L., Wickremesinghe, R., Arge, L., Chase, J., Vitter, J., Halpin, P., & Urban, D. (2001). Flow computation on massive grids. In *Proceedings of the ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems* (p. 82). New York: ACM Press. doi:10.1145/512178.512180

Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, & Universidad Católica de Temuco. (1999). *Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe nacional con variables ambientales*. Santiago, Chile: Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y Corporación Nacional Forestal (CONAF) con apoyo del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF).

Universidad de Chile. (2010). *Informe País. Estado del Medio Ambiente en Chile 2008*. Santiago, Chile: Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Centro de Análisis de Políticas Públicas (CAPP), Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile.

Wischmeier, W., & Smith, D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agricultural Handbook No 282. Washington: USDA Forest Service.

- Woolhiser, D., Smith, R., & Goodrich, D. (1990). KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. Washington: USDA Forest Service.
- Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T., & Musiake, K. (2003). Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, 17(14), 2913–2928. doi:10.1002/hyp.1441
- Yu, X., Zhang, X., & Niu, L. (2009). Simulated multi-scale watershed runoff and sediment production based on GeoWEPP model. *International Journal of Sediment Research*, 24(4), 465–478.
- Zar, J. (2010). *Biostatistical Analysis* (5th ed.). New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Zhang, J. X., Wu, J. Q., Chang, K., Elliot, W. J., & Dun, S. (2009). Effects of DEM source and resolution on WEPP hydrologic and erosion simulation: A case study of two forest watersheds in northern Idaho. *Transactions of the ASABE*, 52(2), 447–457.

ANEXOS

ANEXO A: CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS TRES PASOS Y RINCÓN

Para comparar las cuencas Tres Pasos y Rincón se determinaron sus principales características geomorfológicas tales como la curva hipsográfica, el índice de Gravelius y la curva de distribución de pendientes. Estas características se determinaron haciendo uso de los MDE seleccionados para el estudio cortados con la forma de las cuencas que fue determinada con el modelo TOPAZ.

A.1. Curvas Hipsográficas

La curva hipsográfica muestra como varía el área de drenaje con respecto a la altura de la superficie de la cuenca. Se construyeron las curvas para ambas cuencas usando los MDE SRTM de 90 m, ASTER de 30 m y ASTER de 90 m. Los resultados obtenidos en los tres MDE de la misma cuenca fueron muy similares entre sí por lo que en la Figura D-1 sólo se muestran los resultados obtenidos con MDE SRTM de 90 m para las cuencas Tres Pasos y Rincón. Se puede ver que el comportamiento de ambas curvas es similar, sin embargo la cuenca Rincón posee un mayor rango de elevaciones.

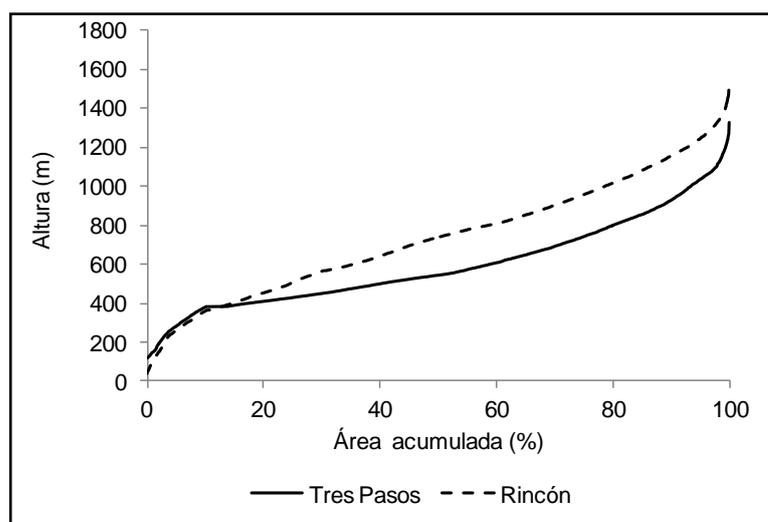


Figura A-1: Curvas hipsográficas de las cuencas Tres Pasos y Rincón determinadas usando el MDE SRTM de 90 m. Fuente: Elaboración propia.

A.2. Índice de Gravelius

El índice de Gravelius, también conocido como coeficiente de compacidad, representa la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo que contenga la misma área de la cuenca. El índice se determina con la siguiente relación:

$$K = 0,282 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{A-1})$$

donde K es el índice de Gravelius, P y A son el perímetro (km) y el área (km²) de la cuenca hidrográfica respectivamente. En la tabla A-1 se muestran el perímetro, área e índice de Gravelius de las cuencas Tres Pasos y Rincón. La forma de las cuencas se determinó con el modelo TOPAZ usando los MDE seleccionados.

Tabla A-1: Área, perímetro e índice de Gravelius de las cuencas Tres Pasos y Rincón.

	Tres Pasos	Rincón
P (km)	44	47
A (km ²)	70	73
K	1,48	1,56

A.3. Distribución de pendientes

La curva de distribución de pendientes se construyó llevando al eje de las abscisas los valores del porcentaje de área acumulada obtenida hasta un determinado porcentaje de pendiente. Estas curvas se construyeron usando los datos de los mapas de pendientes contruidos a partir de los MDE SRTM de 90 m, ASTER de 30 m y ASTER de 90 m de cada cuenca. Las curva de pendientes de los MDE de 90 m de cada cuenca fueron muy similares entre sí, por lo que en la Figura A-2 sólo se muestran las curvas obtenidas para los MDE SRTM de 90 m y ASTER de 30 m de las cuencas Tres Pasos y Rincón. Se observa que la cuenca Rincón tiene mayores pendientes que la cuenca Tres Pasos. Además los mapas de pendientes contruidos con los MDE de 30 m presentan las mayores pendientes en ambas cuencas.

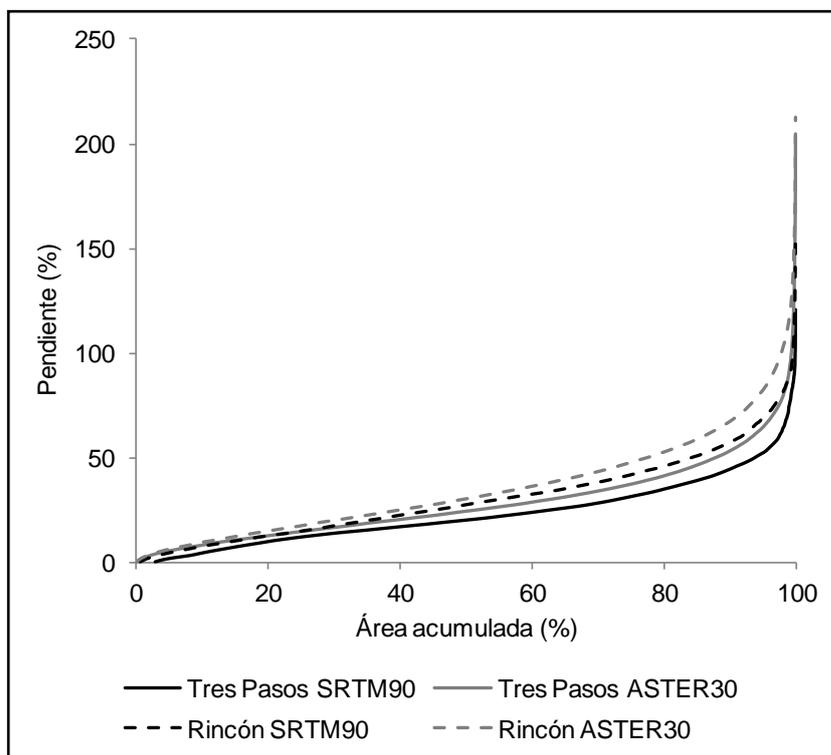


Figura A-2: Distribución de pendientes de las cuencas Tres Pasos y Rincón. Las curvas se determinaron usando los datos de los mapas de pendientes construidos con los MDE de SRTM 90 m y ASTER de 30 m. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B: COMPARACIÓN DE REDES HIDROGRÁFICAS

El método para comparación de redes hidrográficas está basado en el número de píxeles que representan canales en las imágenes obtenidas con TOPAZ, los que se comparan con una imagen de referencia. Cuando se utiliza como imagen de referencia una carta topográfica es necesario preprocesarla haciendo uso de un algoritmo en Matlab (MathWorks, Natick EE.UU.) que convierte los canales de la imagen de referencia (detectados por color) en una serie de píxeles con las mismas dimensiones que la red hidrográfica generadas por TOPAZ. Luego se realizan correcciones manuales a la red hidrográfica de referencia para eliminar aquellos posibles errores en la detección de canales. Finalmente los píxeles de ambas imágenes se cuentan con una función de Matlab.

Debido a que las redes hidrográficas generadas por TOPAZ poseen la misma resolución del MDE que les dio origen, por lo que fue necesario ajustar el ancho de los píxeles que reemplazaron los canales en la carta topográfica a la resolución de las redes hidrográficas obtenidas con los MDE de 90 m y de 30 m. A continuación se muestra el resultado del preprocesamiento de las cartas topográficas de las cuencas Rincón y Tres Pasos. Las redes hidrográficas obtenidas con Arc Hydro Tools que se usaron como referencia, no fueron preprocesadas ya que las imágenes tenían la misma resolución del MDE.

B.1. Preprocesamiento de la carta topográfica de la cuenca Tres Pasos

En la Figura B-1 se muestra en la parte superior la imagen de referencia usada para comparar con las redes hidrográficas generadas con los MDE de 90 m. Dicha imagen es el resultado de la aplicación del algoritmo de identificación de canales en la carta topográfica de la cuenca Tres Pasos y los píxeles se ajustaron al ancho de las redes hidrográficas obtenidas con TOPAZ en los MDE de 90 m. De forma similar, para poder comparar con las redes hidrográficas obtenidas con el MDE ASTER de 30 m la carta topográfica de la cuenca Tres Pasos se preprocesó para ajustar el ancho de los píxeles que identifican los canales, tal como se observa en la Figura B-2.

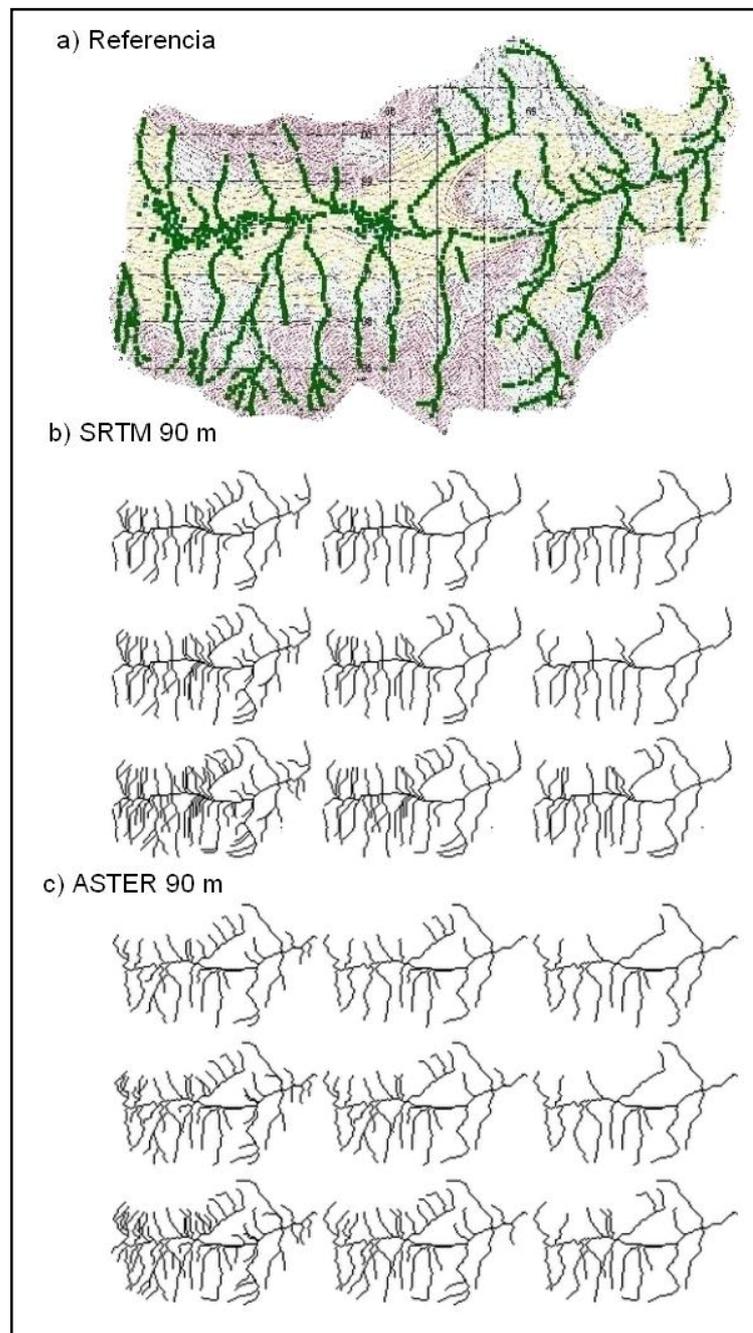


Figura B-1: Imágenes utilizadas en la comparación cuantitativa de redes hidrográficas para la cuenca Tres Pasos y los MDE de 90 m. (a) Imagen de referencia obtenida a partir del preprocesamiento realizado a la carta topográfica de la cuenca Tres Pasos aplicando el algoritmo de identificación de canales ajustando el ancho para las redes obtenidas con los MDE de 90 m. (b) Redes hidrográficas obtenidas con el modelo TOPAZ usando el MDE SRTM de 90 m y (c) ASTER de 90 m de la cuenca Tres Pasos. Fuente: Elaboración propia.

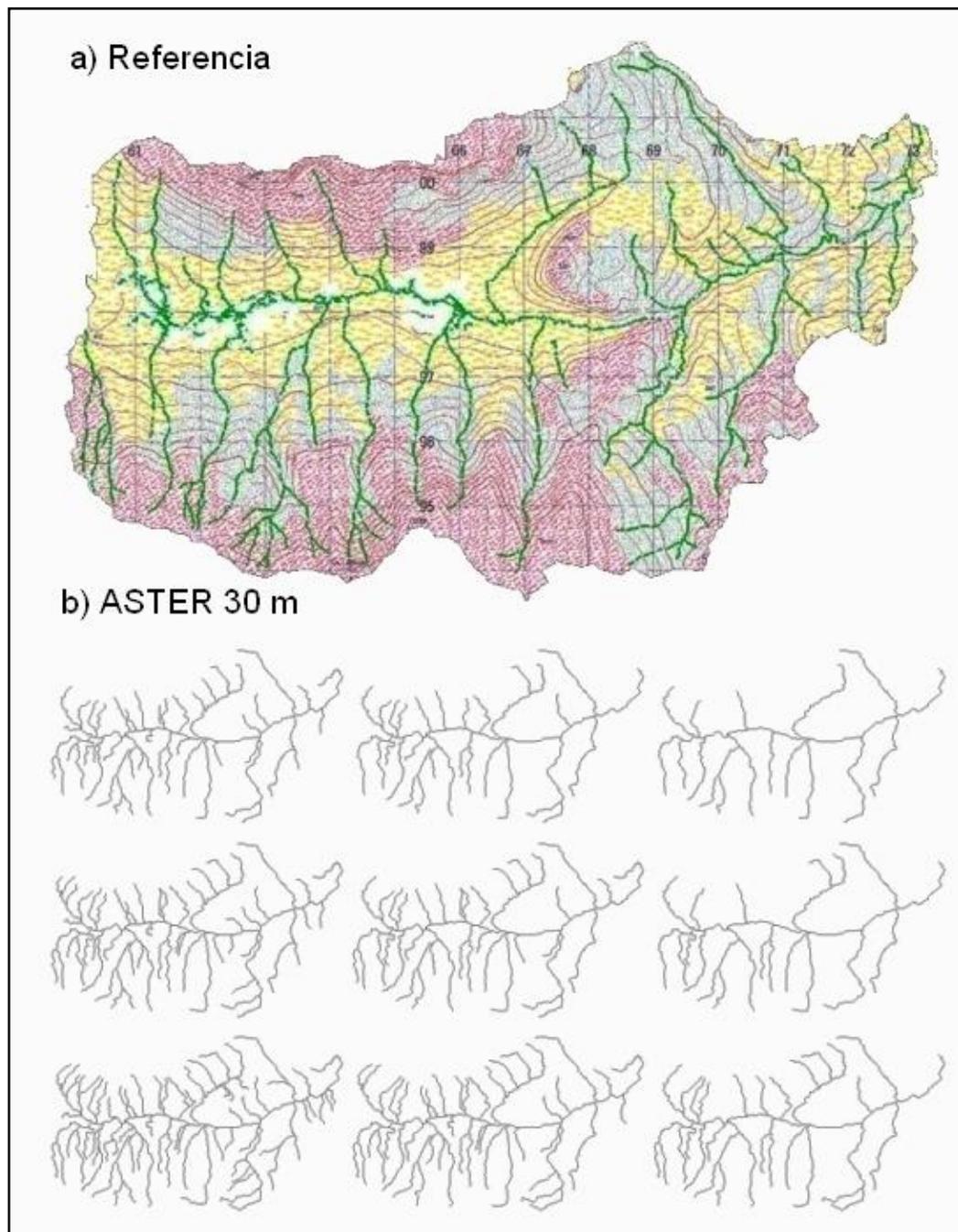


Figura B-2: Imágenes utilizadas en la comparación cuantitativa de redes hidrográficas para la cuenca Tres Pasos y el MDE de 30 m. (a) Imagen de referencia obtenida a partir del preprocesamiento realizado a la carta topográfica de la cuenca Tres Pasos aplicando el algoritmo de identificación de canales ajustando el ancho para las redes obtenidas con el MDE de 30 m. (b) Redes hidrográficas obtenidas con el modelo TOPAZ usando el MDE ASTER de 30 m de la cuenca Tres Pasos. Fuente: Elaboración propia.

