

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**ESTIMACIÓN Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS TEÓRICOS
CON MODELOS MATEMÁTICOS EN LA PRODUCCIÓN DE
SEDIMENTOS. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RIO**

ALLAHUALLA

TESIS

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

AUTOR:

MERCADO ZARATE CESAR AUGUSTO

DIRECTOR DE TESIS:

Ing.: ZENON MELLADO VARGAS

C.U. PUNO, JUNIO 2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

**ESTIMACIÓN Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS TEÓRICOS
CON MODELOS MATEMÁTICOS EN LA PRODUCCIÓN DE
SEDIMENTOS. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RIO
ALLAHUALLA**

Presentado por el bachiller en ciencias de la ingeniería civil **CESAR AUGUSTO MERCADO ZARATE** a la dirección de investigación de la facultad de ingeniería civil y arquitectura para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

APROBADO POR:

PRESIDENTE

:


ING. RAUL FERNANDO ECHEGARAY CHAMBI

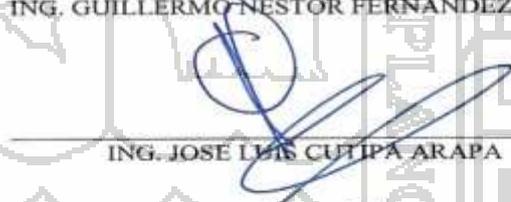
PRIMER MIEMBRO

:


ING. GUILLERMO NESTOR FERNANDEZ SILA

SEGUNDO MIEMBRO

:


ING. JOSÉ LUIS CUTIPA ARAPA

DIRECTOR DE TESIS

:


ING. ZENÓN MELLADO VARGAS

ASESOR

:


ING. ROBERTO CAMPAÑA TORO

TEMA: INGENIERÍA DE PRESAS

ÁREA: HIDRAULICA

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional del Altiplano - Puno, mi casa de estudios por abrirme las puertas .

Este trabajo que he llevado a cabo no sería posible sin las personas que voy a mencionar:

Mi Director de tesis el Ing. Zenón Mellado Vargas, y mi Asesor de tesis el Ing. Roberto Campaña, por haberme apoyado en la realización de este trabajo.

Mi Jurado Revisor de tesis el Ing. Raúl Echegaray, José Luis Cutipa y Néstor Fernández, por haberme apoyado en la realización de este trabajo.

*A mis compañeros de la escuela, compañeros de trabajo y amigos:
Héctor Romero, Oscar Urquiaga, Eddy Chura, Miguel Mamani, Uber Pariente,
Moisés Mendoza, Ronald Valdivia, Ferdy Flores, Manuel Cano, Freddy Collarani,
Yohana Delgado, Edwing Arapa, David Apaza,, Carlos Holguín, Henry Condori,
Edgar Arapa, ... Muchas gracias!*

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1.- Antecedentes	13
1.2.- Justificación del Proyecto	14
1.3.- Planteamiento del Problema	15
1.4.- Objetivos del Proyecto	16
2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.- Precipitación	17
2.2.- Erosión.....	18
2.2.1.- Erosión Laminar o Erosión Hídrica.....	18
2.2.2.- Erosión por Movimiento de Masas.....	22
2.3.- Producción de Sedimentos.....	22
2.4.- Relación Entre la Producción de Sedimentos y la Deforestación.....	25
2.5.- Relación entre la Hidrología y el Transporte de Sedimentos	26
3.- ANALISIS DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS.....	27
3.1.- Métodos Teóricos.....	27
3.1.1.- Método de Dendy y Bolton (1976).....	27
3.1.2.- Método de Gavrilovic (1976, 1988).....	28
3.1.3.- Método de Fleming (1993).....	30
3.1.4.- Método de USLE.....	32
3.2.- Modelos Matemáticos	38
3.2.1.- Modelo Matemático Sed Cad 4.....	38
3.2.2.- Modelo Matemático Kíneros 2.....	41
4. APLICACION A LA CUENCA DEL RIO ALLAHUALLA	48
4.1.- Área de Aplicación	48
4.2.- Caracterización Hidrológica de la Cuenca Allahualla	49
4.3.- Aplicación de las Metodologías Propuestas.....	50
4.3.1.- Aplicación con los Métodos Teóricos	50
Aplicación del Método Teórico Gavrilovic	50
Aplicación del Método Teórico USLE	51
4.3.2.- Aplicación con el Modelo Sed Cad 4.....	53

4.3.3.- Aplicación con el Modelo Kineros	63
5. SIMULACIÓN, GENERACION DE RESULTADOS.....	76
5.1.- Cálculos Teóricos y Simulación de los Modelos.....	76
5.2.- Generación de Resultados	76
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
6.1.- Conclusiones	82
Precipitación.....	82
Caudales.....	82
Sedimentos	82
6.2.- Recomendaciones	83
7. BIBLIOGRAFIA.....	84



INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tipos de Precipitación.

Tabla 3.1: Factores descriptivos utilizados en el Modelo de Gavrilovic.

Tabla 3.2: Valores de las constantes a y n según Cobertura Vegetal.

Tabla 3.1: Parámetros de cálculo para el Factor Topológico de C.

Tabla 4.1: Evento de Lluvia (Estación Quechua).

Tabla 4.2: Clasificación de Partículas Según la AGU.

Tabla 4.3: Parámetros Hidráulicos y Sedimentológicos de ingreso a la Cuenca en el Sed Cad 4.

Tabla 4.4: Parámetros Hidráulicos y Sedimentológicos de ingreso a la Cuenca en el Kineros 2.

Tabla 4.5: Recomendación de Coeficientes de Número de Manning para Flujo Superficial.

Tabla 4.6: Parámetros hidráulicas del suelo.

Tabla 4.7: Parámetros de Intercepción.

Tabla 5.1. Producción de Sedimentos en el Modelo Sed Cad.

Tabla 5.2. Producción de Sedimentos en el Modelo Kineros.

Tabla 5.3. Producción de Sedimentos con el Método Gavrilovic.

Tabla 5.4. Producción de Sedimentos con el Método USLE.

INDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1: Erosión de la Superficie como resultado del impacto de Lluvia y Turbulencia (Brooks, 1997).
- Figura 2.2: Sistema Típico de erosión y depósito de sedimentos en una Cuenca (Vanoni, 1977).
- Figura 2.3: Inicio de erosión por gotas de lluvia (Rivera Trejo et al., 2006).
- Figura 2.4: Tasa de sedimentación afectada por la capacidad de transporte y suministro de sedimentos para diferentes tamaños de partículas (Brooks 1997).
- Figura 3.1: Monográfico para la Estimación del Factor K.
- Figura 3.2: Esquema del Balance de Masa en el Kineros 2.
- Figura 4.1: Mapa de Ubicación de la Cuenca Allahualla.
- Figura 4.2: Caracterización hidrológica de la Cuenca Allahualla.
- Figura 4.3: Información de la Tormenta en el Modelo SC4.
- Figura 4.4: Distribución Granulométrica del Material Sólido de la cuenca Río Allahualla.
- Figura 4.5: Información Sedimentológica en el Modelo SC4.
- Figura 4.6: Caracterización hidrológica de la Cuenca Allahualla para el Modelo Matemático Sed Cad 4.
- Figura 4.7: Información hidrológica en el Modelo SC4.
- Figura 4.8: Información Subwatershed en el Modelo SC4.
- Figura 4.9: Caracterización hidrológica de la Cuenca Allahualla para el Modelo Matemático Kineros 2.
- Figura 5.1: Comparativo de Resultados Obtenidos en la Estimación de la producción de Sedimentos.
- Figura 5.2: Comparativo de Resultados Obtenidos del Modelo Kineros 2 con el Monitoreo Sedimentológico.

GLOSARIO DE TERMINOS

Input:	Parámetros de ingreso al modelo matemático.
Ouput:	Parámetros de salida del modelo matemático.
Hietograma:	Gráfico de tiempo versus precipitación.
Número de Curva:	Parámetro adimensional que define la infiltración.
Escurrimiento:	Flujo superficial.
PRE:	Datos de entrada al modelo Kineros.
PAR:	Datos de entrada al modelo Kineros.
OUT:	Datos de salida del modelo Kineros.
SC4:	Modelo Sed Cad 4.
NRCS:	Servicio de Conservación de Recursos Naturales.
USLE:	Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo.
EIA:	Estudio de Impacto Ambiental.