B.2. Preprocesamiento de la carta topográfica de la cuenca Rincón

El mismo procedimiento se aplicó para preprocesar la carta topográfica de la cuenca Rincón, y los resultados para los MDE de 90 m se muestran en la Figura B-3 y para el MDE de 30 m en la Figura B-4.

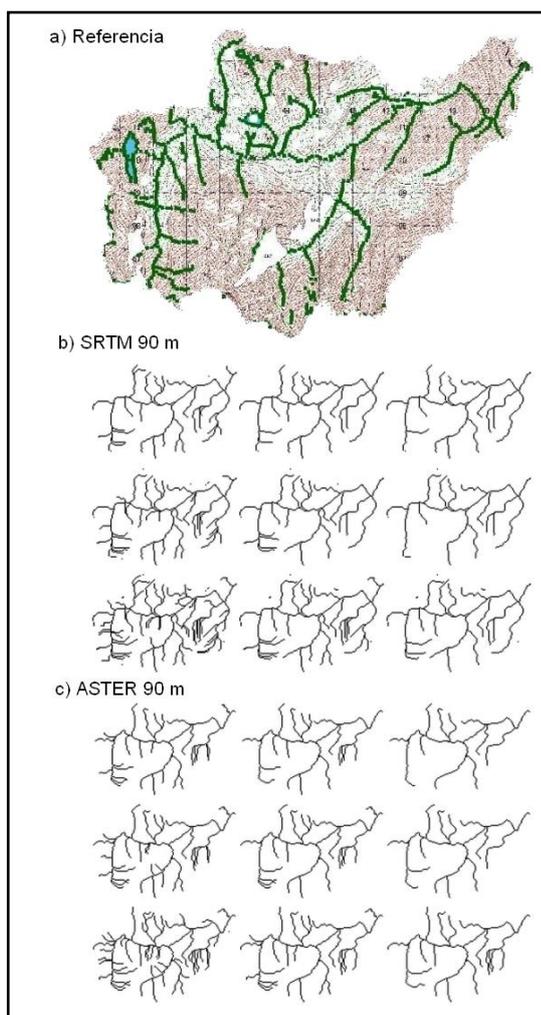


Figura B-3: Imágenes utilizadas en la comparación cuantitativa de redes hidrográficas para la cuenca Rincón y los MDE de 90 m. (a) Imagen de referencia obtenida a partir del preprocesamiento realizado a la carta topográfica de la cuenca Rincón aplicando el algoritmo de identificación de canales ajustando el ancho para las redes obtenidas con los MDE de 90 m. (b) Redes hidrográficas obtenidas con el modelo TOPAZ usando el MDE SRTM de 90 m y (c) ASTER de 90 m de la cuenca Rincón. Fuente: Elaboración propia.

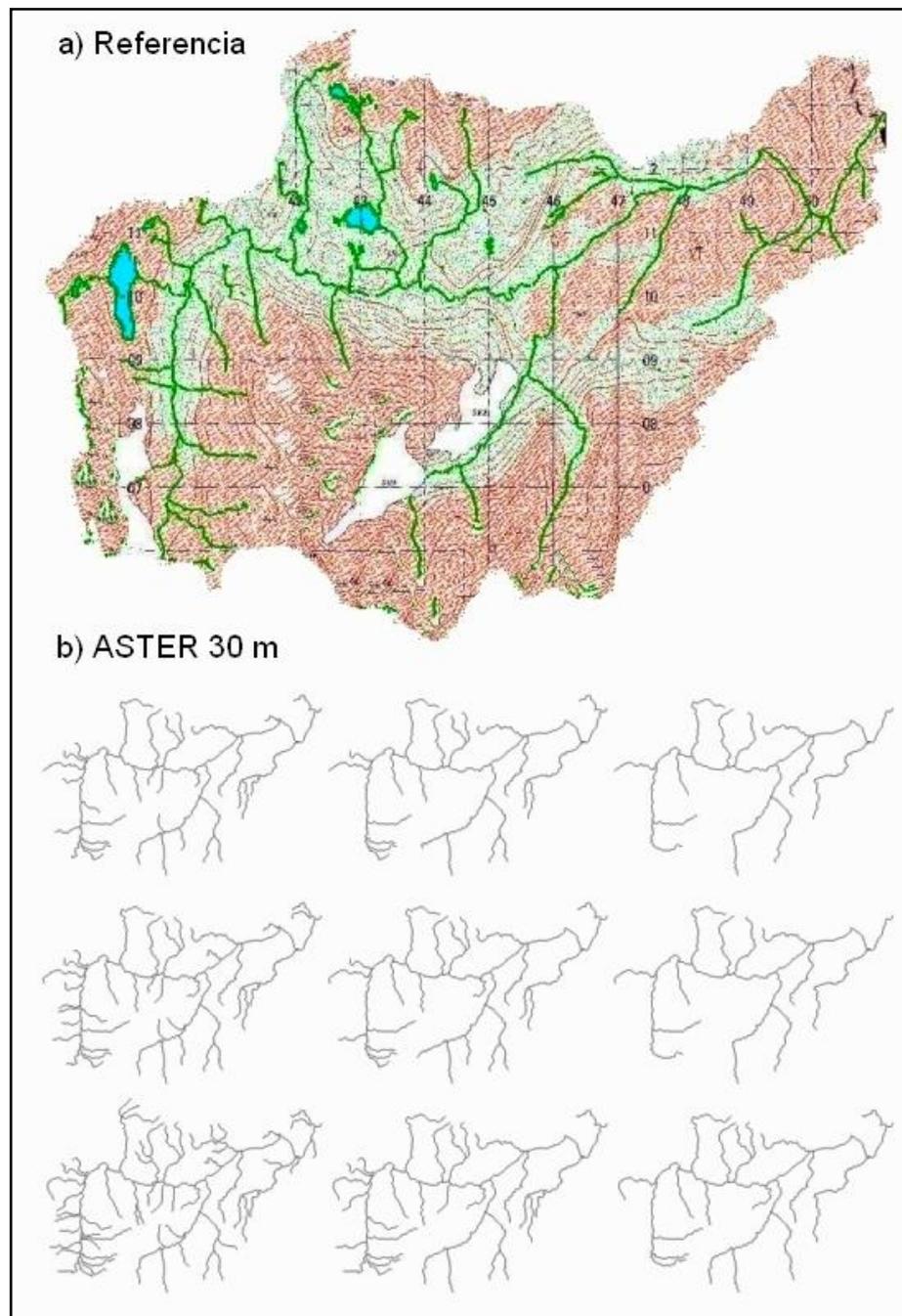


Figura B-4: Imágenes utilizadas en la comparación cuantitativa de redes hidrográficas para la cuenca Rincón y el MDE de 30 m. (a) Imagen de referencia obtenida a partir del preprocesamiento realizado a la carta topográfica de la cuenca Rincón aplicando el algoritmo de identificación de canales ajustando el ancho para las redes obtenidas con el MDE de 30 m. (b) Redes hidrográficas obtenidas con el modelo TOPAZ usando el MDE ASTER de 30 m de la cuenca Rincón. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO C: VARIABLES METEOROLÓGICAS PARA LA MODELACIÓN EN GEOWEPP

Este archivo fue construido en base a 30 años de datos diarios de la estación Torres del Paine (51°11' S, 72°58' W). Y también se usaron registros horarios de radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. En la Figura C-1 se muestra la distribución de precipitación y temperatura anual de este archivo climático y en la Figura C-2 la distribución mensual. De este análisis de la estación Torres del Paine destaca que los años más lluviosos fueron 1998, 1990 y 2009. Las temperaturas máximas se mantuvieron alrededor de 11 °C y las mínimas en 3°C en promedio. El número de eventos de precipitación promedio fue de 130 y produjeron 707 mm de precipitación promedio anual. En cuanto al análisis mensual se puede decir que los meses más lluviosos fueron marzo y abril, las temperaturas más altas ocurrieron en los meses de enero y diciembre y las más bajas en junio. En promedio ocurrieron 11 eventos de precipitación al mes que produjeron 59 mm como promedio mensual.

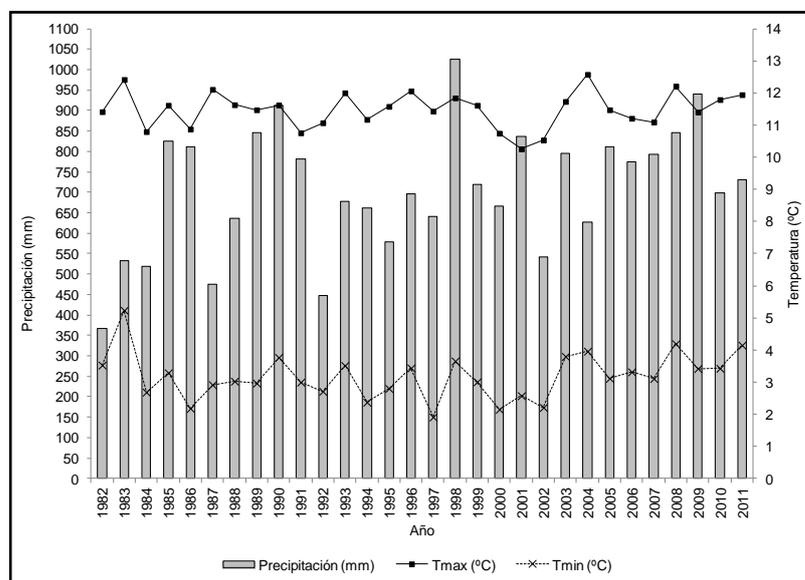


Figura C-1: Distribución anual de la precipitación y temperatura utilizados en la simulación. Fuente: Elaboración propia.

Otros parámetros importantes para la simulación son la radiación solar, velocidad de viento y temperatura de rocío, estos también se obtuvieron de la estación Torres del

Paine. En la Figura C-3 se muestra la distribución anual de estos datos y en la Figura C-4 la distribución mensual.

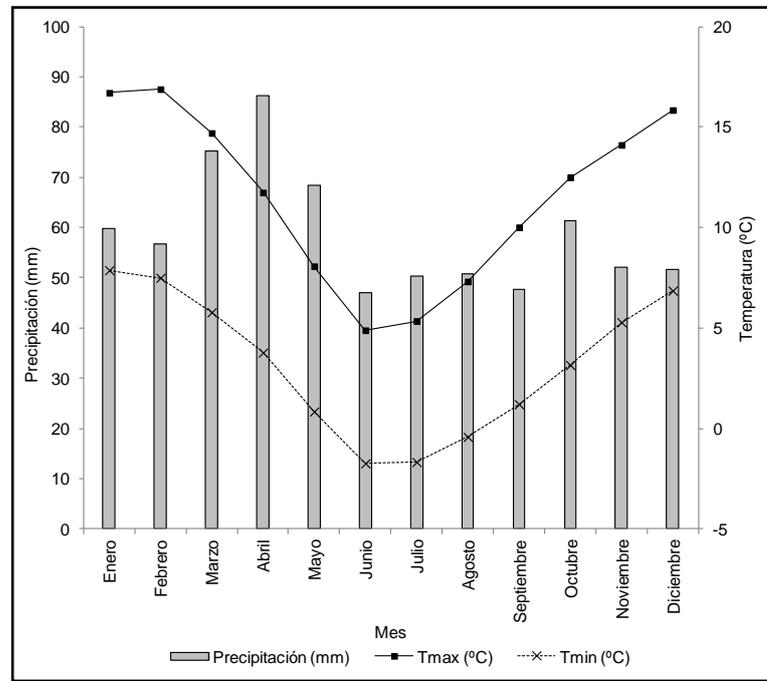


Figura C-2: Distribución mensual como promedio de 30 años de la precipitación y la temperatura utilizados en la simulación. Fuente: Elaboración propia.

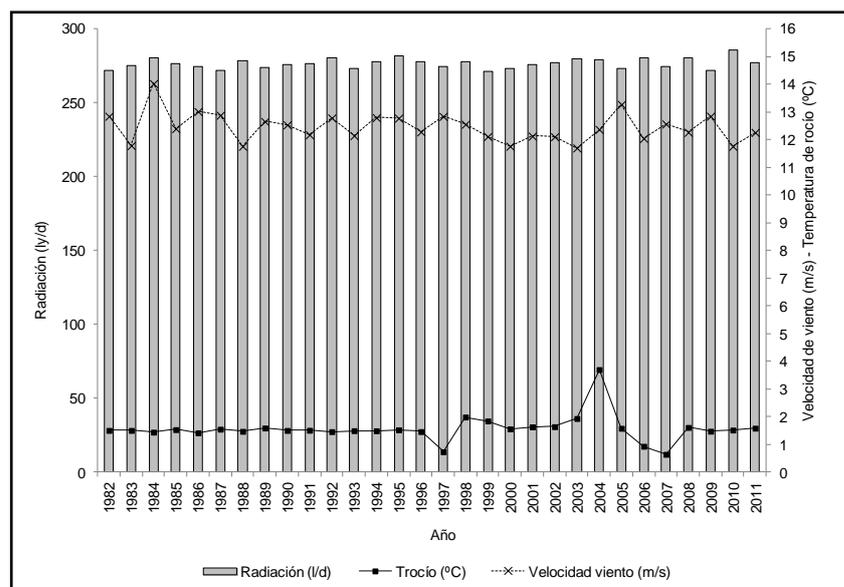


Figura C-3: Distribución anual de la radiación solar, velocidad del viento y temperatura de rocío utilizados en la simulación. Fuente: Elaboración propia.

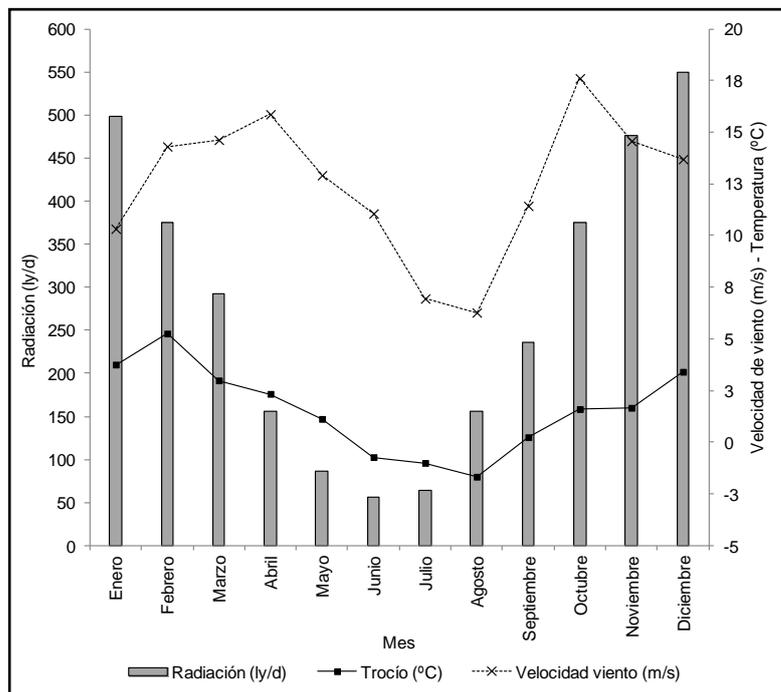


Figura C-4: Distribución mensual como promedio de 30 años de la radiación solar, velocidad del viento y temperatura de rocío utilizados en la simulación. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO D: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN GEOWEPP

Para este estudio se llevaron a cabo 54 simulaciones en GeoWEPP usando 9 combinaciones de CSA y MSCL en tres MDE de dos cuencas. En la Figura D-1 se muestra la interfaz de GeoWEPP donde se llevaron a cabo dichas simulaciones. En la Tabla D-1 se la asigna una identificación a cada simulación para facilitar la lectura de los reportes de resultado que se muestran como ejemplo en los siguientes anexos.