SIMBOLOGIA

S	: Volumen de sedimentos producido (m ³).
Q	: Escorrentía media anual (mm).
G	: Descarga media de material erosionado(m ³ /año).
W	: Producto de la producción de sedimentos(m ³ /año).
R	: Coeficiente de retención.
t_m	: Temperatura media(°C).
F	: Superficie de la zona de estudio (km ²).
Z	: Coeficiente de erosión.
φ	: Coeficiente de resistencia del suelo erosivo.
I	: Pendiente media de la cuenca.

- Q_s : Transporte medio anual de sedimento (m^3/s).
- P : Precipitación media (mm).
- S : Superficie de la cuenca (m^2).
- R : Factor de erosividad pluvial ($J.m^{-2}.cm.h$).
- E : Pérdida anual de suelo (Tn/ha).
- K : Factor de Erosionabilidad del suelo ($Tn.m^2.h / (ha.J.cm)$).
- $L.S$: Factor topológico que está en función a la pendiente y longitud de declive.
- C : Factor de cobertura vegetal.
- P : Factor de prácticas de conservación.
- f_c : Capacidad de Infiltración (m/s).
- K_s : Conductividad hidráulica saturada (m/s).
- K_i : Conductividad hidráulica inicial (m/s).
- s : Contenido de agua del suelo.
- i : Contenido inicial de agua del suelo.
- G : Capilaridad (m).
- P : Tasa de precipitación (mm/s).
- Y : Parámetro Smith - Parlange (0-1).
- F : Lluvia acumulada (mm).
- B : Parámetro de capilaridad (m).
- C_s : Concentración de Sedimentos (L^3/ L^3).
- Q : Tasa de Descarga de Agua (L^3/T).
- A : Área de la sección del Flujo (L^2).
- e : Tasa de Erosión del Lecho de Suelo (L^2/T).
- q : Tasa de Sedimentación Lateral del Cauce ($L^2/T/L$).

RESUMEN

Del informe de Tesis con título "Estimación y Comparación de Métodos Teóricos con Modelos Matemático en la Producción de Sedimentos. Aplicación a la cuenca del Río Allahualla" se resumen lo siguiente:

En el estudio se presenta una comparación en la producción de Sedimentos de la Cuenca del río Allahualla (distrito de Yauri, provincia de Espinar, región Cusco) para un evento tormenta de lluvia de 42.3 mm. Esta comparación se realizará entre Modelos Matemáticos Determinísticos (Sed Cad 4 y Kineros 2) y Metodologías Teóricas (Gavrilovic y USLE).

Los modelos hidrológicos están debidamente implementados, también tienen el respaldo técnico y son usados con mucha frecuencia en los campos de la hidráulica y medio ambiente. Los métodos teóricos también tienen buena aceptación dado que se han estado mejorando y actualizando continuamente.

Los resultados obtenidos de la Producción de Sedimentos en la cuenca Allahualla alcanzan con las simulaciones: a 7 900 Tn con el modelo Sed cad y 29 760 Tn con el modelo Kineros. Con el método teórico del Gavrilovic se obtiene 34 480 y con el método teórico USLE se obtiene 17 686.

ABSTRACT

Thesis titled. "Estimation and Comparison of Theoretical Methods with Mathematical Models in Sediment Production. Application to River Basin Allahualla" are summarized as follows:

In the study, is presented a comparison in the production of Sediments Basin Allahualla River (Yauri district, province of Espinar, Cusco region) for a storm rainfall of 42.3 mm. This comparison will be made between Mathematical Deterministic Models (Sed Cad 4 and Kineros 2) and Theoretical Methodologies (Gavrilovic and USLE).

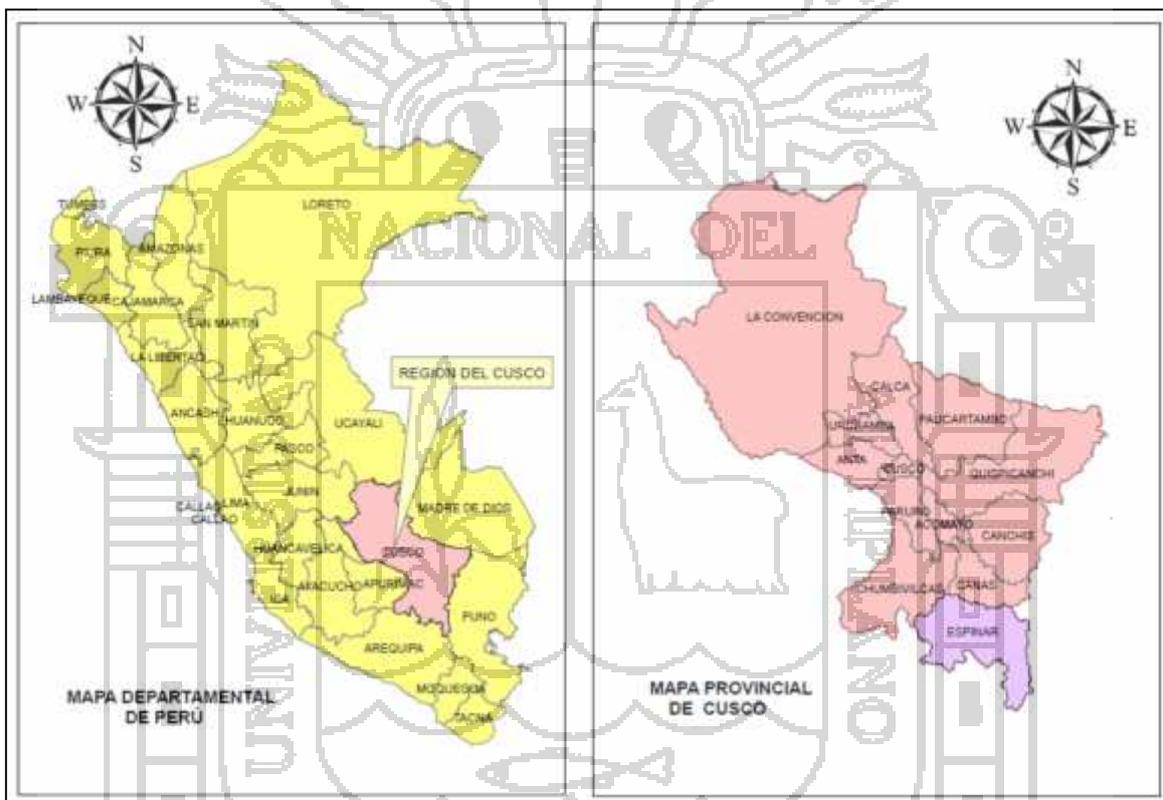
The Hydrological models are properly implemented, It is also have technical support and are used extensively in the fields of hydraulics and environment. The Theoretical methods also have good acceptance since it has been continually improving.

The results of Sediment Production in the basin river Allahualla, reach to : with model Sed Cad 4 7900 Tn and 29 760 with Kineros 2 model. With the theoretical method Gavrilovic is obtained 34 480 and with the theoretical method USLE is obtained 17 686.