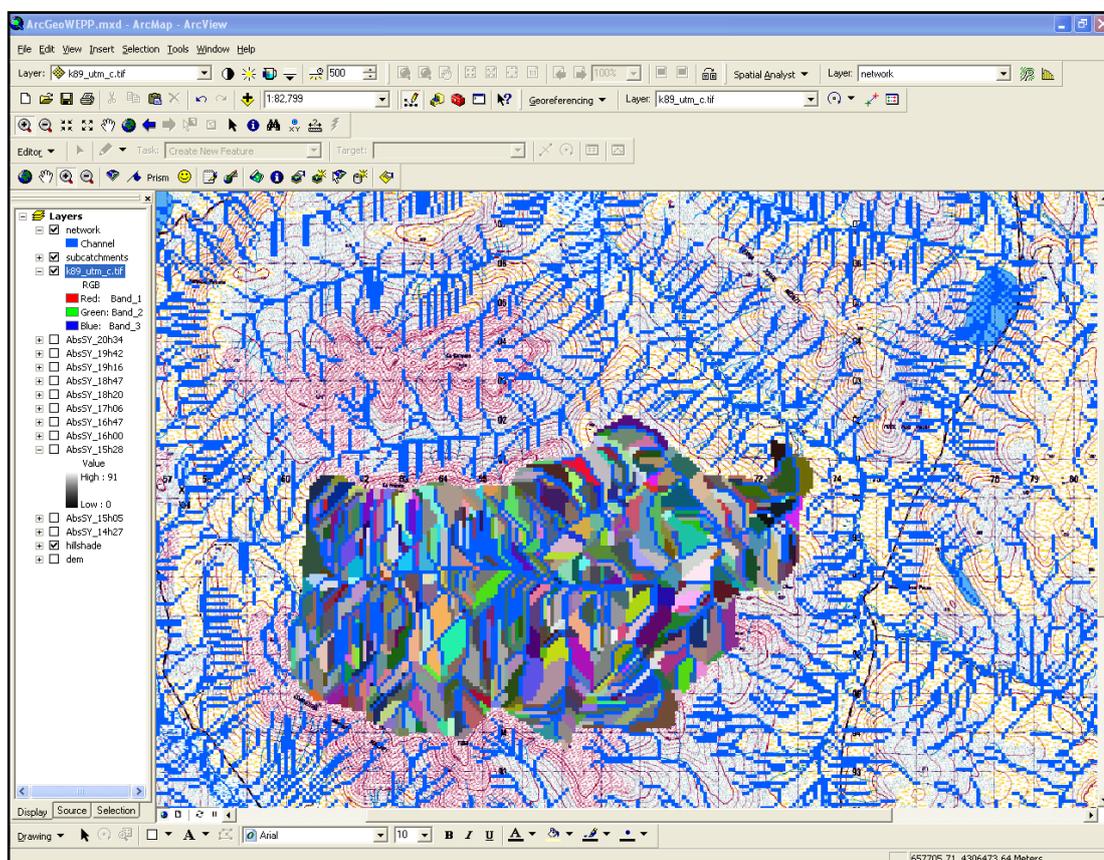


Figura D-1: Interfaz del modelo GeoWEPP. En la figura se muestra como ejemplo: El mapa cartográfico, la red hidrográfica y la delimitación de laderas generadas con TOPAZ para la cuenca Tres Pasos. Fuente: GeoWEPP.

Tabla D-1: Código de identificación de las simulaciones realizadas en GeoWEPP para las cuencas Tres Pasos y Rincón.

CSA-MSCL	Tres Pasos			Rincón		
	SRTM	ASTER	ASTER	SRTM	ASTER	ASTER
	90 m	30 m	90 m	90 m	30 m	90 m
5-1000	TP01	TP02	TP03	R01	R02	R03
10-1000	TP04	TP05	TP06	R04	R05	R06
15-1000	TP07	TP08	TP09	R07	R08	R09
5-1500	TP10	TP11	TP12	R10	R11	R12
10-1500	TP13	TP14	TP15	R13	R14	R15
15-1500	TP16	TP17	TP18	R16	R17	R18
5-2000	TP19	TP20	TP21	R19	R20	R21
10-2000	TP22	TP23	TP24	R22	R23	R24
15-2000	TP25	TP26	TP27	R25	R26	R27

A continuación, se muestran los reportes del modelo GeoWEPP para las simulaciones donde se usaron los valores de CSA y MSCL que arrojaron el índice F más cercano a 1, comparando con las cartas topográficas.

D.1. Resultados de la simulación TP16

WEPP Watershed Simulation for Representative Hillslopes and Channels

30 YEAR AVERAGE ANNUAL VALUES FOR WATERSHED

Hillslopes	Runoff Volume (m ³)	Subrunoff Volume (m ³)	Soil Loss (kg)	Sediment Deposition (kg)	Sediment Yield (kg)
Hill 1 (23)	55225.60	28.85	9825156.50	0.00	9825129.21
Hill 2 (22)	57837.11	31.37	12943140.36	0.00	12943080.62
Hill 3 (33)	36473.78	21.16	3377954.64	0.00	3377955.39
Hill 4 (32)	45186.33	25.42	9080247.76	0.00	9080283.59
Hill 5 (31)	3096.17	1.27	236986.17	0.00	236987.04
Hill 6 (53)	16819.63	10.79	4073361.06	0.00	4073354.75
Hill 7 (52)	7158.07	5.74	477852.73	0.00	477854.63
Hill 8 (63)	16392.04	3.11	5758818.87	0.00	5758836.78
Hill 9 (62)	4665.49	4.38	852266.76	0.00	852267.00
Hill 10 (72)	18788.69	17.92	1601585.01	0.00	1601579.07
Hill 11 (73)	47463.30	21.61	11857795.53	0.00	11857871.73
Hill 12 (82)	10377.82	10.44	804251.33	0.00	804250.18
Hill 13 (83)	2043.92	4.81	622.98	0.00	622.98
Hill 14 (81)	2606.38	0.61	486697.58	0.00	486697.05
Hill 15 (93)	7561.33	5.61	241997.17	0.00	241997.67
Hill 16 (92)	7090.10	8.10	419577.90	0.00	419578.33
Hill 17 (91)	2696.63	0.91	566197.17	0.00	566198.88
Hill 18 (103)	24790.18	10.91	2959161.37	0.00	2959168.89

Hill 19 (102)	35189.11	12.49	10423481.98	0.00	10423432.61
Hill 20 (113)	36039.48	22.44	4866816.17	0.00	4866801.24
Hill 21 (112)	25243.19	60.12	6695054.99	0.00	6695047.21
Hill 22 (111)	4293.90	1.26	348799.90	0.00	348799.83
Hill 23 (123)	5097.10	1.51	79729.98	68296.64	11433.50
Hill 24 (122)	4026.10	4.12	607890.58	0.00	607890.54
Hill 25 (132)	9087.31	1.81	1380330.22	1357744.43	22587.68
Hill 26 (133)	125.51	0.01	16.35	0.00	16.35
Hill 27 (153)	11650.30	35.66	1359575.83	0.00	1359573.62
Hill 28 (152)	13448.51	31.32	2030510.04	0.00	2030510.03
Hill 29 (151)	3235.14	4.21	1225185.18	0.00	1225185.14
Hill 30 (163)	1922.48	0.58	360.66	0.00	360.66
Hill 31 (162)	13647.81	3.81	2759494.23	284840.37	2474647.77
Hill 32 (173)	26682.43	32.17	4867342.19	0.00	4867373.55
Hill 33 (172)	8841.96	32.25	554201.26	0.00	554198.57
Hill 34 (171)	3038.26	2.76	1180690.80	0.00	1180697.51
Hill 35 (182)	1588.25	0.59	94567.38	90327.26	4240.69
Hill 36 (193)	6596.22	2.98	1338179.05	1303782.92	34396.28
Hill 37 (203)	26815.56	16.25	11569015.09	0.00	11569042.10
Hill 38 (202)	11429.71	4.12	520467.68	0.00	520469.70
Hill 39 (213)	29405.80	42.66	5449186.66	0.00	5449168.49
Hill 40 (212)	20979.36	22.17	1236007.65	0.00	1236007.63
Hill 41 (211)	2890.92	3.11	876964.92	0.00	876964.61
Hill 42 (222)	493.38	0.08	91.44	0.00	91.44
Hill 43 (233)	9998.31	3.60	1964827.95	1089091.53	875747.87
Hill 44 (232)	1002.09	0.23	177.51	0.00	177.51
Hill 45 (243)	6235.48	12.83	113890.58	0.00	113890.91
Hill 46 (242)	12854.43	7.57	411972.70	0.00	411974.94
Hill 47 (241)	3141.55	1.73	882718.60	0.00	882719.95
Hill 48 (253)	4146.98	4.05	739654.67	0.00	739658.18
Hill 49 (252)	5389.09	2.71	1155010.52	0.00	1155007.69
Hill 50 (262)	2549.22	0.34	2756.98	0.00	2756.97
Hill 51 (273)	26358.64	18.20	1544358.67	0.00	1544356.96
Hill 52 (272)	33720.89	43.90	7584940.41	0.00	7584953.35
Hill 53 (271)	4198.87	4.18	887812.34	0.00	887815.63
Hill 54 (283)	11727.38	3.72	2154069.50	1473237.23	680838.26
Hill 55 (282)	12063.31	2.39	1713291.90	663762.13	1049535.20
Hill 56 (293)	5322.86	26.50	115285.13	0.00	115284.77
Hill 57 (292)	17848.21	14.79	1040711.93	0.00	1040717.08
Hill 58 (291)	3486.66	1.16	246013.28	0.00	246012.74
Hill 59 (303)	122.69	0.15	20.81	0.00	20.81
Hill 60 (302)	394.89	0.23	73.13	0.00	73.13
Hill 61 (313)	1190.85	9.29	369.44	0.00	369.44
Hill 62 (312)	19907.76	20.71	3259163.88	0.00	3259171.75
Hill 63 (311)	3149.10	1.04	331245.44	0.00	331245.39
Hill 64 (322)	135.69	0.18	30.07	0.00	30.07
Hill 65 (333)	127.58	0.25	28.34	0.00	28.34
Hill 66 (332)	511.15	0.17	97.06	0.00	97.06
Hill 67 (343)	9204.37	2.67	1286478.03	0.00	1286473.80
Hill 68 (342)	2275.44	0.64	922.12	0.00	922.12
Hill 69 (353)	13974.77	12.95	1387606.07	0.00	1387603.10
Hill 70 (352)	2996.21	13.41	14925.45	0.00	14925.46
Hill 71 (351)	2715.99	1.35	654058.06	0.00	654057.03
Hill 72 (363)	840.46	0.24	152.63	0.00	152.63
Hill 73 (362)	5299.86	1.07	435386.12	1390.22	433994.93
Hill 74 (373)	15961.21	17.49	704101.46	0.00	704107.91
Hill 75 (372)	14602.80	17.40	699050.42	0.00	699047.96
Hill 76 (371)	2737.49	1.83	526549.15	0.00	526548.23
Hill 77 (382)	392.42	0.22	75.23	0.00	75.23
Hill 78 (392)	24669.81	15.96	5420763.24	0.00	5420784.59
Hill 79 (391)	3482.85	2.35	976622.65	0.00	976626.13
Hill 80 (393)	15483.51	25.02	2865609.68	0.00	2865597.13
Hill 81 (401)	3565.11	2.82	1156383.60	0.00	1156384.47
Hill 82 (402)	8051.27	22.79	1357122.68	0.00	1357111.25
Hill 83 (403)	5033.34	5.22	38149.37	0.00	38149.44
Hill 84 (411)	3572.19	2.63	1128844.72	0.00	1128839.02
Hill 85 (413)	1063.37	18.12	5391.05	0.00	5391.09
Hill 86 (412)	1231.97	8.81	980.70	0.00	980.69
Hill 87 (421)	3375.88	2.60	1137681.28	0.00	1137683.39
Hill 88 (423)	3463.34	26.07	349700.48	0.00	349699.12
Hill 89 (422)	2966.79	9.17	34444.49	0.00	34444.50
Hill 90 (431)	4027.74	4.21	1634264.09	0.00	1634270.52
Hill 91 (433)	13285.73	19.47	3382143.30	0.00	3382149.35
Hill 92 (432)	6524.29	24.72	1117423.02	0.00	1117425.75
Hill 93 (441)	4973.50	5.83	1241190.03	0.00	1241184.80
Hill 94 (443)	8262.38	21.01	1247409.90	0.00	1247406.80
Hill 95 (442)	2286.03	13.92	24821.56	0.00	24821.62
Hill 96 (451)	4675.08	3.33	1459099.39	0.00	1459101.46
Hill 97 (453)	5600.82	11.01	142969.70	0.00	142969.39
Hill 98 (452)	382.88	0.06	31.79	0.00	31.79
Hill 99 (461)	3482.74	4.03	781082.88	0.00	781080.80
Hill 100 (462)	1667.18	20.07	21772.30	0.00	21772.28
Hill 101 (471)	4803.98	3.91	1483278.95	0.00	1483280.42

Hill 102 (473)	10309.49	26.14	1622245.64	0.00	1622244.20
Hill 103 (472)	4420.81	18.76	138628.57	0.00	138628.19
Hill 104 (482)	56005.56	31.63	29647408.09	0.00	29647425.01
Hill 105 (483)	25771.83	19.39	3112854.51	0.00	3112844.80
Hill 106 (493)	7998.51	6.51	416843.41	0.00	416841.99
Hill 107 (491)	3185.12	1.37	1016683.97	0.00	1016682.89
Hill 108 (492)	3825.24	9.46	109873.62	0.00	109873.24
Hill 109 (501)	3403.35	1.89	447920.09	0.00	447919.90
Hill 110 (502)	8821.75	10.08	449541.93	0.00	449542.50
Hill 111 (503)	13897.60	3.34	38184.50	0.00	38184.73
Hill 112 (511)	3167.06	0.61	44342.76	0.00	44342.95
Hill 113 (512)	7657.88	7.97	301428.88	0.00	301428.65
Hill 114 (513)	3917.91	7.32	30670.91	0.00	30671.15
Hill 115 (523)	22077.29	16.79	737494.20	0.00	737487.31
Hill 116 (521)	2948.75	1.73	492656.20	0.00	492653.89
Hill 117 (522)	38939.78	15.91	3264514.98	0.00	3264519.08