1. INTRODUCCIÓN

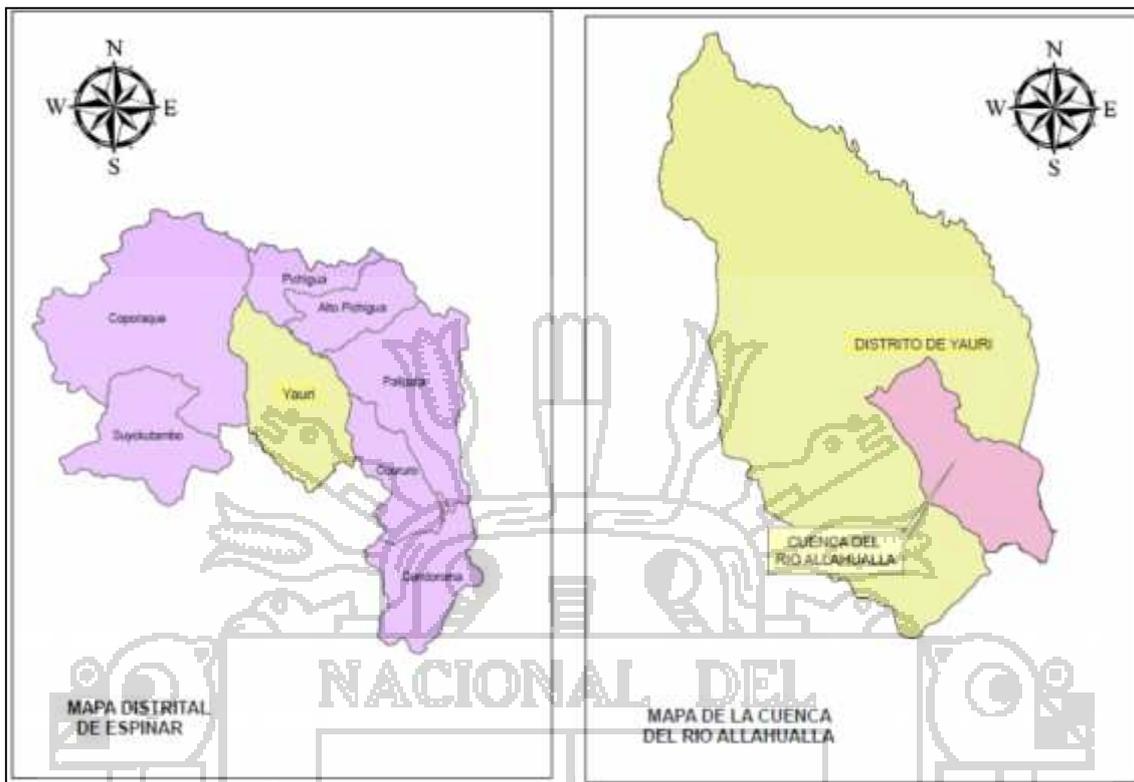
El presente estudio tiene por objetivo determinar la cantidad de sedimentos producidos en la Cuenca del río Allahualla, ubicado en el distrito de Yauri, provincia de Espinar, región de Cusco y país de Perú. En las figuras 1 se puede observar la ubicación de la cuenca de estudio.

Figura 1. Mapa de Ubicación de la Cuenca del Río Allahualla



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Mapa de Ubicación de la Cuenca del Río Allahualla



Fuente: Elaboración propia.

1.1.- Antecedentes

Los primeros avances en la hidráulica y en el transporte de sedimentos se remontan a China 4,000 años a.C. Durante el mismo periodo hubo avances importantes en Mesopotamia, donde se construyeron canales que partían del Tigris y del Éufrates con fines de riego, además de obras de control e inundaciones.

Ya en tiempos contemporáneos es cuando se ha alcanzado un mayor logro en las ciencias y en la hidráulica no es la excepción, ni tampoco la cuestión fluvial y la producción de sedimentos en cuencas. Numerosos investigadores como Lois Navier, Ademar, Jean-Clude Barré de Saint Venant, W. Froude, R Manning, G. Stokes, H. Bazin, O. Reynolds, J. Boussinesq, Dupuit y DuBoys, entre otros,

cambiaron la forma de hacer hidráulica. En materia fluvial y específicamente en el transporte de sedimentos Dupuit y DuBoys destacaron (Levi, 1986).

En Estados Unidos las primeras investigaciones comenzaron en 1907. Miller llevó a cabo sus primeros experimentos en Missouri en 1917 (Hudson, 1982). Con la creación del Servicio de Conservación de Suelo EE.UU.(1935), se desarrolló el conocimiento de los procesos erosivos (MMA_M, 1998). H. Benett y L.A. Jones midieron la erosión de parcelas experimentales entre 1928 y 1933(Colotti, 2004). Hacia 1936 Cook ya intuía la relación entre la erosión, el suelo, la lluvia, la pendiente y la cobertura vegetal (López Cárdenas, 2003). Siendo Zingg (1940) el primero en proponer la primera ecuación para estimar la pérdida del suelo (Hudson, 1982). Laws en 1940 y Ellison en 1944 identificaron a la lluvia como factor de peso en la erosión (Hudson, 1982). Hacia 1941 Smith añade los factores de cultivo y prácticas de conservación a la ecuación de Zingg. poco después, en 1947 Browning incorpora el factor de suelo, mientras que Musgrave en el mismo año presenta su ecuación, la cual toma en cuenta la intensidad de la lluvia, el tipo de suelo, el relieve y la cubierta vegetal (Simons y Sentürk, 1992). Para 1959 con base en el trabajo de sus predecesores y experimentación Wischmeir propone la primera versión de la ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE), la cual se mejora para 1965 y 1978 en conjunto con Smith (Wischmeir y Smith, 1965 y 1978). Esta ecuación es la más aceptada para la estimación de producción de sedimentos.

1.2.- Justificación del Proyecto

Las Obras hidráulicas de conducción y almacenamiento en Perú tienen un papel importante en el desarrollo del país. Su construcción es ejemplo del avance tecnológico nacional y ha respondido permanentemente al objetivo de

aprovechar racionalmente un recurso como el agua, que es estratégico para el desarrollo sostenible del país.

En tal sentido, estimar la producción de sedimentos más acertadamente resulta necesario. Ya que la sobreestimación de sedimentos añade un innecesario costo a las estructuras involucradas, por otro lado subestimarlos llevará a dejar fuera de servicio infraestructura antes de tiempo. Queda claro que las obras hidráulicas son costosas, y al quedar fuera de operación ocasionan una pérdida económica.

En la costa norte y sur de Perú existen estructuras de almacenamiento donde se subestimó el aporte de sedimentos, lo que ha significado que estos proyectos queden fuera de operación antes de lo previsto. Esto ha motivado a elaborar este proyecto de tesis que permitirá brindar alternativas de diseño en la estimación del volumen muerto de sedimentos en estructuras de almacenamiento como embalses de recurso hídrico para proyecto de irrigaciones, agua potable, etc.

Este proyecto de tesis, también será de utilidad en estudios de Impacto Ambiental en el Perú, pues el Ministerio del Ambiente en el Perú pide a empresas mineras, empresas de generación eléctrica y otras empresas de inversión privada que incorporen en el EIA un estudio de línea base en el tema de sedimentos, donde se evalúa el impacto de la construcción y operación del proyecto.

1.3.- Planteamiento del Problema

Es necesario revisar criterios de diseño en toda obra hidráulica considerando a la erosión hídrica laminar en cuencas como un parámetro importante a ser

tomado en cuenta. De esta manera se pretende contribuir en la confiabilidad de los cálculos.

Para los fines de estudio, se realizará una comparación entre los resultados de métodos teóricos y los resultados de la simulación en los modelos matemáticos Sed Cad 4 y Kineros 2. Así se pretende contribuir en la concepción y diseño de la cuantificación de sedimentos en cuencas producidos por la erosión hídrica laminar, especialmente en cuencas hidrográficas del Perú.

1.4.- Objetivos del Proyecto

Los objetivos de este proyecto de tesis son: Estimar y comparar los resultados de producción de sedimentos en la cuenca Allahualla entre los métodos teóricos y los Modelos Matemáticos Determinísticos Sed Cad 4 de la Universidad de Kentucky de los EE.UU y el Modelo Matemático Kineros 2 del Departamento de Agricultura de los EE.UU.

2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1.- Precipitación

Generalmente se ha tomado en cuenta el tamaño de gotas y el estado del agua, usualmente líquida o sólida. En la tabla 2.1 se ofrece un resumen de los tipos de precipitación más comunes.

Los hidrólogos se encuentran involucrados mayormente con la lluvia y la nieve, debido a que estas proporcionan las cargas para el diseño de estructuras. La lluvia es de sumo interés en el momento y el lugar que ocurre, mientras que la nieve adquiere su importancia durante su derretimiento, lo cual después de un periodo importante de acumulación. La ocurrencia de eventos de lluvia y nieve, así como el tamaño y forma de la gota de lluvia o los copos de nieve, está en función de las condiciones atmosféricas en el lugar de formación y la temperatura promedio de la atmósfera.

Tabla 2.1. Tipos de Precipitación

Nombre	Descripción	Tamaño
Llovizna	Pequeñas gotas de agua, intensidad (1mm/h).	0.1-0.5mm
Lluvia	Ligera: < 2.5mm/h Moderada: 2.5-7.6mm/h Fuerte: > 7.6mm/h	0.5mm
Helada	Capa de hielo, formada por llovizna o lluvia congelada.	Gravedad Específica 0.8

Llovizna Helada	Depósito de hielo opaco y granular.	Gravedad Específica 0.2-0.3
Nieve	Cristales hexagonales de hielo.	Gravedad Específica 0.1
Granizo	Fragmentos irregulares de hielo.	De 5 a mas de 125mm
Hielo Granulado	Hielo Traslúcido.	5mm

Fuente: Adaptada de Vente Te Chow.

2.2.- Erosión

2.2.1.- Erosión Laminar o Erosión Hídrica

Trata de la erosión causada por la acción del agua, a través de la lluvia y el escurrimiento. La combinación de estos mecanismos da como resultado la erosión de la superficie (MMA_M, 1998).

Erosión: desgaste o destrucción producida en la superficie de un cuerpo por la fricción continua (Brooks, 1997). En hidrología, erosión se puede definir como: el desgaste de la superficie terrestre por agentes externos como el agua o el viento.

Lluvia: La lluvia actúa de manera directa e indirecta. **La acción directa** se refiere al impacto de las gotas de lluvia en la superficie del suelo. La energía cinética liberada por el impacto es suficientemente grande para romper los lazos existentes entre las partículas, pudiendo esparcir más de 200T/ha en un suelo sin vegetación, salpicando las gotas hasta 50cm de altura y 1.50m de longitud

(Brooks et al., 1997). Este es el fenómeno más importante, ya que, es el que disgrega las partículas que forman la estructura (ver Figuras 2.1 y 2.2).

Las características del impacto de las gotas de lluvia dependen del tamaño de la gota y del tirante del escurrimiento. El esfuerzo cortante que produce el impacto puede llegar a ser 100 veces el esfuerzo cortante de flujo laminar somero, sin embargo el esfuerzo cortante producido por la gota de lluvia puede despreciarse si, el tirante del escurrimiento es mayor a 3 veces el diámetro de la gota de lluvia (Julien, 2002).

En la **acción indirecta**, el suelo se mezcla con el agua y lleva de manera lateral el movimiento de las partículas a otro punto de la ladera. Este desplazamiento no tiene consecuencias si no existe una fuerza que las haga moverse aguas abajo, es la gravedad que actúa por medio de la pendiente del terreno. Aunado a esto se asocia la compactación y la velocidad de infiltración, entonces el agua que sería absorbida por el suelo se quede en la superficie, formando así el escurrimiento (MMA_M, 1998). (Ver figura 2.2 y 2.3).

Escurrecimiento: Se forma cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la velocidad de infiltración. La corriente erosiona por medio de dos acciones: una disgregadora y otra transportadora. La primera se produce cuando las fuerzas tractivas del flujo superan a las fuerzas resistentes de las partículas del suelo. La segunda se lleva a cabo cuando se satura el suelo y el agua empieza a escurrir, trasladando los sólidos hacia aguas abajo. Estas partículas son muy finas y van a componer la carga de lavado de los cauces (MMA_M, 1998).

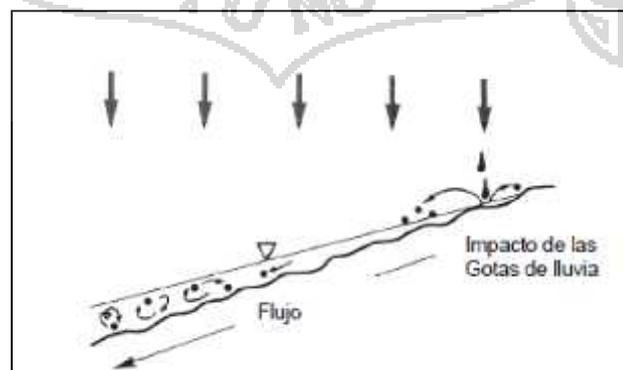
El proceso de erosión consiste en el desprendimiento y transporte de partículas de la superficie del suelo debido al agua (hídrica) y al viento (eólica), siendo el agua el principal agente de erosión. Al encontrarse las partículas sobre la

superficie pueden ser desprendidas por las gotas de lluvia (figura 2.1), por los escurrimientos y viento. Entonces, pueden ser transportados por el viento, agua o gravedad. Tanto para el desprendimiento como para transporte de partículas el proceso requiere energía. Esta llega a la superficie por el impulso que produce el momento (masa x velocidad), que ocasiona la caída de las gotas de lluvia, el escurrimiento o el viento. Además del desprendimiento se produce el transporte, en algunas ocasiones el suelo que fue arrastrado por la erosión llega a los ríos, en ellos la arena y el limo arrastrado pueden llegar a formar bancos de sedimentos (Brooks et al., 1997; Rivera Trejo et al., 2006).

Erosión Laminar, significa: remoción de delgadas capas del suelo extendida más o menos uniformemente en toda la superficie (Vanoni, 1977). producto del impacto de las gotas de lluvia y por el escurrimiento, mientras que al formarse el flujo, este transporta el material erosionado. El escurrimiento circula lentamente sin cauce en régimen laminar, y no es permanente (López Cárdenas, 2003).

La erosión laminar causa grandes aportaciones de sedimentos a los cuerpos de agua, además de generar la pérdida de nutrientes en los suelos debido a que se afectan las partículas más finas (López Cárdenas, 2003).

Figura 2.1. Erosión de la Superficie como resultado del impacto de Lluvia y Turbulencia (Brooks, 1997).



Fuente: Brooks, 1997.

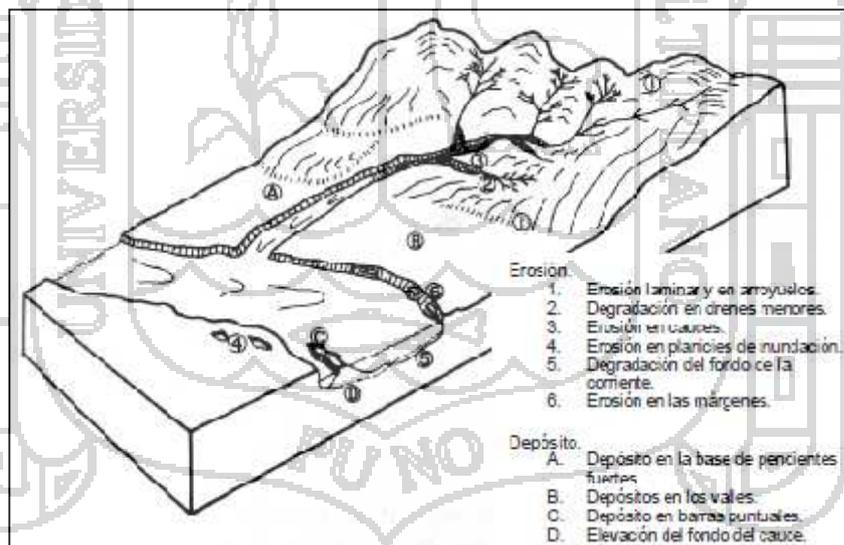
Pérdida de Suelo: Cantidad de suelo removida por erosión de cuencas hidrográficas.

Producción de Sedimentos: Total de sedimentos que salen de una cuenca hidrográfica.

Tasa de Entrega de Sedimentos: Medida de la disminución de sedimento erosionado.

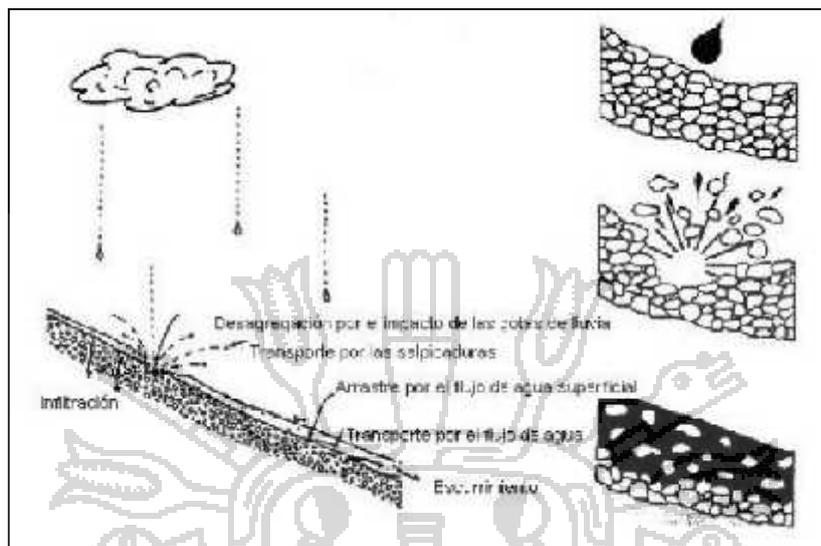
Velocidad de Erosión: Velocidad a la cual el suelo es erosionado una cierta área.

Figura 2.2. Sistema Típico de erosión y depósito de sedimentos en una Cuenca (Vanoni, 1977)



Fuente: Vanoni, 1977.