Channels Flow and Impoundments	Discharge Volume (m ³)	Sediment Yield (tonne)	Soil Loss (kg)	Upland Charge (m ³)	Subsurface Volume (m ³)
Channel 1 (514)	14786.6	199.3	27162.5	14758.2	0.0
Channel 2 (504)	26145.9	265.6	52369.9	26137.3	0.0
Channel 3 (494)	15051.3	365.4	21286.0	15025.8	0.0
Channel 4 (484)	122951.1	13450.9	817230.3	123024.3	0.0
Channel 5 (474)	19589.1	703.9	106438.1	19583.0	0.0
Channel 6 (464)	5191.5	209.1	35915.4	5173.6	0.0
Channel 7 (454)	10694.7	412.5	138932.3	10672.5	0.0
Channel 8 (444)	15583.3	570.7	104139.6	15562.6	0.0
Channel 9 (434)	23896.8	2398.3	469294.7	23886.0	0.0
Channel 10 (424)	9862.6	362.8	70115.6	9843.7	0.0
Channel 11 (414)	5908.1	332.6	321366.6	5897.0	0.0
Channel 12 (404)	16700.3	571.4	40496.8	16679.9	0.0
Channel 13 (394)	43678.0	3180.2	172746.1	43679.4	0.0
Channel 14 (384)	60797.1	2845.1	204552.6	60770.6	0.0
Channel 15 (374)	33374.9	487.9	56332.9	33337.6	0.0
Channel 16 (364)	100273.8	5502.8	2314012.9	100283.2	0.0
Channel 17 (354)	19738.1	471.5	31048.5	19714.2	0.0
Channel 18 (344)	131485.6	8096.3	3830358.5	131493.1	0.0
Channel 19 (334)	138045.6	7648.2	5177484.6	138032.5	0.0
Channel 20 (324)	148022.8	11698.7	4221993.7	148039.6	0.0
Channel 21 (314)	24312.2	924.9	41323.6	24278.3	0.0
Channel 22 (304)	172839.1	21156.7	13059872.0	172840.8	0.0
Channel 23 (294)	26748.0	635.3	121773.7	26699.5	0.0
Channel 24 (284)	223351.2	29773.6	15647311.3	223371.1	0.0
Channel 25 (274)	64363.3	2446.3	1161038.8	64343.7	0.0
Channel 26 (264)	290259.8	51780.5	22544923.3	290256.6	0.0
Channel 27 (254)	323677.9	86241.0	140681890.0	323695.2	0.0
Channel 28 (244)	22271.1	372.4	183042.0	22253.2	0.0
Channel 29 (234)	356925.2	128937.1	45782689.7	356939.2	0.0
Channel 30 (224)	373011.0	101424.8	9354275.1	373001.6	0.0
Channel 31 (214)	53366.1	1516.5	102514.5	53337.1	0.0
Channel 32 (204)	464513.3	141474.4	50960900.0	464617.7	0.0
Channel 33 (194)	481784.2	211367.0	76805869.9	481806.9	0.0
Channel 34 (184)	488555.9	383174.5	175528720.7	488564.2	0.0
Channel 35 (174)	38650.2	1231.2	60950.5	38629.8	0.0
Channel 36 (164)	542714.4	656918.8	301058799.6	542771.2	0.0
Channel 37 (154)	28426.3	964.9	122159.7	28405.1	0.0
Channel 38 (144)	571152.9	1021281.9	369603861.5	571140.3	0.0
Channel 39 (134)	599928.3	1673701.7	687309528.7	599954.0	0.0
Channel 40 (124)	731948.9	2933377.2	1321840782.7	732007.3	0.0
Channel 41 (114)	65724.3	2729.6	83759.3	65660.1	0.0
Channel 42 (104)	857546.2	4287567.1	1494883872.0	857663.2	0.0
Channel 43 (94)	17381.6	594.6	187654.6	17362.2	0.0
Channel 44 (84)	15072.1	366.5	29036.5	15043.5	0.0
Channel 45 (74)	98794.3	5214.0	218612.4	98743.1	0.0
Channel 46 (64)	977434.3	4272620.3	727914322.0	977405.5	0.0
Channel 47 (54)	1016094.7	2087391.7	35513606.2	1016179.8	0.0
Channel 48 (524)	64018.5	1566.5	201463.0	63999.0	0.0
Channel 49 (34)	84857.9	2869.0	84780.6	84803.4	0.0
Channel 50 (24)	1277748.3	661452.8	1906988.3	1278069.0	0.0

129 storms produced 707.32 mm. of rainfall on an AVERAGE ANNUAL basis

5 events produced 18.39 mm. of runoff
passing through the watershed outlet on an AVERAGE ANNUAL basis

Average Annual Delivery From Channel Outlet:

Total contributing area to outlet	=	6949.51	ha
Avg. Ann. Precipitation volume in contributing area	=	49155056.	m ³ /yr
Avg. Ann. irrigation volume in contributing area	=	0.	m ³ /yr
Avg. Ann. water discharge from outlet	=	1277748.	m ³ /yr
Avg. Ann. total hillslope soil loss	=	223763.9	tonnes/yr
Avg. Ann. total channel soil loss	=	5511209.6	tonnes/yr
Avg. Ann. sediment discharge from outlet	=	661452.8	tonnes/yr
Avg. Ann. Sed. delivery per unit area of watershed	=	95.2	T/ha/yr
Sediment Delivery Ratio for Watershed	=	0.115	

Sediment Particle Information Leaving Channel:

Class	Diameter (mm)	Specific Gravity	Particle Composition			% O.M.	Fraction In Flow Exiting
			% Sand	% Silt	% Clay		
1	0.002	2.60	0.0	0.0	100.0	7.3	0.636
2	0.010	2.65	0.0	100.0	0.0	0.0	0.000
3	0.049	1.80	0.0	43.2	56.8	4.1	0.363
4	0.692	1.60	57.3	24.9	17.8	1.3	0.001
5	0.200	2.65	100.0	0.0	0.0	0.0	0.000

Distribution of Primary Particles and Organic Matter in the Eroded Sediment:

type	fraction
clay	0.842
silt	0.157
sand	0.001
organic matter	0.061

Index of specific surface	=	194.62	m ² /g of total sediment
Enrichment ratio of specific surface	=	2.34	

D.2. Resultados de la simulación TP26

WEPP Watershed Simulation for Representative Hillslopes and Channels

30 YEAR AVERAGE ANNUAL VALUES FOR WATERSHED

Hillslopes	Runoff Volume (m ³)	Subrunoff Volume (m ³)	Soil Loss (kg)	Sediment Deposition (kg)	Sediment Yield (kg)
Hill 1 (22)	49894.65	25.10	10658091.35	0.00	10658140.58
Hill 2 (23)	44402.02	24.83	8279886.25	82353.33	8197535.60
Hill 3 (33)	303.93	0.85	11289.48	0.00	11289.50
Hill 4 (32)	48.29	1.26	74.96	0.00	74.96
Hill 5 (42)	42939.58	36.79	7667206.39	0.00	7667196.82
Hill 6 (43)	39810.70	25.59	4379453.50	0.00	4379450.90
Hill 7 (41)	2529.38	0.91	156354.00	836.25	155517.57
Hill 8 (53)	39157.27	5.29	5276740.28	146005.18	5130704.96
Hill 9 (52)	12839.78	8.08	881931.43	0.00	881936.06
Hill 10 (63)	72397.19	24.09	11063427.20	0.00	11063397.42
Hill 11 (62)	29108.06	37.81	2576787.46	0.00	2576787.51
Hill 12 (61)	2620.53	0.77	511264.11	0.00	511261.18
Hill 13 (73)	31169.61	11.57	2480592.53	1303.22	2479297.85
Hill 14 (72)	37374.81	12.24	7344964.58	0.00	7344965.64
Hill 15 (82)	34045.57	23.11	3317047.22	0.00	3317046.61
Hill 16 (83)	30493.42	32.00	4858025.01	0.00	4858015.47
Hill 17 (81)	2632.08	0.70	476460.34	0.00	476461.85
Hill 18 (93)	1325.41	0.02	157.22	0.00	157.23
Hill 19 (92)	1047.09	0.07	156.56	0.00	156.56
Hill 20 (103)	16575.02	20.32	821438.01	0.00	821439.72
Hill 21 (102)	21740.94	21.55	3123128.93	0.00	3123145.48
Hill 22 (101)	3816.41	2.17	947852.78	0.00	947848.01
Hill 23 (113)	406.76	0.01	58.71	0.00	58.71

Hill 24 (112)	2004.83	0.21	348.35	0.00	348.35
Hill 25 (123)	36950.93	9.65	13416302.95	0.00	13416219.01
Hill 26 (122)	16885.41	6.06	2042854.93	0.00	2042870.17
Hill 27 (133)	31636.19	21.45	3064503.45	2010114.73	1054387.80
Hill 28 (132)	11624.29	45.03	1450611.22	0.00	1450598.65
Hill 29 (131)	2747.12	3.13	1090813.04	0.00	1090813.05
Hill 30 (143)	41526.86	10.64	19101138.98	1941788.94	17159436.61
Hill 31 (142)	9162.98	3.87	361461.00	27428.11	334032.94
Hill 32 (153)	34085.70	8.47	13524086.96	9409561.00	4114455.42
Hill 33 (152)	4463.64	1.75	88181.71	0.00	88182.44
Hill 34 (162)	3939.80	2.06	75700.34	0.00	75699.92
Hill 35 (163)	6562.06	2.71	325727.09	77129.00	248597.04
Hill 36 (172)	21854.49	57.11	5140634.74	0.00	5140659.16
Hill 37 (173)	27781.30	39.01	6368212.54	0.00	6368184.53
Hill 38 (171)	2824.78	3.98	790374.86	0.00	790375.14
Hill 39 (183)	3211.88	10.93	7396.61	0.00	7396.66
Hill 40 (182)	22880.97	15.94	6230477.89	104.79	6230389.02
Hill 41 (192)	27292.39	23.74	8767591.49	2540.63	8765071.63
Hill 42 (193)	14644.27	21.08	2286644.14	0.00	2286641.54
Hill 43 (191)	3098.80	2.76	727980.55	0.00	727978.86
Hill 44 (203)	8870.35	7.53	116201.21	0.00	116202.10
Hill 45 (202)	5026.07	23.36	367477.27	0.00	367476.67
Hill 46 (201)	2741.72	1.00	90323.20	0.00	90323.57
Hill 47 (213)	22220.73	11.66	6043902.54	0.00	6043901.11
Hill 48 (212)	21752.13	6.04	3371679.03	0.00	3371678.68
Hill 49 (222)	14831.18	11.57	317478.80	0.00	317479.83
Hill 50 (223)	21320.16	24.80	1484705.82	0.00	1484711.91
Hill 51 (221)	2919.43	1.05	194238.40	0.00	194238.91
Hill 52 (233)	292.84	0.65	72.81	0.00	72.81
Hill 53 (232)	970.69	0.82	295.90	0.00	295.90
Hill 54 (243)	254.22	0.82	779.98	0.00	779.98
Hill 55 (242)	217.23	0.54	156.31	0.00	156.31
Hill 56 (253)	1759.36	1.09	412.41	0.00	412.41
Hill 57 (252)	10642.82	2.89	1650387.14	918972.69	731409.85
Hill 58 (263)	27676.39	14.26	3673476.81	0.00	3673487.64
Hill 59 (262)	5521.79	12.00	70754.19	0.00	70754.12
Hill 60 (261)	2977.41	0.99	351082.60	23250.10	327831.07
Hill 61 (273)	26314.47	16.80	1114613.49	165136.57	949477.02
Hill 62 (272)	11526.82	34.78	597895.68	0.00	597897.38
Hill 63 (271)	3092.24	2.07	545022.93	0.00	545025.94
Hill 64 (282)	24166.72	12.85	1722758.45	0.00	1722750.09
Hill 65 (281)	2855.44	0.83	238014.18	0.00	238015.31
Hill 66 (283)	43845.06	37.32	15497837.71	0.00	15497865.87
Hill 67 (291)	3438.40	1.99	1031749.50	0.00	1031749.23
Hill 68 (293)	18362.21	22.92	4626727.51	0.00	4626716.17
Hill 69 (292)	5635.95	20.34	229835.80	0.00	229836.65
Hill 70 (301)	4014.02	6.04	861871.17	0.00	861867.43
Hill 71 (303)	14989.40	25.81	3709512.70	0.00	3709551.29
Hill 72 (302)	6855.12	24.65	737927.19	0.00	737929.32
Hill 73 (311)	2833.10	0.77	380735.43	0.00	380734.33
Hill 74 (313)	47916.23	28.06	3306609.90	0.00	3306600.50
Hill 75 (312)	76648.13	45.09	17459763.84	183563.00	17276216.69
Hill 76 (323)	24437.15	29.05	1651572.78	0.00	1651575.75
Hill 77 (321)	3148.20	2.02	547618.23	0.00	547618.14
Hill 78 (322)	44556.71	20.01	4629363.33	0.00	4629363.72

Channels Flow and Impoundments	Discharge Volume (m ³)	Sediment Yield (tonne)	Soil Loss (kg)	Upland Charge (m ³)	Subsurface Volume (m ³)
Channel 1 (324)	72187.0	1261.7	127037.4	72192.4	0.0
Channel 2 (314)	127497.6	6418.2	509251.1	127470.2	0.0
Channel 3 (304)	25922.6	1370.1	210946.8	25914.9	0.0
Channel 4 (294)	27480.0	1147.6	330820.0	27481.8	0.0
Channel 5 (284)	70934.1	6359.5	56926.9	70917.5	0.0
Channel 6 (274)	41014.8	594.9	127831.6	40986.3	0.0
Channel 7 (264)	36233.0	1021.6	86595.8	36202.3	0.0
Channel 8 (254)	89686.4	2356.4	659671.6	89653.7	0.0
Channel 9 (244)	161075.8	7270.8	466646.5	161092.7	0.0
Channel 10 (234)	189798.1	14904.0	7243679.3	189816.9	0.0
Channel 11 (224)	39160.0	814.6	133005.9	39107.6	0.0
Channel 12 (214)	272845.7	22699.3	6964402.7	272935.2	0.0
Channel 13 (204)	16696.3	243.5	31591.4	16669.5	0.0
Channel 14 (194)	45099.3	3284.9	2511886.2	45083.0	0.0
Channel 15 (184)	87916.7	3774.0	55200.0	87914.4	0.0
Channel 16 (174)	52577.2	3159.9	46692.5	52560.6	0.0
Channel 17 (164)	150991.1	5733.5	633441.4	150997.9	0.0
Channel 18 (154)	462339.4	17487.5	2464565.7	462389.4	0.0
Channel 19 (144)	538860.6	31224.8	8060665.5	538961.3	0.0

Channel 20 (134)	46100.0	1200.9	72676.9	46077.1	0.0
Channel 21 (124)	638682.6	45060.1	14114853.9	638807.5	0.0
Channel 22 (114)	768592.5	70212.0	24160579.8	768591.9	0.0
Channel 23 (104)	42216.4	1108.7	50941.1	42175.7	0.0
Channel 24 (94)	813153.4	114827.0	45108607.2	813160.5	0.0
Channel 25 (84)	67277.4	1924.6	78850.5	67226.0	0.0
Channel 26 (74)	948869.4	101350.7	84615.2	948996.3	0.0
Channel 27 (64)	104207.4	3644.6	113276.3	104187.4	0.0
Channel 28 (54)	1104984.8	105761.3	22706999.6	1105086.2	0.0
Channel 29 (44)	85403.2	4693.2	823752.2	85341.8	0.0
Channel 30 (34)	1190755.7	171130.0	62474790.7	1190739.0	0.0
Channel 31 (24)	1356998.3	388454.5	236359440.8	1357251.2	0.0

129 storms produced 707.32 mm. of rainfall on an AVERAGE ANNUAL basis

5 events produced 18.33 mm. of runoff
passing through the watershed outlet on an AVERAGE ANNUAL basis

Average Annual Delivery From Channel Outlet:

Total contributing area to outlet	=	7403.21	ha
Avg. Ann. Precipitation volume in contributing area	=	52364124.	m ³ /yr
Avg. Ann. irrigation volume in contributing area	=	0.	m ³ /yr
Avg. Ann. water discharge from outlet	=	1356998.	m ³ /yr
Avg. Ann. total hillslope soil loss	=	236316.3	tonnes/yr
Avg. Ann. total channel soil loss	=	436870.2	tonnes/yr
Avg. Ann. sediment discharge from outlet	=	388454.5	tonnes/yr
Avg. Ann. Sed. delivery per unit area of watershed	=	52.5	T/ha/yr
Sediment Delivery Ratio for Watershed	=	0.577	

Sediment Particle Information Leaving Channel:

Class	Diameter (mm)	Specific Gravity	Particle Composition				Fraction In Flow Exiting
			% Sand	% Silt	% Clay	% O.M.	
1	0.002	2.60	0.0	0.0	100.0	7.3	0.579
2	0.010	2.65	0.0	100.0	0.0	0.0	0.000
3	0.049	1.80	0.0	43.2	56.8	4.1	0.416
4	0.692	1.60	57.3	24.9	17.8	1.3	0.004
5	0.200	2.65	100.0	0.0	0.0	0.0	0.001

Distribution of Primary Particles and Organic Matter in the Eroded Sediment:

type	fraction
clay	0.816
silt	0.181
sand	0.003
organic matter	0.059

Index of specific surface = 189.05 m²/g of total sediment
Enrichment ratio of specific surface = 2.28

D.3. Resultados de la simulación TP24

WEPP Watershed Simulation for Representative Hillslopes and Channels

30 YEAR AVERAGE ANNUAL VALUES FOR WATERSHED

Hillslopes	Runoff Volume (m ³)	Subrunoff Volume (m ³)	Soil Loss (kg)	Sediment Deposition (kg)	Sediment Yield (kg)
Hill 1 (23)	30145.33	13.01	3949611.19	0.00	3949611.88
Hill 2 (22)	41248.73	14.15	10921235.45	0.00	10921255.92
Hill 3 (33)	37231.44	22.04	4177584.28	0.00	4177581.98