Figura 2.3. Inicio de erosión por gotas de lluvia (Rivera Trejo et al., 2006).



Fuente; Rivera Trejo et al. 2006.

2.2.2.- Erosión por Movimiento de Masas

Erosión por movimiento de masa se lleva a cabo al saturarse el suelo, cuando este se encuentra en pendiente y carece de vegetación, ocasionando una falla por acción de la gravedad. Otra circunstancia que propicia este tipo de desplazamientos sucede cuando el agua alcanza un horizonte de suelo apoyado sobre una capa impermeable, lubricándolo y, si esta en pendiente, puede crear una línea de desequilibrio en toda la zona de suelo situada por encima (López Cárdenas, 2003).

2.3.- Producción de Sedimentos

El sedimento es un material fragmentario, principalmente formado por la desintegración física química de las rocas de la corteza terrestre. Sus partículas varían en tamaño desde grandes rocas hasta fragmentos de tamaños coloidales. También varían en el peso específico y su composición mineral, los materiales

predominantes son minerales de cuarzo y minerales de arcilla (caolinita, illita, montmorillonita y clorita). Estos últimos tienen una estructura similar a una lámina que puede cambiar fácilmente (floculación) bajo la influencia de fuerzas electrostáticas (fuerzas de cohesión) en un ambiente salino. En consecuencia hay una diferencia fundamental en el comportamiento sedimentario entre la arena y la arcilla (Leo C. Van Rijn)

Los sedimentos se pueden clasificar de acuerdo a su origen genético:

Sedimento Lithogeneous, que son productos detríticos. de desintegración de rocas pre-existentes.

Sedimentos Biogeneous, que son restos de organismos principalmente carbonato, ópalo y calcio fosfato.

Sedimentos Hydrogeneous, que son resultantes de agua de mar o de agua intersticial.

Descriptivamente, la clasificación de sedimentos también puede estar relacionado con características como: color, textura, tamaño de grano, contenido orgánico, etc. Por ejemplo una mezcla de arena y arcilla es clasificada como una arcilla de arena cuando el porcentaje de arena es entre en 25 y 50 %. Del mismo modo, está la clasificación de arenas arcillosas, arenas, gravas, grava arenosa, grava arcillosa y arcillas de gravas.

Los sedimentos son el producto de los distintos tipos de erosión. Del material desprendido de la cuenca, sólo una pequeña parte atraviesa la cuenca y llega a la salida de ésta. El resto de los sedimentos son depositados en las colinas, planicies de inundación y las áreas entre riachuelos. Según Brooks et al. (1997), menos del 25% de los sedimentos generados son descargados al mar. Mientras

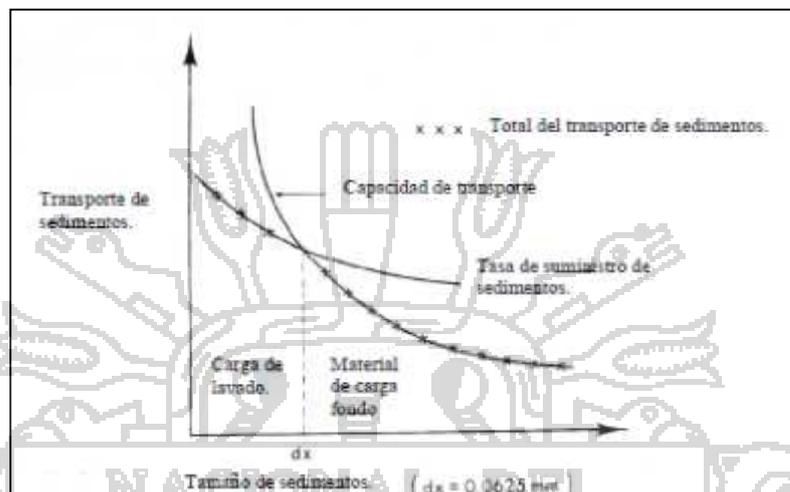
que la producción de sedimentos consiste en el total de material que sale de la cuenca o sistema de drenaje, medido para un cierto periodo y un punto específico (Vanoni, 1977).

La erosión de una cuenca es directamente proporcional a la producción de sedimentos de la misma. Ésta última se ve afectada por la cubierta vegetal existente; por consiguiente en las zonas áridas se tiene una producción mayor. En ese sentido, puede haber cuencas pequeñas con una producción de sedimentos más importante que cuencas más extensas (Ramirez, 2009).

La cantidad de sedimentos en una corriente depende del suministro de material, de las características del cauce, del gasto y de las características físicas del sedimento. El suministro de material y el gasto son función de la climatología, la topografía, la geología, la cubierta vegetal y el uso del suelo de la cuenca. Las características del cauce dependen de la morfología, de la pendiente del cauce, de la rugosidad y del material de fondo. Por otro lado las características físicas de las partículas son función del tipo de suelo, de la geología y del estado de intemperismo de la cuenca y el cauce (Ramirez, 2009).

Cuando la energía de la corriente excede el suministro de sedimentos, ocurre una degradación en los cauces. Por el contrario si el suministro de sedimentos sobrepasa la energía de la corriente se depositaran sedimentos elevando el fondo del río. En la Figura 2.4, se muestra la cantidad de material que puede llevar una corriente sin que se altere la sección del mismo (Brooks 1997).

Figura 2.4. Tasa de sedimentación afectada por la capacidad de transporte y suministro de sedimentos para diferentes tamaños de partículas (Brooks 1997).



Fuente: Brooks, 1997.

2.4.- Relación Entre la Producción de Sedimentos y la Deforestación

Se ha demostrado que la producción de sedimentos se incrementa sustancialmente después de la deforestación. Posteriormente, conforme el bosque se recupera y madura se reduce la tasa de sedimentos. Otra consecuencia de la deforestación es la compactación del suelo, lo que reduce su velocidad de infiltración (Stott y Mount, 2004).

El incremento de la producción de sedimentos provoca el arrastre de un número mayor de agregados finos y gruesos, que se ven reflejados como carga en suspensión y carga de fondo respectivamente. Ambas son transportadas aguas abajo. La carga de fondo a tasas mucho más lentas que la carga en suspensión. Una vez en las zonas bajas y/o planas se almacenan en forma de barras, provocando un desvío del flujo o inestabilidad en el cauce (Scott y Mount, 2004).

2.5.- Relación entre la Hidrología y el Transporte de Sedimentos

Dado que la producción de sedimentos es directamente proporcional al material erosionado de la cuenca, y siendo el proceso de lluvia-escorrimento la principal fuente de energía para la erosión, además proveer transporte a las partículas, encontramos que se puede estimar la producción de sedimentos a partir de la hidrología.

Un aumento de erosión en la cuenca implica un incremento de material en suspensión en el cauce, que se puede sedimentar en los cuerpos de agua. Lo que va mermando la capacidad hidráulica en los cauces, de almacenamiento y regulación de los embalses. Por otro lado una menor erosión en la cuenca implica una reducción de suministro al sistema de drenaje de la misma, lo que pudiera reproducir como socavación en los cauces.

La erosión no es buena ni mala, sino que es un proceso que tiende a estar en equilibrio, cuando es alterado existen consecuencias positivas y/o negativas. Lo interesante es pronosticar la cantidad de suelo que va a erosionarse naturalmente así como el impacto asociado (Simons y Senturk, 1992).

3.- ANALISIS DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS

3.1.- Métodos Teóricos

Estimación de Sedimentos por Métodos Teóricos

- Método de Dendy y Bolton (1976).
- Método de Gavrilovic (1976, 1988).
- Método de Fleming.
- Método USLE.

3.1.1.- Método de Dendy y Bolton (1976)

Se proponen relaciones entre volúmenes de sedimentos depositados, escorrentía y superficie de la Cuenca.

$$S = \left(\frac{Q}{5.8}\right)^{0.4} * \left[1.43 - 0.26 * l^0 \left(\frac{A}{2.5}\right)\right], \text{ para } Q < 50 \text{ mm/Año;}$$

$$S = 685.79 * (e)^{-0.1} \left(\frac{Q}{5.8}\right) * \left[1.43 - 0.26 * l^0 \left(\frac{A}{2.5}\right)\right], \text{ para } Q \geq 50 \text{ mm/Año.}$$

Donde S es el volumen de sedimentos producidos en Tn/Km²/Año, Q es la escorrentía media anual en mm y A es el área de la cuenca en Km².

La ecuación presenta buenos resultados en cuencas grandes y no montañosas (USACE, 1995).

3.1.2.- Método de Gavrilovic (1976, 1988)

La metodología propuesta cuantifica el proceso erosivo en función de las características morfológicas, geológicas, vegetación y uso del suelo, distribución de precipitaciones y temperatura. Se define de este modo la descarga media anual de material erosionado (G) como el producto de la producción de sedimentos (W) y el coeficiente de retención (R).

$$G = WR$$

La producción media anual de sedimentos por erosión superficial se determina como:

$$W = Th\pi Z^{3/2} F$$

Siendo G el volumen de sedimentos producidos en la cuenca (m³/año), W reducción media anual de sedimento bruto por erosión (m³/año), T coeficiente de temperatura definido a partir de la temperatura media t_m como: $T = \left[\frac{t_m}{11} + 0.1 \right]^5$, t_m es la temperatura media en °C, h precipitación media anual (mm/año), F superficie de la zona de estudio (km²), Z coeficiente de erosión definido como $Z = XY(\varphi + I^{1/2})$, X coeficiente de uso del suelo, Y coeficiente de resistencia del suelo a la erosión, φ coeficiente correspondiente al tipo de proceso erosivo observado, I pendiente media de la cuenca (%).

Los valores de los coeficientes X, Y, φ son propuestos por el autor de la metodología (ver tabla 3.1) y representan respectivamente el grado de protección del suelo dado por la vegetación y la intervención antrópica, el grado de resistencia a la erosión del suelo considerando sus características geológicas y el estado de inestabilidad erosiva de la cuenca.

Tabla 3.1: Factores descriptivos utilizados en el modelo de Gavrilovic .

COBERTURA Y USO DEL SUELO	X
Bosques	0.05-0.20
Bosques de coníferas con pequeña cobertura	0.20-0.40
Bosque dañado, pastos	0.40-0.60
Pastos dañados y cultivos	0.60-0.80
Suelo desnudo	0.80-1.0
RESISTENCIA DEL SUELO A LA EROSION	Y
Material duro, resistente a la erosión	0.2-0.6
Material con resistencia moderada a la erosión	0.6-1.0
Esquistos, material débil	1.0-1.3
Sedimentos, morrenas, material con poca resistencia	1.3-1.8
Sedimentos finos y suelos sin resistencia al erosión	1.8-2.0
TIPO DE PROCESO EROSIVO Y ESTADO	
Sin erosión o pocos signos de erosión	0.1-0.2
Erosión laminar y regueros en un 20-50% de la cuenca.	0.3-0.5
Erosión en ríos, cárcavas, depósitos aluviales, erosión kárstica.	0.6-0.7
50-85% de la cuenca afectada por erosión superficial y deslizamientos.	0.8-0.9
Toda la cuenca afectada por erosión.	1.0

Fuente: J. Almorox Alonso et al., 2010.

La ecuación del coeficiente de retención de sedimento de acuerdo a Zemljic (1991) se determina como:

$$R = \frac{(L + L_1) + \sqrt{OD}}{(L + 10)F}$$

Donde O es el perímetro de la cuenca (km²), D altura media de la cuenca (km), L₁ longitud total acumulada de afluentes y cauces secundarios (km), L longitud de cauce principal (km), F superficie de la cuenca (km²).

La base para la implementación de esta metodología son los diferentes mapas temáticos y el modelo digital del terreno.

3.1.3.- Método de Fleming (1993)

Este método de estimación de sedimentos en suspensión en cuencas, fue elaborado por Fleming en Estados Unidos, y para ello utilizó datos de más de 250 cuencas en diferentes países del mundo.

En base a estos antecedentes definió una tasa media anual de sedimentos de transporte de sedimentos, en función del caudal medio anual y de los grados de cobertura vegetal.

La ecuación propuesta para esta estimación es:

$$Q_s = aQ^n$$

Donde:

Q_s : Transporte medio anual en suspensión.

Q : Caudal medio anual.

a y n: Constantes según la cobertura vegetal.

Fleming desarrollo los valores de la tabla 3.2 para a y n de cobertura vegetal

Tabla 3.2: Valores de las constantes a y n según Cobertura Vegetal.

Cobertura vegetal	a	n
Bosques de hoja ancha y coníferas	1.02	117
Bosques de coníferas y pastos altos	0.82	3 523
Pastos bajos y arbustos	0.65	19 260
Desiertos y arbustos	0.72	37 730

Fuente: J. Almorox Alonso et al., 2010.

Para el caudal media anual en cuencas sin datos, se pueden obtener los valores por fórmulas empíricas, de los cuales existen un sin número de literaturas (Ayres, 1970). Se pueden encontrar distintas variantes para obtener el caudal, por eso es necesario saber de ante mano las condiciones donde se van a aplicar y determinar la factibilidad de emplearlas en función de los requerimientos y deducción de cada una de ellas (Mintegui Robredo ,1991).

Como ejemplo se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{PSe}{b}$$

Donde:

P: Precipitación anual de la cuenca(mm).

S : Superficie de la cuenca(m²).

e : Coeficiente de escorrentía.

b : Número de segundos que posee un año.

3.1.4.- Método de USLE.

Es la estimación de la pérdida de suelo debido a erosión laminar y en canalillos. La ecuación ha sido empleada especialmente en los E.U.A. desde 1959. Debido a que la USLE fue desarrollada para una zona específica mediante el análisis estadístico de las pérdidas de suelo por erosión en lotes experimentales, las correlaciones matemáticas presentan niveles aceptables de pronóstico para dicha zona, para emplear este modelo en otra área se debe de emplear con cautela (Figueroa et al., 1991).

A continuación se describe la ecuación universal de la pérdida de suelo USLE:

$$E=R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Donde:

E= Pérdida anual del suelo (Tn/ha).

R= Factor de Erosividad pluvial (J.m⁻².cm.h).

K= Factor de Erosionabilidad del suelo (Tn.m².h / (ha.J.cm)).

L.S= Factor topológico que está en función a la pendiente y longitud de declive.

C= Factor de cobertura vegetal

P= Factor de prácticas de conservación

Los factores L.S, C, y P son adimensionales.

Erosividad de la lluvia-escorrentía(R).

El factor R tiene como principal influencia la energía de las gotas de lluvia al caer sobre la superficie terrestre, convirtiendo en una fuerza de erosión

específica producto de la energía cinética total de la tormenta. El Factor R representa los valores de la IE de tormenta promedio durante una lluvia y la intensidad máxima sostenida a lo largo de un periodo prolongado como se muestra en la ecuación (Brown y Foster 1999).

$$R = \frac{\sum(E * I_p)}{N}$$

Siendo:

E: Energía cinética de la tormenta de diseño.

I: Intensidad de la lluvia para un periodo dado.

N: Número de intervalos en el periodo de intensidad.

A partir de la ecuación diversos autores establecieron nuevas ecuaciones empíricas, con base a fundamentos muy aceptables publicados en diferentes revistas científicas, entre los más utilizados:

Roose (1995),

$$R = 0.865 * P_t$$

Siendo:

P_t : Precipitación Total Anual (mm).

Wischmeier and Smith (1978),

$$R = \frac{9.28 * P_t * 75}{1000}$$

Donde:

R = Erosividad media anual (MJ.mm/ha.h.año).

Pt = Precipitación media anual (mm).

Rogler & Schwertmann (1981),

$$R = 10(-1.48 + 1.48.NS)$$

Donde:

R = Erosividad media anual (MJ.mm/ha.h.año).

NS = Precipitación media de los meses de lluvia.

Erosionabilidad del suelo (K)

Representa la susceptibilidad del suelo a la erosión, depende de la resistencia al desprendimiento de partículas del suelo, tanto al arranque como al transporte de partículas.