Hill 4 (32)	41696.53	31.03	9088764.50	0.00	9088790.72
Hill 5 (31)	1646.05	0.82	52754.86	0.00	52754.76
Hill 6 (53)	41722.45	6.42	9098059.85	0.00	9098090.94
Hill 7 (52)	11658.85	7.69	784512.09	0.00	784510.02
Hill 8 (62)	42852.29	28.95	3466060.02	0.00	3466065.80
Hill 9 (63)	57001.74	39.07	11136841.16	0.00	11136824.63
Hill 10 (61)	2217.28	0.92	160991.05	0.00	160991.05
Hill 11 (73)	12364.40	3.92	839402.67	0.00	839403.29
Hill 12 (72)	4196.67	4.71	264029.23	0.00	264029.88
Hill 13 (83)	7770.84	11.73	188575.03	0.00	188574.88
Hill 14 (82)	22095.78	18.93	3409370.24	0.00	3409390.68
Hill 15 (81)	1739.04	1.30	331437.32	0.00	331439.17
Hill 16 (93)	12219.33	14.38	3371424.62	0.00	3371411.95
Hill 17 (92)	127.83	0.04	5.73	0.00	5.73
Hill 18 (103)	32097.32	18.44	2304821.26	0.00	2304824.45
Hill 19 (102)	29774.02	32.22	4829325.23	0.00	4829323.56
Hill 20 (101)	2218.92	0.85	221707.69	0.00	221708.09
Hill 21 (113)	3801.81	1.50	452885.76	437073.02	15813.36
Hill 22 (123)	11282.48	39.97	1252712.96	0.00	1252705.76
Hill 23 (122)	24724.29	25.81	3843374.53	0.00	3843364.36
Hill 24 (121)	2861.07	2.95	1076837.74	0.00	1076846.34
Hill 25 (133)	9152.46	6.57	359763.56	0.00	359763.66
Hill 26 (132)	19673.37	8.10	4174511.35	0.00	4174494.18
Hill 27 (143)	127.43	0.25	27.98	0.00	27.98
Hill 28 (153)	32746.10	21.81	7602754.19	0.00	7602741.26
Hill 29 (152)	9437.10	25.06	676396.12	0.00	676393.23
Hill 30 (151)	2077.06	2.88	679715.32	0.00	679717.01
Hill 31 (163)	32433.95	8.70	17155937.71	130956.67	17024941.95
Hill 32 (162)	2654.65	1.96	5917.98	0.00	5917.94
Hill 33 (173)	4923.58	5.38	417815.34	0.00	417814.94
Hill 34 (172)	5880.17	1.84	90041.42	61893.76	28147.86
Hill 35 (183)	47107.91	39.37	13424522.22	0.00	13424439.09
Hill 36 (182)	26396.78	55.60	5619010.58	0.00	5619006.45
Hill 37 (181)	1957.29	3.15	654950.27	0.00	654951.30
Hill 38 (193)	35428.83	6.91	10631758.41	4128724.03	6502987.59
Hill 39 (192)	1066.60	0.89	212.00	0.00	212.00
Hill 40 (202)	16317.74	30.64	747938.18	0.00	747936.66
Hill 41 (203)	49568.41	19.39	5207349.43	0.00	5207359.70
Hill 42 (201)	2081.80	3.90	539401.45	0.00	539400.44
Hill 43 (213)	23729.51	12.75	6751390.28	0.00	6751392.73
Hill 44 (212)	23128.10	6.55	3711895.36	0.00	3711898.03
Hill 45 (222)	14284.72	14.74	425777.19	0.00	425776.87
Hill 46 (223)	18418.12	36.34	2983099.27	0.00	2983133.01
Hill 47 (221)	1792.86	0.85	128153.84	0.00	128153.81
Hill 48 (233)	810.62	0.97	205.06	0.00	205.06
Hill 49 (232)	7744.55	2.51	1342857.34	0.00	1342861.12
Hill 50 (243)	880.74	1.64	711.99	0.00	711.99
Hill 51 (242)	1926.84	1.38	9095.51	0.00	9095.42
Hill 52 (253)	28333.43	16.88	5047014.30	0.00	5047023.63
Hill 53 (252)	4901.98	10.76	17701.35	0.00	17701.37
Hill 54 (251)	2523.07	0.64	200595.30	0.00	200596.05
Hill 55 (262)	28898.94	9.02	1257294.40	0.00	1257289.74
Hill 56 (261)	1894.75	0.81	574290.96	0.00	574290.84
Hill 57 (263)	41182.48	31.57	14246527.16	0.00	14246485.97
Hill 58 (271)	3027.52	3.32	699466.11	0.00	699466.20
Hill 59 (273)	10547.35	33.01	1859680.26	0.00	1859664.04
Hill 60 (272)	12171.70	32.14	2409742.39	0.00	2409747.31
Hill 61 (281)	3383.79	5.62	824345.10	0.00	824341.44
Hill 62 (282)	5725.71	27.40	681030.75	0.00	681029.05
Hill 63 (283)	18968.06	22.15	5726049.58	0.00	5726011.28
Hill 64 (291)	2500.78	0.95	268492.38	0.00	268493.39
Hill 65 (293)	45684.32	18.46	2687655.37	0.00	2687655.67
Hill 66 (292)	102928.28	56.21	45313498.59	0.00	45313474.52
Hill 67 (303)	20443.05	17.76	469702.25	0.00	469698.04
Hill 68 (301)	3581.51	2.39	712588.21	0.00	712589.34
Hill 69 (302)	43034.81	19.27	4317462.03	0.00	4317453.34

Channels Flow and Impoundments	Discharge Volume (m ³)	Sediment Yield (tonne)	Soil Loss (kg)	Upland Charge (m ³)	Subsurface Volume (m ³)
Channel 1 (294)	151201.3	21921.0	8301511.2	151187.9	0.0
Channel 2 (284)	28145.3	1799.6	154353.7	28132.6	0.0
Channel 3 (274)	25838.3	1034.0	33497.8	25815.0	0.0
Channel 4 (264)	72030.3	3283.4	79062.1	72016.9	0.0
Channel 5 (254)	35828.9	1294.4	139323.7	35786.2	0.0
Channel 6 (244)	110693.3	2748.8	462958.4	110668.7	0.0
Channel 7 (234)	145046.4	3811.2	315230.9	145082.9	0.0
Channel 8 (224)	34600.2	858.3	70731.2	34546.8	0.0

Channel 9 (214)	226437.2	7989.3	926144.4	226508.4	0.0
Channel 10 (204)	68060.5	1598.4	82593.4	68020.6	0.0
Channel 11 (194)	330985.4	9617.2	13079085.9	331000.2	0.0
Channel 12 (184)	75594.9	4244.0	76633.3	75559.9	0.0
Channel 13 (174)	417324.9	12251.8	3829610.1	417367.8	0.0
Channel 14 (164)	480518.7	37276.7	15406295.1	480568.9	0.0
Channel 15 (154)	44332.1	2146.8	39755.0	44305.1	0.0
Channel 16 (144)	524985.1	51849.6	17647221.0	524976.6	0.0
Channel 17 (134)	704898.5	97949.4	37300467.8	705012.0	0.0
Channel 18 (124)	38959.4	1333.0	247711.6	38936.3	0.0
Channel 19 (114)	747651.3	149340.4	53410175.9	747657.1	0.0
Channel 20 (104)	64193.7	1766.0	59720.9	64140.9	0.0
Channel 21 (94)	824073.3	205353.9	73758154.3	824193.9	0.0
Channel 22 (84)	31675.1	944.0	38054.8	31637.1	0.0
Channel 23 (74)	872279.6	93246.2	683178.2	872315.8	0.0
Channel 24 (64)	102222.3	6016.9	1110038.7	102134.0	0.0
Channel 25 (54)	1027790.0	101124.0	11496752.3	1027893.1	0.0
Channel 26 (304)	67116.6	2131.2	391705.2	67096.7	0.0
Channel 27 (34)	80699.5	5969.6	1266080.9	80627.0	0.0
Channel 28 (24)	1246866.1	96599.9	318162.4	1247015.5	0.0

129 storms produced 707.32 mm. of rainfall on an AVERAGE ANNUAL basis

6 events produced 18.40 mm. of runoff passing through the watershed outlet on an AVERAGE ANNUAL basis

Average Annual Delivery From Channel Outlet:

Total contributing area to outlet	=	6776.59	ha
Avg. Ann. Precipitation volume in contributing area	=	47931959.	m ³ /yr
Avg. Ann. irrigation volume in contributing area	=	0.	m ³ /yr
Avg. Ann. water discharge from outlet	=	1246866.	m ³ /yr
Avg. Ann. total hillslope soil loss	=	245876.7	tonnes/yr
Avg. Ann. total channel soil loss	=	240724.2	tonnes/yr
Avg. Ann. sediment discharge from outlet	=	96599.9	tonnes/yr
Avg. Ann. Sed. delivery per unit area of watershed	=	14.3	T/ha/yr
Sediment Delivery Ratio for Watershed	=	0.199	

Sediment Particle Information Leaving Channel:

Class	Diameter (mm)	Specific Gravity	Particle Composition				Fraction In Flow Exiting
			% Sand	% Silt	% Clay	% O.M.	
1	0.002	2.60	0.0	0.0	100.0	7.3	0.574
2	0.010	2.65	0.0	100.0	0.0	0.0	0.000
3	0.049	1.80	0.0	43.2	56.8	4.1	0.411
4	0.692	1.60	57.3	24.9	17.8	1.3	0.012
5	0.200	2.65	100.0	0.0	0.0	0.0	0.002

Distribution of Primary Particles and Organic Matter in the Eroded Sediment:

type	fraction
clay	0.810
silt	0.181
sand	0.009
organic matter	0.059

Index of specific surface = 187.59 m²/g of total sediment
 Enrichment ratio of specific surface = 2.26

D.4. Resultados de la simulación R16

WEPP Watershed Simulation for Representative Hillslopes and Channels

30 YEAR AVERAGE ANNUAL VALUES FOR WATERSHED

Hillslopes	Runoff Volume (m ³)	Subrunoff Volume (m ³)	Soil Loss (kg)	Sediment Deposition (kg)	Sediment Yield (kg)
Hill 1 (23)	38038.52	12.03	7537047.84	0.00	7537058.92
Hill 2 (22)	11644.43	15.46	1115272.00	0.00	1115267.31
Hill 3 (32)	58986.79	57.79	13771219.89	0.00	13771291.84
Hill 4 (33)	64966.68	64.98	17752706.73	0.00	17752724.14
Hill 5 (31)	5861.90	5.07	1900948.29	0.00	1900942.48
Hill 6 (42)	10027.38	2.17	2619263.30	11981.66	2607287.77
Hill 7 (43)	163.04	0.92	114.76	0.00	114.75
Hill 8 (53)	34993.45	13.86	5374163.35	0.00	5374181.66
Hill 9 (52)	35901.05	28.74	12402810.40	0.00	12402830.92
Hill 10 (62)	1829.87	22.40	16184.26	0.00	16184.22
Hill 11 (61)	2758.57	2.38	533411.22	0.00	533409.57
Hill 12 (73)	14866.74	13.90	926618.65	0.00	926626.22
Hill 13 (72)	14316.60	38.79	2435205.64	0.00	2435210.09
Hill 14 (71)	3183.72	2.87	634454.64	0.00	634457.65
Hill 15 (83)	25126.37	14.96	1513374.68	0.00	1513378.15
Hill 16 (82)	22929.37	10.97	820286.81	0.00	820283.38
Hill 17 (92)	24589.40	21.03	2552735.56	0.00	2552734.07
Hill 18 (93)	12703.67	37.88	1217800.18	0.00	1217794.99
Hill 19 (91)	2899.08	1.62	1467781.11	0.00	1467784.88
Hill 20 (103)	4365.68	0.78	286903.09	0.00	286902.73
Hill 21 (102)	1210.80	1.27	41994.42	0.00	41994.42
Hill 22 (113)	20451.39	25.81	4604431.60	0.00	4604435.03
Hill 23 (112)	27190.96	8.69	3338139.67	0.00	3338139.87
Hill 24 (123)	11855.01	12.27	1770256.86	0.00	1770261.16
Hill 25 (122)	4545.13	7.60	48233.08	0.00	48232.88
Hill 26 (132)	45443.90	38.18	14267343.77	0.00	14267400.77
Hill 27 (133)	43603.78	30.71	8921734.27	0.00	8921695.47
Hill 28 (131)	2881.79	6.11	862280.98	0.00	862285.63
Hill 29 (143)	38360.23	26.82	14475451.22	0.00	14475405.92
Hill 30 (142)	46395.72	31.05	20301085.00	0.00	20301201.11
Hill 31 (153)	23577.83	30.37	8017643.03	0.00	8017629.31
Hill 32 (152)	19743.76	23.56	5015407.38	0.00	5015438.56
Hill 33 (151)	3576.29	4.42	929395.10	0.00	929393.79
Hill 34 (163)	48226.23	32.20	24950070.71	0.00	24950115.86
Hill 35 (162)	8727.33	25.59	810082.01	0.00	810085.75
Hill 36 (161)	2866.65	3.66	860840.42	0.00	860838.49
Hill 37 (173)	16930.44	12.88	4507118.82	0.00	4507089.84
Hill 38 (172)	17033.19	15.59	5043484.51	0.00	5043486.03
Hill 39 (182)	29349.32	8.15	10172413.78	9407478.00	764953.54
Hill 40 (183)	494.91	0.03	70.36	0.00	70.36
Hill 41 (193)	5550.40	5.64	282814.59	0.00	282815.09
Hill 42 (192)	9406.27	9.35	1710284.61	0.00	1710269.21
Hill 43 (203)	11618.48	24.70	3135276.29	0.00	3135286.47
Hill 44 (202)	5132.69	20.41	548803.75	0.00	548801.26
Hill 45 (201)	2875.49	2.79	858202.46	0.00	858204.17
Hill 46 (213)	5968.70	4.53	278918.04	0.00	278917.87
Hill 47 (212)	20599.91	10.42	8610217.44	0.00	8610266.50
Hill 48 (223)	15580.35	2.82	1657072.21	903639.13	753436.16
Hill 49 (222)	602.40	2.20	3739.79	0.00	3739.81
Hill 50 (233)	12689.56	15.88	1476472.30	0.00	1476467.14
Hill 51 (232)	2297.27	21.31	33674.17	0.00	33674.42
Hill 52 (231)	2860.60	2.38	760865.00	0.00	760863.09
Hill 53 (243)	20406.01	5.49	2007969.09	0.00	2007973.48
Hill 54 (242)	9118.83	9.90	1319776.19	0.00	1319776.36
Hill 55 (252)	52467.45	23.72	15590811.21	0.00	15590817.69
Hill 56 (253)	53156.62	28.59	21511538.82	0.00	21511599.74
Hill 57 (262)	10112.52	20.51	1033299.70	0.00	1033303.61
Hill 58 (261)	3242.67	2.23	528528.00	0.00	528530.52
Hill 59 (263)	20072.99	22.99	5629771.50	0.00	5629770.93
Hill 60 (273)	20233.27	4.98	6207674.20	4409841.00	1797823.45
Hill 61 (272)	9652.38	5.15	2876255.46	0.00	2876248.79
Hill 62 (282)	4236.25	10.42	188425.96	0.00	188426.01
Hill 63 (281)	2822.57	1.72	625087.09	0.00	625085.69
Hill 64 (283)	1211.78	6.76	688.26	0.00	688.26
Hill 65 (293)	20451.55	23.58	9423877.36	0.00	9423862.82
Hill 66 (292)	21601.31	9.68	3120327.53	0.00	3120340.31
Hill 67 (291)	2705.60	0.84	409211.33	0.00	409210.33
Hill 68 (303)	25070.49	25.65	4610129.03	0.00	4610124.61
Hill 69 (302)	16263.61	29.05	3704451.54	0.00	3704464.70
Hill 70 (301)	3161.39	2.54	816926.93	0.00	816926.98
Hill 71 (312)	24823.12	16.41	2140767.65	0.00	2140761.98
Hill 72 (311)	3634.12	1.38	151497.00	0.00	151496.27
Hill 73 (313)	39323.11	12.37	2757627.74	0.00	2757614.21
Hill 74 (321)	3462.26	1.81	410970.26	0.00	410969.22
Hill 75 (322)	20740.66	9.67	795846.73	0.00	795848.38
Hill 76 (323)	19058.72	16.12	1472187.69	0.00	1472185.29
Hill 77 (332)	12076.71	16.85	2200217.12	0.00	2200208.20
Hill 78 (333)	14554.12	5.65	640994.43	0.00	640993.55