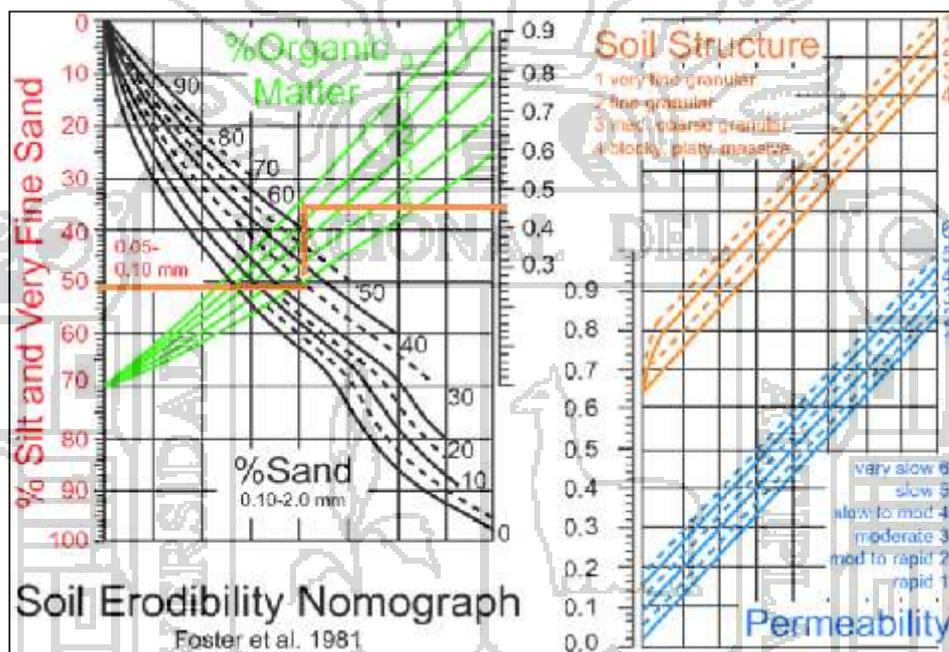
Un suelo que mantiene una buena agregación hace difícil el proceso de erosión porque las partículas se mantienen unidas, no permitiendo el flujo de agua en su interior. Cuando los agregados se dispersan, las partículas son fácilmente erosionables, los poros se llenan de agua en lugar de infiltrarse fluye en superficie; Los factores que influyen sobre la erosionabilidad de un suelo son su permeabilidad y su contenido en materia orgánica(López Cárdenas, F, 2003)

El factor K es difícil de determinar, normalmente se obtiene a partir de tablas o nomograma empíricos. K se expresa en T ha hr / ha MJ mm.

Originalmente Wischmeir y Smith (1965) proponen valores de K para tipos de suelos específicos, mismos que habían correlacionado y experimentado, que en el 1978 presentan tablas que permiten evaluar el factor usando cinco parámetros. En la figura 3.1 se visualiza dicha propuesta.

1. Porcentaje de limos y arenas muy finas, diámetro de 0.002-0.10 mm.
2. Porcentaje de arena, partículas de diámetro 0.10-2.0 mm.
3. Porcentaje de materia orgánica.
4. Estructura del suelo.
5. Permeabilidad.

Figura 3.1: Monográfico para la Estimación del factor K.



Fuente: Foster et al., 1981.

Factor de Cobertura Vegetal (C)

Representa la cobertura vegetal del suelo. El factor de erosionabilidad debido a la cobertura vegetal (C) representa la relación entre la pérdida de suelo de un terreno cultivado y la pérdida de suelo de un terreno sin ningún cultivo.

A fin de obtener el valor de C para una zona en particular es necesario conocer cómo se distribuye la lluvia a través del año. Además se debe saber cuánta

protección a la erosión ofrecen los cultivos, los residuos de cultivo y las prácticas de cultivo cuando se presenten tormentas (Figueroa et al., 1991).

Para conocer el valor de C anual se cuenta con porcentajes de cobertura vegetal para cada tipo de cultivo bajo condiciones específicas de su manejo. Para cada etapa de cultivo se asigna un porcentaje de cobertura que se afecta por el porcentaje acumulado del índice de erosividad R. El acumulado de este producto arroja el valor de C promedio anual. Una descripción más detallada se puede encontrar en: Wischemeier y Smith, 1978; Figueroa et al., 1991; y López Cárdenas, 2003.

Factor de longitud de la pendiente(LS).

La pérdida de suelo por efecto de la longitud de la pendiente (L) de campo a partir de 22,1 metros, es causante de la erosión en el mismo tipo de suelo, pero no siempre es sensible la longitud de la pendiente de + 0 - 10%, estas están condicionadas por la rugosidad, en especial la vegetación (Mannaerts 1999).

La inclinación de la pendiente. Representa el efecto de la inclinación de la pendiente en la erosión. La pérdida de suelo aumenta más rápidamente con la calidad de pendiente de lo que hace con la longitud de la pendiente.

El factor de L y el factor S se suelen considerar juntos denominado factor topológico, que a partir de un modelo digital de elevaciones y un mapa de pendientes es posible calcular celda a celda los valores de LS (Wischmeier y Smith (1978).

$$Ls = \left(\frac{x}{22.13} \right)^{III} * (65.41 * \text{sen}^2 + 4.45 * \text{sen} + 0.065)$$

Donde:

x = longitud de la ladera (metros);
 = pendiente de la ladera (grados);
 m = exponente que depende de la pendiente.

Tabla 3.1: Parámetros de cálculo para el factor topológico de C.

S(%)	M
>5	0,5
3,5 - 4,5	0,4
1 -3	0,3
< 1	0,2

Fuente: Wischmeier y Smith 1978

Para pendientes menores del 20% y longitudes de declive menores de 350 metros, Wischmeier (1982) ha obtenido la siguiente relación:

$$L.S = \left[\frac{L}{22.1} \right]^{.5} \cdot [0.065 + 0.0454.S + 0.00065.S^2]^{.1}$$

Para pendientes mayores del 20% y longitudes de declive menores de 350 metros, Wischmeier (1982) también ha obtenido la siguiente relación:

$$L.S = \left[\frac{L}{2.1} \right]^{.3} \cdot \left[\frac{S}{9} \right]^{1.4}$$

Dónde es la longitud de declive en metros y S es la pendiente del declive en porcentaje (%).

Factor de la práctica de apoyo (P).

Por definición el factor P de la USLE representa la relación de la pérdida de suelo bajo una práctica de conservación específica respecto a la pérdida de suelo de la misma zona sin ningún tipo de práctica (Wischmeier y Smith, 1978).

3.2.- Modelos Matemáticos

Los modelos matemáticos determinísticos Sed Cad 4 y Kineros 2, están debidamente implementadas por Universidad de Kentucky de los EE.UU y el Departamento de Agricultura de los EE.UU respectivamente.

3.2.1.- Modelo Matemático Sed Cad 4

Este modelo contempla aspectos hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos. En el aspecto hidráulico utiliza conceptos de tiempos de concentración, caudales instantáneos y transiciones que permiten evaluar la atenuación de los caudales.

Tormentas y Caudales Instantáneos:

Las tormentas o hietogramas son inputs que se ingresa al modelo hidrológico, Este genera caudales instantáneos con criterios de tiempos de concentración, números de curva y respuestas de hidrogramas que pueden tener las subcuencas de estudio.

Tránsito de hidrogramas:

Consiste en conocer cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce o través de un embalse. También es conocido como tránsito de avenidas.

Existen varias metodologías para efectuar estos comportamientos que se agrupan en dos categorías (F, Javier Sánchez San Román).

Métodos hidrológicos: se basan en la ecuación de continuidad, que para un tramo de un cauce establece que:

$$\text{Volumen Entrada } \Delta t - \text{Volumen Salida } \Delta t = \Delta \text{ Almacenamiento}$$

Dividido entre por Δt :

$$\text{Caudal Entrada} - \text{Caudal Salida} = (\Delta \text{ Almacenamiento}) / \Delta t$$

ó

$$I - O = (\Delta S) / \Delta t$$

$$I - O = (S_2 - S_1) / \Delta t$$

$$I - O = (S_2 - S_1) / \Delta t$$

I= Caudal medio de entrada;

O= Caudal medio de salida;

S =Incremento del almacenamiento.

Métodos hidráulicos: Además de las ecuaciones de continuidad, utilizan las ecuaciones del movimiento del fluido, de modo que para canales y cauces en régimen no permanente se utilizan ecuaciones diferenciales:

Método Muskingum:

Método Muskingum - Cunge:

El modelo Sed Cad 4 hace uso de la fórmula de la Ecuación Universal de la pérdida de Suelo Modificada(Manual de Diseño SC4, 2010). MUSLE estima la

pérdida de suelo en una ladera causado por el impacto de las gotas de lluvia en la superficie.

La ecuación de la pérdida de suelo está en función a:

$$S = u(Q_v q_p)^b K$$

donde:

S = Concentración de sedimentos en (Tn/tormenta).

Q_v = Volumen de escurrimiento por tormenta en (acres-ft).

q_p = Máximo Caudal Instantáneo en (Ft³/s).