Hill 79 (341)	3040.50	1.66	416221.46	60952.93	355268.53
Hill 80 (343)	8911.64	19.31	1164885.23	0.00	1164885.12
Hill 81 (342)	5542.53	6.11	79257.10	0.00	79256.63
Hill 82 (352)	6357.73	15.11	655440.49	0.00	655441.86
Hill 83 (351)	3805.03	2.00	615184.86	0.00	615186.88
Hill 84 (353)	4727.29	7.35	109921.66	0.00	109922.07
Hill 85 (363)	37046.16	20.96	8626197.83	0.00	8626098.87
Hill 86 (361)	2981.60	2.81	774711.56	0.00	774711.06
Hill 87 (362)	21542.33	29.16	4012757.82	0.00	4012733.48

Channels Flow and Impoundments	Discharge Volume (m ³)	Sediment Yield (tonne)	Soil Loss (kg)	Upland Charge (m ³)	Subsurface Volume (m ³)
Channel 1 (364)	61606.3	2871.2	41492.1	61623.0	0.0
Channel 2 (354)	14916.9	391.7	113557.7	14914.0	0.0
Channel 3 (344)	17529.3	569.6	81450.6	17521.3	0.0
Channel 4 (334)	59069.1	1591.8	180222.0	59098.6	0.0
Channel 5 (324)	43292.1	991.5	155762.8	43288.6	0.0
Channel 6 (314)	67828.1	1316.6	73959.3	67809.8	0.0
Channel 7 (304)	44537.4	2223.4	30468.2	44552.7	0.0
Channel 8 (294)	44806.4	3466.3	23952.8	44792.4	0.0
Channel 9 (284)	8289.6	308.1	85057.8	8289.2	0.0
Channel 10 (274)	82985.6	5108.7	54615.0	82991.3	0.0
Channel 11 (264)	33453.0	1909.3	22330.2	33473.9	0.0
Channel 12 (254)	221986.3	11835.9	8919587.1	222110.3	0.0
Channel 13 (244)	295992.9	8660.7	7342039.4	296061.5	0.0
Channel 14 (234)	17899.7	577.5	67503.7	17886.9	0.0
Channel 15 (224)	330141.6	11255.3	12484066.2	330079.0	0.0
Channel 16 (214)	424431.8	14040.2	3352649.4	424503.5	0.0
Channel 17 (204)	19682.9	1311.8	18145.3	19674.5	0.0
Channel 18 (194)	459019.0	8311.2	890921.1	459072.4	0.0
Channel 19 (184)	532091.8	11610.7	3529238.7	532162.3	0.0
Channel 20 (174)	625068.5	13675.0	29685.3	625150.1	0.0
Channel 21 (164)	59878.6	6892.5	30288.6	59881.5	0.0
Channel 22 (154)	46971.0	3638.4	25245.5	46956.1	0.0
Channel 23 (144)	191611.4	19311.9	697011.6	191650.3	0.0
Channel 24 (134)	92008.5	5902.6	177613.5	92004.3	0.0
Channel 25 (124)	300007.9	13899.0	3212176.0	300039.4	0.0
Channel 26 (114)	972612.3	19521.8	4011064.0	972742.1	0.0
Channel 27 (104)	1039859.7	11624.2	241108.9	1039796.6	0.0
Channel 28 (94)	40263.6	1199.2	119983.2	40250.8	0.0
Channel 29 (84)	1127916.6	15014.3	12034291.3	1128117.8	0.0
Channel 30 (74)	32448.3	1040.5	33525.6	32422.5	0.0
Channel 31 (64)	4631.7	160.3	19231.7	4612.9	0.0
Channel 32 (54)	107996.0	6207.1	230257.2	108016.4	0.0
Channel 33 (44)	1246124.6	30931.3	9270576.3	1246106.1	0.0
Channel 34 (34)	129966.1	6745.1	112812.8	129942.8	0.0
Channel 35 (24)	1425638.2	22102.3	2959781.6	1425766.7	0.0

129 storms produced 707.32 mm. of rainfall on an AVERAGE ANNUAL basis

5 events produced 18.45 mm. of runoff
passing through the watershed outlet on an AVERAGE ANNUAL basis

Average Annual Delivery From Channel Outlet:

Total contributing area to outlet	=	7728.73	ha
Avg. Ann. Precipitation volume in contributing area	=	54666609.	m ³ /yr
Avg. Ann. irrigation volume in contributing area	=	0.	m ³ /yr
Avg. Ann. water discharge from outlet	=	1425638.	m ³ /yr
Avg. Ann. total hillslope soil loss	=	329801.6	tonnes/yr
Avg. Ann. total channel soil loss	=	70671.7	tonnes/yr
Avg. Ann. sediment discharge from outlet	=	22102.3	tonnes/yr
Avg. Ann. Sed. delivery per unit area of watershed	=	2.9	T/ha/yr
Sediment Delivery Ratio for Watershed	=	0.055	

Sediment Particle Information Leaving Channel:

Class	Diameter (mm)	Specific Gravity	Particle Composition				Fraction In Flow Exiting
			% Sand	% Silt	% Clay	% O.M.	
1	0.002	2.60	0.0	0.0	100.0	7.3	0.413
2	0.010	2.65	0.0	100.0	0.0	0.0	0.002

3	0.049	1.80	0.0	43.2	56.8	4.1	0.531
4	0.692	1.60	57.3	24.9	17.8	1.3	0.045
5	0.200	2.65	100.0	0.0	0.0	0.0	0.009

Distribution of Primary Particles and Organic Matter in the Eroded Sediment:

type	fraction
clay	0.723
silt	0.242
sand	0.035
organic matter	0.052

Index of specific surface = 168.57 m²/g of total sediment
 Enrichment ratio of specific surface = 2.03

D.5. Resultados de la simulación R05

WEPP watershed Simulation for Representative Hillslopes and Channels

30 YEAR AVERAGE ANNUAL VALUES FOR WATERSHED

Hillslopes	Runoff Volume (m ³)	Subrunoff Volume (m ³)	Soil Loss (kg)	Sediment Deposition (kg)	Sediment Yield (kg)
Hill 1 (23)	688.47	2.59	6102.86	0.00	6102.88
Hill 2 (22)	584.72	2.14	1399.87	0.00	1399.87
Hill 3 (33)	18507.82	19.97	4389940.28	0.00	4389963.93
Hill 4 (32)	25963.37	9.55	3370351.67	418168.79	2952179.88
Hill 5 (43)	37327.91	20.43	6098378.84	0.00	6098337.90
Hill 6 (42)	24656.77	26.88	4157114.58	0.00	4157096.68
Hill 7 (53)	2517.20	22.53	131670.30	0.00	131669.64
Hill 8 (52)	10255.12	17.69	2144446.92	0.00	2144454.61
Hill 9 (51)	1900.64	2.05	490439.98	0.00	490442.08
Hill 10 (63)	2375.45	7.42	196408.91	0.00	196408.77
Hill 11 (62)	2006.90	4.36	54060.48	0.00	54060.57
Hill 12 (73)	6975.07	20.75	456792.13	0.00	456791.84
Hill 13 (72)	12227.07	27.69	2176600.14	0.00	2176593.15
Hill 14 (71)	2244.88	2.37	492646.95	0.00	492646.67
Hill 15 (83)	6559.61	16.40	591420.43	0.00	591420.39
Hill 16 (82)	4878.83	33.00	779303.33	0.00	779299.74
Hill 17 (81)	1894.89	1.62	515237.06	0.00	515239.05
Hill 18 (93)	5862.82	8.47	99372.48	0.00	99371.67
Hill 19 (92)	6920.84	11.44	603765.53	0.00	603764.57
Hill 20 (103)	11327.15	3.19	101772.25	0.00	101773.00
Hill 21 (102)	18365.14	13.61	3205641.64	0.00	3205619.86
Hill 22 (113)	20242.74	62.64	3653487.99	0.00	3653481.48
Hill 23 (112)	29600.14	49.01	7302154.79	0.00	7302111.64
Hill 24 (111)	2704.04	2.09	948163.99	0.00	948165.30
Hill 25 (123)	937.36	0.48	10096.60	53.70	10042.79
Hill 26 (122)	357.83	0.65	259.86	0.00	259.86
Hill 27 (133)	3932.03	2.20	3824.82	1251.34	2573.48
Hill 28 (132)	3390.23	5.15	71211.72	0.00	71211.32
Hill 29 (143)	12549.53	11.96	3589518.85	1531289.23	2058232.78
Hill 30 (142)	6342.18	7.57	1082510.99	0.00	1082511.26
Hill 31 (152)	13155.28	11.18	1125736.90	0.00	1125730.44
Hill 32 (153)	2368.10	26.08	93090.18	0.00	93090.08
Hill 33 (162)	29461.55	22.55	8115443.40	0.00	8115454.12
Hill 34 (163)	12272.11	31.88	2298176.12	0.00	2298182.17
Hill 35 (172)	15957.25	20.82	4703074.41	7068.00	4695979.77
Hill 36 (173)	9769.87	15.14	1829968.57	0.00	1829962.59
Hill 37 (171)	2122.64	4.38	690251.99	0.00	690252.64
Hill 38 (183)	13076.96	21.66	4176341.96	0.00	4176328.67
Hill 39 (182)	5969.15	9.69	230222.37	0.00	230223.02
Hill 40 (181)	1956.72	4.37	495561.52	0.00	495562.26
Hill 41 (193)	20770.45	15.69	7535447.51	0.00	7535425.06
Hill 42 (192)	14650.00	25.91	5650813.36	0.00	5650805.24
Hill 43 (203)	1225.41	12.47	102992.38	0.00	102992.42
Hill 44 (202)	12981.44	8.43	4869417.44	139471.68	4729961.93
Hill 45 (212)	8902.00	19.76	2080830.76	0.00	2080826.11

Hill 46 (213)	6044.15	15.35	596345.35	0.00	596339.73
Hill 47 (211)	1882.66	4.60	572432.00	0.00	572432.52
Hill 48 (223)	8908.17	9.70	3187271.14	0.00	3187289.46
Hill 49 (222)	6776.76	9.22	2066325.90	0.00	2066327.83
Hill 50 (233)	139.83	0.86	58.41	0.00	58.41
Hill 51 (232)	538.67	1.41	61205.83	0.00	61205.60
Hill 52 (243)	22042.13	36.11	7464742.09	0.00	7464683.12
Hill 53 (242)	21476.58	18.79	4406347.85	0.00	4406341.38
Hill 54 (241)	1895.45	3.09	508150.95	0.00	508147.70
Hill 55 (253)	38780.58	37.85	16572797.14	0.00	16572831.49
Hill 56 (252)	14622.61	34.63	3486689.01	0.00	3486673.25
Hill 57 (251)	1835.54	4.25	536157.69	0.00	536156.57
Hill 58 (261)	2784.14	2.91	383472.54	0.00	383470.74
Hill 59 (262)	5408.54	18.02	1039763.45	0.00	1039760.81
Hill 60 (263)	1564.17	7.81	11549.71	0.00	11549.76
Hill 61 (271)	1950.69	3.12	360163.65	0.00	360161.91
Hill 62 (273)	3477.43	18.57	345312.19	0.00	345311.95
Hill 63 (272)	1676.43	4.01	613.11	0.00	613.11
Hill 64 (283)	7604.59	5.24	1685938.73	18720.67	1667212.60
Hill 65 (282)	3444.25	1.71	46379.99	0.00	46379.93
Hill 66 (293)	6841.29	10.49	394198.25	0.00	394197.83
Hill 67 (292)	6300.66	16.54	529332.25	0.00	529333.68
Hill 68 (291)	1771.21	1.04	517743.33	0.00	517744.86
Hill 69 (303)	10817.21	15.15	1490394.83	0.00	1490403.55
Hill 70 (302)	25413.53	16.87	10962720.26	0.00	10962710.48
Hill 71 (313)	5476.90	19.53	773316.90	0.00	773319.76
Hill 72 (312)	3234.18	20.00	263524.82	0.00	263525.24
Hill 73 (311)	2237.70	3.07	563029.72	0.00	563030.59
Hill 74 (322)	1957.33	1.28	304301.54	66982.98	237316.77
Hill 75 (323)	70.27	0.56	20.54	0.00	20.54
Hill 76 (333)	106.93	0.65	28.78	0.00	28.78
Hill 77 (332)	219.05	1.11	89.42	0.00	89.42
Hill 78 (343)	36.25	0.26	11.92	0.00	11.92
Hill 79 (353)	2094.94	15.17	148149.97	0.00	148149.90
Hill 80 (352)	3232.26	12.80	358206.78	0.00	358206.00
Hill 81 (351)	3648.60	4.56	1358862.54	0.00	1358861.81
Hill 82 (363)	5567.54	8.26	249175.38	0.00	249175.50
Hill 83 (362)	7398.62	17.88	1816136.22	0.00	1816126.33
Hill 84 (373)	12757.29	30.09	3495447.77	0.00	3495450.76
Hill 85 (372)	10432.55	16.91	1294084.38	0.00	1294084.65
Hill 86 (371)	2421.78	3.72	679508.34	0.00	679505.13
Hill 87 (383)	3795.75	6.55	252772.18	0.00	252771.92
Hill 88 (382)	11581.50	12.72	4601449.63	0.00	4601464.33
Hill 89 (393)	1969.79	3.06	45962.26	0.00	45962.17
Hill 90 (392)	4075.09	6.44	842108.74	0.00	842106.94
Hill 91 (403)	18291.87	19.41	3347756.86	0.00	3347759.64
Hill 92 (402)	14432.25	19.16	2051174.22	0.00	2051173.93
Hill 93 (401)	1804.48	1.50	414210.60	0.00	414211.05
Hill 94 (413)	18340.81	6.30	2455994.75	0.00	2455979.54
Hill 95 (412)	3450.41	6.20	39454.95	0.00	39455.02
Hill 96 (423)	88.57	0.54	43.26	0.00	43.26
Hill 97 (422)	169.08	0.38	1369.76	0.00	1369.75
Hill 98 (433)	3484.84	2.56	802206.57	0.00	802206.30
Hill 99 (432)	1300.64	2.59	75853.86	0.00	75853.67
Hill 100 (442)	8389.09	5.09	2587523.12	0.00	2587524.80
Hill 101 (443)	3136.90	8.20	549598.41	0.00	549596.41
Hill 102 (452)	16184.13	9.14	3879840.33	0.00	3879860.98
Hill 103 (453)	7449.94	12.11	1489748.36	0.00	1489743.41
Hill 104 (462)	3286.98	1.27	1171945.44	461030.25	710911.84
Hill 105 (463)	136.97	0.95	212.98	0.00	212.98
Hill 106 (472)	17.73	0.40	6.05	0.00	6.05
Hill 107 (473)	525.28	0.45	27529.00	22480.21	5048.82
Hill 108 (482)	10927.23	16.81	2340754.10	0.00	2340761.65
Hill 109 (483)	1371.76	10.02	11699.55	0.00	11699.44
Hill 110 (481)	1900.48	2.28	423661.27	0.00	423665.61
Hill 111 (493)	5363.71	5.84	1734079.28	6095.00	1727989.33
Hill 112 (492)	3230.91	3.65	387684.28	0.00	387684.79
Hill 113 (502)	7299.01	3.09	1014510.57	3288.73	1011223.57
Hill 114 (503)	1431.60	1.33	12825.55	0.00	12825.56
Hill 115 (512)	12107.44	28.98	1206334.52	0.00	1206335.35
Hill 116 (511)	1992.23	3.14	267424.53	0.00	267424.86
Hill 117 (513)	23108.40	22.43	4982350.93	0.00	4982327.14
Hill 118 (523)	6278.95	2.60	1404618.00	1344440.63	60177.57
Hill 119 (522)	3020.63	1.68	665195.19	0.00	665198.27
Hill 120 (532)	7650.28	6.39	2108419.58	0.00	2108420.79
Hill 121 (533)	11036.27	9.37	5036452.93	133457.16	4902983.00
Hill 122 (541)	2960.39	2.35	764270.20	0.00	764268.68
Hill 123 (542)	4264.91	12.05	195115.01	0.00	195114.14
Hill 124 (543)	2458.02	7.15	12921.04	0.00	12920.99
Hill 125 (553)	98.67	1.10	38.48	0.00	38.48
Hill 126 (552)	519.61	1.34	13574.77	0.00	13574.76
Hill 127 (562)	437.20	1.27	1815.19	0.00	1815.19
Hill 128 (563)	33.10	1.05	10.98	0.00	10.98

Hill 129 (572)	6757.94	12.89	501385.78	0.00	501385.88
Hill 130 (573)	2925.41	15.36	106445.45	0.00	106445.26
Hill 131 (571)	2567.68	2.98	686204.32	0.00	686204.68
Hill 132 (582)	1973.78	13.89	26668.23	0.00	26668.28
Hill 133 (581)	2813.60	4.02	564275.24	0.00	564276.46
Hill 134 (583)	1034.43	4.44	334.62	0.00	334.62
Hill 135 (593)	11479.84	29.00	3351782.04	0.00	3351778.48
Hill 136 (592)	8420.77	5.66	200369.78	0.00	200369.53
Hill 137 (591)	2008.51	2.00	1075040.71	0.00	1075040.00
Hill 138 (603)	8139.88	26.04	1677633.13	0.00	1677627.97
Hill 139 (601)	2161.49	2.89	369064.78	0.00	369066.17
Hill 140 (602)	4218.63	16.06	358329.14	0.00	358329.42
Hill 141 (613)	3652.63	10.72	228207.31	0.00	228207.25
Hill 142 (611)	2281.48	3.66	640122.99	0.00	640125.13
Hill 143 (612)	672.38	6.85	1050.93	0.00	1050.93
Hill 144 (623)	394.15	7.85	152.56	0.00	152.56
Hill 145 (622)	3908.27	11.46	387821.32	0.00	387821.46
Hill 146 (621)	1905.41	2.90	532827.85	0.00	532826.85
Hill 147 (633)	3324.35	11.64	205463.81	0.00	205463.07
Hill 148 (632)	1574.26	10.47	59969.95	0.00	59970.46
Hill 149 (631)	2134.87	3.31	656090.96	0.00	656087.32
Hill 150 (641)	2397.14	2.31	483595.84	0.00	483595.50
Hill 151 (643)	4761.45	15.88	622479.59	0.00	622481.94
Hill 152 (642)	12401.83	14.09	3573701.31	0.00	3573695.99
Hill 153 (653)	13317.17	21.58	1547787.50	0.00	1547790.54
Hill 154 (652)	10996.73	18.26	788691.75	0.00	788690.94
Hill 155 (651)	2221.60	1.74	446225.47	0.00	446224.01
Hill 156 (661)	3973.36	5.48	1011862.55	0.00	1011869.59
Hill 157 (662)	5491.55	19.48	826459.14	0.00	826460.98
Hill 158 (663)	2286.60	11.33	37515.08	0.00	37514.79
Hill 159 (673)	5475.26	15.39	555802.96	0.00	555805.89
Hill 160 (671)	2100.30	2.15	422864.43	0.00	422864.85
Hill 161 (672)	4132.39	15.94	389415.07	0.00	389414.17
Hill 162 (682)	35843.93	17.19	1640764.97	0.00	1640767.10
Hill 163 (681)	2350.93	1.07	133209.44	3403.83	129805.89
Hill 164 (683)	30510.51	46.95	5512531.88	0.00	5512511.18
Hill 165 (692)	37337.91	14.86	3182613.41	0.00	3182610.67
Hill 166 (691)	2876.97	3.28	646756.53	0.00	646755.55
Hill 167 (693)	16487.73	25.40	927822.84	0.00	927831.80
Hill 168 (702)	13550.06	13.38	2614990.84	0.00	2614987.94
Hill 169 (703)	11244.56	5.16	721936.27	0.00	721938.35
Hill 170 (711)	2802.88	3.57	473576.53	0.00	473577.69
Hill 171 (713)	6625.09	12.66	306417.40	0.00	306416.83
Hill 172 (712)	5652.87	8.68	74806.33	0.00	74806.47
Hill 173 (721)	2586.70	2.12	244401.85	0.00	244400.82
Hill 174 (723)	7139.85	8.13	142156.40	0.00	142156.78
Hill 175 (722)	5433.17	23.41	334448.59	0.00	334448.90
Hill 176 (733)	5486.12	21.41	960669.53	0.00	960664.78
Hill 177 (731)	2250.97	4.12	599443.66	0.00	599442.29
Hill 178 (732)	1989.02	2.91	2250.23	0.00	2250.24
Hill 179 (743)	37412.72	21.35	7379456.94	0.00	7379461.05
Hill 180 (741)	1945.23	2.60	409654.30	6157.67	403497.12
Hill 181 (742)	25224.02	14.16	610388.21	477080.20	133309.42
Hill 182 (753)	5576.36	2.58	25779.90	0.00	25780.09
Hill 183 (752)	2269.89	7.75	57665.63	0.00	57665.46
Hill 184 (751)	1974.67	2.10	212391.30	0.00	212390.88
Hill 185 (763)	2631.24	1.82	124870.38	0.00	124869.98
Hill 186 (762)	740.69	1.80	1366.99	0.00	1367.09
Hill 187 (773)	2167.09	8.62	38103.92	0.00	38103.52
Hill 188 (772)	2455.51	7.94	76929.35	0.00	76929.74
Hill 189 (771)	2004.71	1.51	185223.19	0.00	185223.13
Hill 190 (783)	9004.03	6.48	508468.33	0.00	508468.58
Hill 191 (782)	3173.73	9.56	69938.13	0.00	69938.12
Hill 192 (781)	1884.18	1.87	277956.03	0.00	277956.58

Channels Flow and Impoundments	Discharge Volume (m ³)	Sediment Yield (tonne)	Soil Loss (kg)	Upland Charge (m ³)	Subsurface Volume (m ³)
-----	-----	-----	-----	-----	-----
Channel 1 (784)	14083.3	288.5	35945.4	14079.5	0.0
Channel 2 (774)	6644.5	106.6	22966.1	6645.1	0.0
Channel 3 (764)	24101.8	334.1	7452.9	24102.9	0.0
Channel 4 (754)	9845.1	130.7	35833.2	9833.1	0.0
Channel 5 (744)	64606.7	1891.2	78430.0	64619.5	0.0
Channel 6 (734)	9739.9	633.9	76568.2	9754.5	0.0
Channel 7 (724)	15193.5	234.2	40328.9	15192.8	0.0
Channel 8 (714)	15104.1	225.8	33113.9	15105.4	0.0
Channel 9 (704)	55083.9	1200.0	186163.4	55108.7	0.0
Channel 10 (694)	56733.2	1051.6	146944.1	56746.0	0.0

Channel 11 (684)	68772.3	1625.6	99604.8	68769.4	0.0
Channel 12 (674)	11734.3	474.4	71114.9	11741.4	0.0
Channel 13 (664)	11778.7	488.1	103227.9	11787.8	0.0
Channel 14 (654)	26573.7	645.7	36284.1	26576.5	0.0
Channel 15 (644)	19583.2	1217.4	12829.6	19592.6	0.0
Channel 16 (634)	7046.4	260.2	139738.0	7058.9	0.0
Channel 17 (624)	6223.2	276.7	83497.1	6227.7	0.0
Channel 18 (614)	6624.3	303.9	99872.4	6627.7	0.0
Channel 19 (604)	14547.3	588.4	46584.6	14565.0	0.0
Channel 20 (594)	21930.9	1162.6	116648.0	21945.7	0.0
Channel 21 (584)	5845.3	233.5	120213.2	5844.1	0.0
Channel 22 (574)	12275.2	313.5	70546.8	12282.2	0.0
Channel 23 (564)	18614.3	470.4	596546.9	18592.9	0.0
Channel 24 (554)	41157.6	1359.4	711243.6	41158.7	0.0
Channel 25 (544)	9705.8	312.0	109025.9	9704.5	0.0
Channel 26 (534)	69512.1	4382.7	675827.8	69538.5	0.0
Channel 27 (524)	93366.1	5788.7	1718982.0	93362.7	0.0
Channel 28 (514)	37229.6	1884.9	30103.0	37262.6	0.0
Channel 29 (504)	139284.3	8447.3	3384539.1	139310.8	0.0
Channel 30 (494)	154486.0	7215.6	1252716.0	154512.7	0.0
Channel 31 (484)	14227.7	710.6	39954.6	14228.5	0.0
Channel 32 (474)	169263.9	10805.6	3584966.1	169256.6	0.0
Channel 33 (464)	178897.3	16155.1	5221937.4	178912.6	0.0
Channel 34 (454)	209506.8	12238.4	2688222.0	209584.6	0.0
Channel 35 (444)	240588.7	19054.8	5078432.7	240628.4	0.0
Channel 36 (434)	271955.4	14950.9	276682.0	271953.1	0.0
Channel 37 (424)	283978.6	22425.1	7665018.1	283991.7	0.0
Channel 38 (414)	317371.0	13493.9	2522989.5	317492.6	0.0
Channel 39 (404)	34585.3	1575.8	54412.5	34568.6	0.0
Channel 40 (394)	357992.4	26885.4	19756757.2	358010.5	0.0
Channel 41 (384)	442081.8	51255.9	22126171.6	442158.1	0.0
Channel 42 (374)	25674.1	1571.1	40800.4	25662.3	0.0
Channel 43 (364)	480634.2	30394.7	50464.8	480729.3	0.0
Channel 44 (354)	9009.1	617.6	92781.3	9008.3	0.0
Channel 45 (344)	489697.0	22131.8	2815793.3	489679.8	0.0
Channel 46 (334)	546816.6	26420.4	21109317.1	546757.1	0.0
Channel 47 (324)	603875.3	40909.1	14228874.3	603929.1	0.0
Channel 48 (314)	10997.5	451.2	39526.7	10991.4	0.0
Channel 49 (304)	650972.8	48795.7	38454551.1	651080.3	0.0
Channel 50 (294)	14955.6	393.0	19749.6	14941.1	0.0
Channel 51 (284)	676950.3	26561.8	1888385.3	676984.0	0.0
Channel 52 (274)	7132.2	270.2	35325.1	7130.2	0.0
Channel 53 (264)	9785.5	425.2	45038.9	9785.6	0.0
Channel 54 (254)	55314.9	4981.9	137295.5	55315.0	0.0
Channel 55 (244)	45486.5	3052.8	26367.5	45472.0	0.0
Channel 56 (234)	101529.1	9847.4	7284764.3	101481.9	0.0
Channel 57 (224)	126956.4	8679.8	167170.7	126981.9	0.0
Channel 58 (214)	16879.7	1094.9	50185.9	16868.4	0.0
Channel 59 (204)	158019.6	7488.6	166886.8	158049.7	0.0
Channel 60 (194)	200537.4	8192.1	355239.9	200611.1	0.0
Channel 61 (184)	21047.7	1428.1	306961.2	21038.5	0.0
Channel 62 (174)	27891.4	1897.0	80642.4	27890.0	0.0
Channel 63 (164)	90718.5	5347.7	55844.8	90722.8	0.0
Channel 64 (154)	306710.8	8770.0	1941325.1	306812.5	0.0
Channel 65 (144)	1002438.2	26879.1	2437059.4	1002566.8	0.0
Channel 66 (134)	1019363.7	35872.8	41046070.1	1019497.6	0.0
Channel 67 (124)	1085266.3	52360.6	15981955.4	1085266.7	0.0
Channel 68 (114)	52664.1	3180.3	61948.3	52660.7	0.0
Channel 69 (104)	1167311.8	34542.0	520714.6	1167589.4	0.0
Channel 70 (94)	1189808.2	42024.1	8101661.4	1189960.1	0.0
Channel 71 (84)	13397.2	508.4	22631.7	13384.3	0.0
Channel 72 (74)	21514.3	802.3	115971.2	21497.8	0.0
Channel 73 (64)	39292.8	1609.1	2003519.7	39305.3	0.0
Channel 74 (54)	14723.8	852.4	52070.9	14715.2	0.0
Channel 75 (44)	115921.2	4787.1	183083.6	116017.3	0.0
Channel 76 (34)	1350006.2	41754.5	17576841.8	1350229.4	0.0
Channel 77 (24)	1375409.5	36735.3	27973906.5	1375377.6	0.0

129 storms produced 707.32 mm. of rainfall on an AVERAGE ANNUAL basis

33 events produced 18.88 mm. of runoff
passing through the watershed outlet on an AVERAGE ANNUAL basis

Average Annual Delivery From Channel Outlet:

Total contributing area to outlet	=	7284.55	ha
Avg. Ann. Precipitation volume in contributing area	=	51524869.	m ³ /yr
Avg. Ann. irrigation volume in contributing area	=	0.	m ³ /yr
Avg. Ann. water discharge from outlet	=	1375409.	m ³ /yr
Avg. Ann. total hillslope soil loss	=	257304.6	tonnes/yr
Avg. Ann. total channel soil loss	=	284629.2	tonnes/yr

Avg. Ann. sediment discharge from outlet = 36735.3 tonnes/yr
 Avg. Ann. Sed. delivery per unit area of watershed = 5.0 T/ha/yr
 Sediment Delivery Ratio for Watershed = 0.068

Sediment Particle Information Leaving Channel:

Class	Diameter (mm)	Specific Gravity	Particle Composition				Fraction In Flow Exiting
			% Sand	% Silt	% Clay	% O.M.	
1	0.002	2.60	0.0	0.0	100.0	7.3	0.478
2	0.010	2.65	0.0	100.0	0.0	0.0	0.001
3	0.049	1.80	0.0	43.2	56.8	4.1	0.505
4	0.692	1.60	57.3	24.9	17.8	1.3	0.013
5	0.200	2.65	100.0	0.0	0.0	0.0	0.003

Distribution of Primary Particles and Organic Matter in the Eroded Sediment:

type	fraction
clay	0.767
silt	0.222
sand	0.011
organic matter	0.056

Index of specific surface = 178.40 m²/g of total sediment
 Enrichment ratio of specific surface = 2.15

D.6. Resultados de la simulación R06

WEPP watershed simulation for Representative Hillslopes and Channels

30 YEAR AVERAGE ANNUAL VALUES FOR WATERSHED

Hillslopes	Runoff Volume (m ³)	Subrunoff Volume (m ³)	Soil Loss (kg)	Sediment Deposition (kg)	Sediment Yield (kg)
Hill 1 (23)	1264.37	3.31	7712.57	0.00	7712.58
Hill 2 (22)	1114.35	1.56	457.98	0.00	457.98
Hill 3 (33)	8548.82	12.80	657839.05	0.00	657839.05
Hill 4 (32)	18429.90	8.42	1704313.80	0.00	1704316.08
Hill 5 (43)	25936.91	12.42	3533811.72	0.00	3533804.45
Hill 6 (42)	16245.48	9.62	1110949.95	0.00	1110943.05
Hill 7 (52)	3400.89	17.04	152368.71	0.00	152368.52
Hill 8 (53)	599.63	20.28	688.90	0.00	688.91
Hill 9 (51)	3093.38	2.30	988181.48	0.00	988186.30
Hill 10 (73)	3531.45	11.49	203618.76	0.00	203618.78
Hill 11 (72)	943.38	12.36	3423.49	0.00	3423.51
Hill 12 (71)	1745.25	1.51	591208.51	0.00	591208.42
Hill 13 (83)	8045.92	1.90	267044.90	0.00	267043.64
Hill 14 (82)	7312.08	4.45	1524592.70	34256.84	1490339.27
Hill 15 (93)	1177.22	16.46	3462.63	0.00	3462.65
Hill 16 (92)	12151.23	18.36	2132827.68	0.00	2132817.16
Hill 17 (91)	1814.87	1.97	586912.68	0.00	586912.91
Hill 18 (103)	943.52	2.02	1414.74	0.00	1414.74
Hill 19 (102)	2830.28	7.20	570201.26	0.00	570204.41
Hill 20 (113)	3388.38	12.81	78331.68	0.00	78331.27
Hill 21 (112)	757.11	19.07	845.31	0.00	845.30
Hill 22 (111)	2564.11	2.31	852571.46	0.00	852567.11
Hill 23 (123)	17643.95	21.08	3230530.15	0.00	3230535.37
Hill 24 (122)	1066.41	9.06	351.37	0.00	351.37
Hill 25 (121)	2038.77	1.91	448981.64	0.00	448977.64
Hill 26 (133)	30605.40	13.35	1954586.56	0.00	1954579.06
Hill 27 (132)	22522.57	23.24	3516071.31	0.00	3516065.21
Hill 28 (143)	20964.07	29.18	2348800.83	0.00	2348786.35
Hill 29 (142)	22495.63	51.99	4692604.91	0.00	4692627.91
Hill 30 (141)	2277.03	1.37	1037091.03	0.00	1037090.88
Hill 31 (153)	360.40	1.89	13171.89	0.00	13171.94
Hill 32 (152)	138.29	0.45	42.70	0.00	42.70

Hill 33 (163)	34786.03	30.75	7278594.09	0.00	7278649.52
Hill 34 (162)	22091.21	13.21	1319710.03	0.00	1319708.12
Hill 35 (173)	13253.25	13.02	3187224.86	0.00	3187213.02
Hill 36 (172)	8863.64	7.79	447516.75	0.00	447518.20
Hill 37 (182)	33856.79	24.84	12429350.23	0.00	12429311.57
Hill 38 (183)	12083.44	20.21	1872657.18	0.00	1872656.52
Hill 39 (193)	9126.03	13.34	1575882.31	0.00	1575884.87
Hill 40 (192)	10540.28	18.90	3239483.89	0.00	3239501.39
Hill 41 (191)	2880.99	6.12	862422.75	0.00	862420.58
Hill 42 (203)	11197.52	18.97	3070119.13	0.00	3070103.12
Hill 43 (202)	6402.60	7.20	320748.72	0.00	320748.61
Hill 44 (201)	2383.91	4.23	638674.37	0.00	638675.67
Hill 45 (213)	20210.50	15.93	7765007.02	0.00	7764962.05
Hill 46 (212)	17934.20	19.19	7024441.75	0.00	7024452.33
Hill 47 (223)	614.27	4.34	12949.26	0.00	12949.28
Hill 48 (222)	9237.65	6.69	3470425.09	0.00	3470436.57
Hill 49 (233)	3580.23	12.26	176904.99	0.00	176905.02
Hill 50 (232)	8504.36	23.41	2364368.22	0.00	2364374.42
Hill 51 (231)	2364.78	3.73	650132.88	0.00	650133.48
Hill 52 (243)	5751.49	10.05	1302909.43	0.00	1302917.20
Hill 53 (242)	7532.10	10.96	2526863.54	0.00	2526853.85
Hill 54 (253)	5904.57	2.91	2297187.42	350676.90	1946505.61
Hill 55 (252)	1464.20	1.91	284105.80	0.00	284104.12
Hill 56 (262)	21394.79	19.04	5444305.48	0.00	5444351.04
Hill 57 (263)	19984.25	29.90	6513272.74	0.00	6513250.20
Hill 58 (261)	2228.94	3.60	583890.23	0.00	583890.27
Hill 59 (273)	33457.45	33.87	13933754.38	0.00	13933766.89
Hill 60 (272)	13234.12	29.35	3082401.51	0.00	3082404.20
Hill 61 (271)	1784.79	3.52	525373.49	0.00	525373.89
Hill 62 (281)	2328.81	3.36	414933.68	0.00	414935.27
Hill 63 (282)	5628.78	16.22	1172424.98	0.00	1172421.19
Hill 64 (283)	2382.22	7.05	45743.25	0.00	45742.91
Hill 65 (291)	1818.18	2.21	286541.31	0.00	286541.61
Hill 66 (293)	2548.86	7.64	71856.50	0.00	71856.49
Hill 67 (292)	2228.58	13.46	163574.00	0.00	163573.82
Hill 68 (303)	5983.70	11.07	403211.65	0.00	403211.19
Hill 69 (302)	20795.17	16.24	8988544.28	0.00	8988621.92
Hill 70 (313)	8154.21	2.58	1068038.66	1659.47	1066368.21
Hill 71 (312)	13254.73	6.26	6700067.61	4031630.73	2668402.16
Hill 72 (322)	431.19	17.73	919.08	0.00	919.08
Hill 73 (323)	1636.45	9.81	22929.88	0.00	22930.02
Hill 74 (321)	1757.49	1.66	761316.10	0.00	761312.84
Hill 75 (342)	289.34	15.93	277.25	0.00	277.25
Hill 76 (343)	303.91	15.53	275.00	0.00	275.00
Hill 77 (341)	1816.61	2.87	474456.34	0.00	474456.01
Hill 78 (353)	4202.65	1.23	8181.28	0.00	8181.32
Hill 79 (352)	7895.97	9.90	2388753.56	0.00	2388759.44
Hill 80 (363)	16124.00	26.65	5140573.38	0.00	5140568.01
Hill 81 (362)	7082.42	16.84	700603.45	0.00	700602.74
Hill 82 (361)	1928.38	2.85	523666.19	0.00	523666.64
Hill 83 (373)	5323.47	5.21	388171.80	0.00	388171.15
Hill 84 (372)	9759.01	12.93	3136152.41	0.00	3136160.09
Hill 85 (383)	1330.69	0.94	56315.87	0.00	56316.00
Hill 86 (382)	1740.94	1.51	186905.88	421.70	186485.01
Hill 87 (392)	12057.16	22.21	1668566.94	0.00	1668557.54
Hill 88 (393)	7400.68	9.48	195808.60	0.00	195809.41
Hill 89 (391)	1956.34	2.24	466119.62	0.00	466117.68
Hill 90 (403)	20619.83	9.54	3153525.22	0.00	3153511.39
Hill 91 (402)	14536.52	13.01	2308559.81	0.00	2308551.38
Hill 92 (422)	22709.57	15.96	6489638.66	0.00	6489632.34
Hill 93 (423)	23522.28	16.27	6680305.06	90520.00	6589751.26
Hill 94 (432)	19558.29	8.46	7113689.00	0.00	7113658.82
Hill 95 (433)	22835.25	9.39	9081559.55	1284251.75	7797230.49
Hill 96 (441)	2365.02	2.43	553235.95	0.00	553235.99
Hill 97 (442)	1146.88	6.45	985.19	0.00	985.18
Hill 98 (443)	581.89	8.59	417.67	0.00	417.67
Hill 99 (452)	465.85	0.77	13541.12	0.00	13541.00
Hill 100 (462)	14434.13	22.48	2085720.56	0.00	2085730.22
Hill 101 (461)	2184.09	1.65	256366.52	0.00	256365.73
Hill 102 (463)	21814.51	19.20	5923204.22	0.00	5923207.21
Hill 103 (473)	885.95	1.00	6321.49	0.00	6321.50
Hill 104 (472)	2067.34	2.14	287832.44	0.00	287830.93
Hill 105 (483)	10525.74	12.71	4632470.65	0.00	4632489.51
Hill 106 (482)	8121.47	7.83	1979053.15	0.00	1979057.00
Hill 107 (491)	1825.13	1.73	468973.38	0.00	468973.81
Hill 108 (492)	3154.90	17.02	91931.44	0.00	91931.24
Hill 109 (493)	4645.46	12.55	325132.04	0.00	325130.83
Hill 110 (503)	307.82	0.63	4196.50	0.00	4196.46
Hill 111 (512)	3375.80	10.91	31110.75	0.00	31110.69
Hill 112 (513)	4357.94	15.21	226174.58	0.00	226174.67
Hill 113 (511)	2262.85	2.99	522920.42	0.00	522921.65
Hill 114 (523)	13941.90	15.30	3579937.64	0.00	3579936.34
Hill 115 (522)	160.13	11.70	72.58	0.00	72.58

Hill 116 (521)	1768.57	1.20	393412.48	0.00	393412.54
Hill 117 (533)	16749.78	18.52	5302113.40	0.00	5302116.42
Hill 118 (532)	1359.60	17.20	20267.49	0.00	20267.55
Hill 119 (531)	2103.11	3.16	765837.54	0.00	765830.94
Hill 120 (543)	4295.33	10.98	292543.81	0.00	292542.76
Hill 121 (541)	2162.43	2.73	804641.31	0.00	804641.05
Hill 122 (542)	1325.47	18.95	64513.28	0.00	64513.34
Hill 123 (553)	15047.10	20.28	1796068.54	0.00	1796046.58
Hill 124 (552)	7315.20	16.91	342489.57	0.00	342489.01
Hill 125 (551)	1921.03	0.97	274687.28	0.00	274688.89
Hill 126 (563)	12712.87	4.02	710550.45	0.00	710555.90
Hill 127 (561)	2641.85	3.78	798388.29	0.00	798388.37
Hill 128 (562)	5207.15	17.12	736800.93	0.00	736802.38
Hill 129 (572)	22872.88	19.64	2017570.58	0.00	2017576.42
Hill 130 (571)	2048.89	2.35	83107.07	0.00	83106.72
Hill 131 (573)	25816.35	18.90	2256140.14	0.00	2256151.85
Hill 132 (583)	2991.77	3.16	471337.48	0.00	471337.48
Hill 133 (582)	282.02	0.97	80.19	0.00	80.19
Hill 134 (592)	31277.95	21.83	3874559.01	0.00	3874557.62
Hill 135 (591)	1993.09	1.15	196358.41	0.00	196357.81
Hill 136 (593)	26399.71	34.72	4583890.38	0.00	4583892.03
Hill 137 (602)	8632.13	9.50	1452218.75	0.00	1452217.86
Hill 138 (603)	10150.81	3.58	367988.95	0.00	367990.06
Hill 139 (611)	3134.27	2.79	483203.87	0.00	483206.15
Hill 140 (613)	7508.22	18.93	925129.84	0.00	925122.65
Hill 141 (612)	6738.02	6.51	139393.83	0.00	139393.41
Hill 142 (621)	2048.36	1.36	325010.69	996.00	324015.30
Hill 143 (623)	6468.16	10.94	317051.46	0.00	317051.58
Hill 144 (622)	5137.05	14.26	355420.65	0.00	355420.91
Hill 145 (633)	39205.21	22.47	10131426.97	0.00	10131438.20
Hill 146 (631)	1767.72	1.92	280888.71	0.00	280888.01
Hill 147 (632)	20113.59	15.70	589918.53	2601.18	587316.72
Hill 148 (643)	9547.09	7.38	345095.23	0.00	345096.54
Hill 149 (642)	17046.19	12.70	4242717.41	0.00	4242716.95
Hill 150 (641)	1807.02	1.35	299470.65	0.00	299469.67

Channels Flow and Impoundments	Discharge Volume (m ³)	Sediment Yield (tonne)	Soil Loss (kg)	Upland Charge (m ³)	Subsurface Volume (m ³)
Channel 1 (644)	28425.4	1625.7	578966.1	28421.3	0.0
Channel 2 (634)	61133.0	2835.5	40591.1	61126.0	0.0
Channel 3 (624)	13689.0	271.3	37015.9	13679.7	0.0
Channel 4 (614)	17410.5	521.2	84981.5	17408.3	0.0
Channel 5 (604)	49880.9	1262.9	510655.9	49895.0	0.0
Channel 6 (594)	59732.8	1849.1	93626.6	59727.6	0.0
Channel 7 (584)	112931.9	1739.7	18683.8	112891.1	0.0
Channel 8 (574)	50775.2	1455.0	78710.5	50778.3	0.0
Channel 9 (564)	20590.2	1011.2	409864.7	20586.7	0.0
Channel 10 (554)	24320.1	588.9	42653.2	24321.0	0.0
Channel 11 (544)	7810.8	438.4	108241.2	7815.6	0.0
Channel 12 (534)	20239.5	2268.7	376259.5	20251.3	0.0
Channel 13 (524)	15902.8	1446.8	40131.6	15890.9	0.0
Channel 14 (514)	10023.7	230.2	53069.3	10025.3	0.0
Channel 15 (504)	26269.5	1431.2	859874.0	26234.7	0.0
Channel 16 (494)	9644.5	238.4	36528.3	9656.8	0.0
Channel 17 (484)	54501.7	3686.1	168955.8	54542.1	0.0
Channel 18 (474)	77700.0	10290.6	5096500.7	77696.9	0.0
Channel 19 (464)	38461.4	2167.0	24429.8	38476.0	0.0
Channel 20 (454)	116635.2	13864.8	8590080.1	116622.4	0.0
Channel 21 (444)	4115.1	195.9	75087.3	4111.0	0.0
Channel 22 (434)	163094.2	26655.5	22231678.4	163133.2	0.0
Channel 23 (424)	217064.7	30725.1	22231429.3	217167.6	0.0
Channel 24 (414)	241434.1	36337.4	14560252.2	241384.7	0.0
Channel 25 (404)	297031.9	22156.3	15356685.3	297149.5	0.0
Channel 26 (394)	21464.4	664.8	244178.3	21447.6	0.0
Channel 27 (384)	321564.2	32694.0	11182217.5	321569.9	0.0
Channel 28 (374)	387376.4	16310.6	5069759.0	387433.3	0.0
Channel 29 (364)	25194.2	1689.3	21142.7	25181.1	0.0
Channel 30 (354)	424618.0	34021.1	16676020.3	424668.7	0.0
Channel 31 (344)	2450.2	207.1	91038.9	2444.2	0.0
Channel 32 (334)	427111.4	40577.8	18138537.4	427068.0	0.0
Channel 33 (324)	3863.6	231.3	79001.0	3854.2	0.0
Channel 34 (314)	452323.6	28887.1	1748070.8	452345.7	0.0
Channel 35 (304)	591929.1	26093.6	38315.2	592011.7	0.0
Channel 36 (294)	6624.0	181.0	47189.9	6618.9	0.0
Channel 37 (284)	10372.3	476.2	26335.9	10366.4	0.0
Channel 38 (274)	48554.1	4358.2	168443.0	48543.0	0.0
Channel 39 (264)	43672.9	3618.7	334654.5	43660.4	0.0

Channel 40 (254)	99644.0	12559.5	7789849.3	99600.4	0.0
Channel 41 (244)	123252.9	8792.9	85147.4	123282.8	0.0
Channel 42 (234)	14498.4	1003.3	15492.6	14488.7	0.0
Channel 43 (224)	147591.0	27684.2	17460017.1	147607.7	0.0
Channel 44 (214)	192332.8	27853.2	2659686.7	192389.3	0.0
Channel 45 (204)	20022.2	977.7	22964.7	20014.3	0.0
Channel 46 (194)	22592.0	1390.7	30400.9	22585.6	0.0
Channel 47 (184)	88601.6	6049.0	60878.2	88595.9	0.0
Channel 48 (174)	303018.5	33665.0	28298914.7	303066.6	0.0
Channel 49 (164)	951504.9	32999.3	1008134.9	951849.4	0.0
Channel 50 (154)	1013235.6	34580.4	18729120.6	1013138.8	0.0
Channel 51 (144)	45828.7	2109.5	129252.9	45819.0	0.0
Channel 52 (134)	1111783.5	35192.9	12975391.1	1112109.0	0.0
Channel 53 (74)	6256.9	216.7	70656.5	6245.4	0.0
Channel 54 (124)	20803.4	1017.7	345504.0	20780.6	0.0
Channel 55 (114)	6757.2	229.1	150116.4	6742.3	0.0
Channel 56 (104)	31359.0	1946.8	521034.1	31342.9	0.0
Channel 57 (94)	15194.7	628.8	18864.4	15180.0	0.0
Channel 58 (84)	61889.6	4252.2	1968568.5	61899.5	0.0
Channel 59 (54)	7145.0	358.5	170195.0	7133.5	0.0
Channel 60 (44)	117504.9	4666.0	84864.5	117490.2	0.0
Channel 61 (34)	1256139.4	36686.2	15427940.1	1256288.0	0.0
Channel 62 (24)	1286913.4	24773.1	2130570.8	1286946.7	0.0

129 storms produced 707.32 mm. of rainfall on an AVERAGE ANNUAL basis

23 events produced 18.82 mm. of runoff
passing through the watershed outlet on an AVERAGE ANNUAL basis

Average Annual Delivery From Channel Outlet:

Total contributing area to outlet	=	6839.05	ha
Avg. Ann. Precipitation volume in contributing area	=	48373719.	m ³ /yr
Avg. Ann. irrigation volume in contributing area	=	0.	m ³ /yr
Avg. Ann. water discharge from outlet	=	1286913.	m ³ /yr
Avg. Ann. total hillslope soil loss	=	263707.8	tonnes/yr
Avg. Ann. total channel soil loss	=	255723.4	tonnes/yr
Avg. Ann. sediment discharge from outlet	=	24773.1	tonnes/yr
Avg. Ann. Sed. delivery per unit area of watershed	=	3.6	T/ha/yr
Sediment Delivery Ratio for Watershed	=	0.048	

Sediment Particle Information Leaving Channel:

Class	Diameter (mm)	Specific Gravity	Particle Composition				Fraction In Flow Exiting
			% Sand	% Silt	% Clay	% O.M.	
1	0.002	2.60	0.0	0.0	100.0	7.3	0.466
2	0.010	2.65	0.0	100.0	0.0	0.0	0.001
3	0.049	1.80	0.0	43.2	56.8	4.1	0.524
4	0.692	1.60	57.3	24.9	17.8	1.3	0.006
5	0.200	2.65	100.0	0.0	0.0	0.0	0.003

Distribution of Primary Particles and
Organic Matter in the Eroded Sediment:

type	fraction
clay	0.765
silt	0.229
sand	0.006
organic matter	0.055

Index of specific surface = 177.84 m²/g of total sediment
Enrichment ratio of specific surface = 2.14