K = Factor de erosionabilidad del suelo, es una medida de la susceptibilidad de las partículas del suelo a ser removidas de su generatriz por la lluvia.

C = Factor de la cobertura del suelo, .

LS = Factor topográfico.

P = Factor de práctica de conservación.

Sed Cad 4 requiere de inputs de la tormenta, hietograma, tiempos de concentración . A esto se requiere acoplar la caracterización hidrológica con tiempos de concentración de dicho evento y número de curva en el área de estudio.

El volumen de escurrimiento por tormenta, que está definido por la siguiente expresión:

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

para $P > 0.2S$.

$$S = \frac{1000}{N} - 10$$

Donde:

NC: Número de curva de la cuenca de análisis.

S: Abstracción inicial.

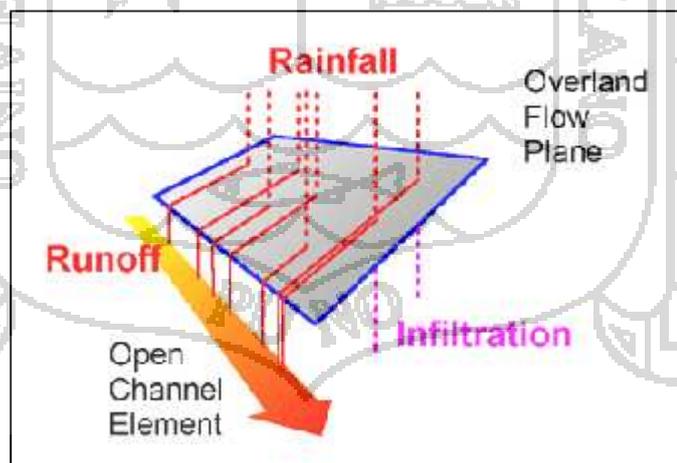
P: Precipitación de la tormenta de diseño.

3.2.2.- Modelo Matemático Kíneros 2

El modelo determinístico distribuido Kíneros 2 hace uso de fórmulas de la Ecuación de Balance de Masa, además de la Ecuación Cinemática Unidimensional.

En el balance de masa el modelo contabiliza tres parámetros fundamentales, las cuales son: la precipitación, la infiltración y la escorrentía. La idealización de este balance se muestra en la figura 3.2, que es aplicado al flujo superficial en planos o subcuencas y canales o cauces.

Figura 3.2: Esquema del balance de masa en el Kíneros 2.



Fuente: <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>

Kíneros tiene cuatro componentes que se describirán a continuación:

Flujo Superficial: Proceso de flujo Unidimensional en el que el flujo está relacionado con el almacenamiento de unidad de área.

$$Q = \alpha h^m$$

Donde:

Q : Descarga por ancho unitario.

h : Almacenamiento por unidad de área.

α y m : Parámetros que están en función a la pendiente de terreno.

El flujo superficial, también está gobernado por la ecuación de continuidad, ya que el proceso de flujo es unidimensional .

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} = q(x, t)$$

Donde:

t : Es el tiempo;

x : Distancia a lo largo de la dirección de la pendiente;

q : Tasa de flujo lateral;

Las ecuaciones de onda cinemática son simplificaciones de las ecuaciones de Saint Venant y no conservan todas las propiedades de las ecuaciones más complejas, como remanso y atenuación de la onda difusiva. El método de enrutamiento cinemático es una muy buena aproximación para las condiciones de flujo superficial (Woolhiser y Liggett, 1967; Morris y Woolhiser, 1980).

Flujo Superficial en canales: El proceso de flujo superficial en canales también considera aproximaciones de la ecuación cinemática. La ecuación de continuidad en flujos de secciones están representados por;

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} = q_c(x, t)$$

Donde:

A: Sección del área por donde pasa el flujo;

Q: Descarga del canal:

$q_c(x, t)$: Entrada neta lateral de descarga por unidad de longitud del canal;

Además Q puede expresarse en función de A, es decir:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} = q_c(x, t)$$

La simplificación de la ecuación cinemática se basa en relacionar la descarga del canal con la forma de la sección transversal.

$$Q = \alpha R^{m-1} A$$

Donde:

R: Radio hidráulico;

$\alpha = 1.49s^{1/2}/n$;

m: 5/3;

Infiltración: Kineros requiere tres parámetros básicos para describir las propiedades de infiltración del suelo: La conductividad hidráulica saturada efectiva (k_s), la capilaridad (G) y la porosidad ().

En el tema de infiltración considera la propuesta de Smith and Parlange(1978), que son metodologías para modelar la infiltración, los inputs que se consideran son los siguientes:

- f_c : Capacidad de Infiltración (m/s)
- K_s : Conductividad hidráulica saturada (m/s)
- K_i : Conductividad hidráulica inicial (m/s)
- θ_s : Contenido de agua del suelo
- θ_i : Contenido inicial de agua del suelo
- G : Capilaridad (m)
- P : Tasa de precipitación (mm/s)
- Y : Parámetro Smith - Parlange (0-1)
- F : Lluvia acumulada (mm)
- B : Parámetro de capilaridad (m)

$$f_c = K_s + Y * (K_s + K_i) \frac{1}{e^{Y*F/L-1}}$$

ó

$$f_c = K_s * e^{-\frac{F}{B}} / \left[e^{-\frac{F}{B}} - 1 \right]$$

$$B = G * (\theta_s - \theta_i)$$

Estas relaciones se encuentran sustentadas en el manual de usuario del Modelo Kineros (1990).

Erosión y Transporte de Sedimento: Kineros cuenta por separado la erosión causada por la energía de la lluvia y la erosión causada por el agua que fluye.

La ecuación general que utiliza KINEROS para determinar la dinámica del sedimento en cualquier parte a lo largo de la trayectoria en un flujo superficial es

una ecuación de balance de masa similar a la del flujo de agua cinemática (Bennett, 1974).

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial t} - e(x, t) = q(x, t)$$

Donde:

C_s = Concentración de Sedimentos (L^3/L^3);

Q = Tasa de Descarga de Agua (L^3/T);

A = Área de la sección del Flujo (L^2);

e = Tasa de Erosión del Lecho de Suelo (L^2/T);

q = Tasa de Sedimentación Lateral del Cauce ($L^2/T/L$).

Para terrenos en pendiente se asume que e se constituye de dos principales componentes: Producción de suelo erosionado por precipitación y erosión (o deposición) hidráulica por la interacción entre la fuerza del agua sobre el suelo y la tendencia de las partículas de suelo de establecerse por acción de la fuerza de la gravedad. De esta manera puede ser positiva (incremento de la concentración en el agua) o negativa (deposición). La erosión neta es la suma de las tasas de erosión por salpicadura e_s y la tasa de erosión hidráulica e_h .

$$e = e_s + e_h$$

Erosión por Salpicadura (e_s): Basado en evidencia experimental, la tasa de erosión por salpicadura se puede aproximar como una función del cuadrado de la intensidad de la lluvia (Meyer y Wischmeier, 1969). En Kineros la tasa de erosión por salpicadura se da de la siguiente manera:

$$e = c_f k(h) r^2$$

Donde:

c_f : Constante relacionada con la propiedad del suelo y la superficie;

$k(h)$: Factor que representa la reducción por salpicadura causada por el aumento de la profundidad del agua. La función $k(h)$ tiene el valor de 1.0 antes de la escorrentía y el valor de 0.0 para cuando se produce la escorrentía y se tiene un tirante alto, y viene dada por la expresión:

$$k(h) = e^{-c_h h}$$

c_h : Representa el amortiguamiento del agua de superficie.

Erosión hidráulica (e_n): Representa la tasa de intercambio de sedimentos entre el agua que fluye y el suelo sobre el que fluye y puede ser positivo o negativo. Kinneros asume que para cualquier condición de flujo de agua superficial hay una concentración de equilibrio de los sedimentos. La erosión hidráulica o sedimentación se modela como un proceso de transferencia cinética.

$$e_n = c_g (c_m - c_s) A$$

Donde:

c_m : capacidad de equilibrio de transporte de concentración;

$c_s = c_s(x, t)$: Actual concentración de sedimentos local;

c_g : Coeficiente de velocidad de transferencia;

Conceptualmente, cuando se está produciendo la deposición, c_g es teóricamente igual a la velocidad de sedimentación de partículas dividida por la profundidad hidráulica, h . Para las condiciones de erosión en suelos cohesivos, el valor de c_g debe reducirse, y $v_{s/h}$ se utiliza como un límite superior para c_g .

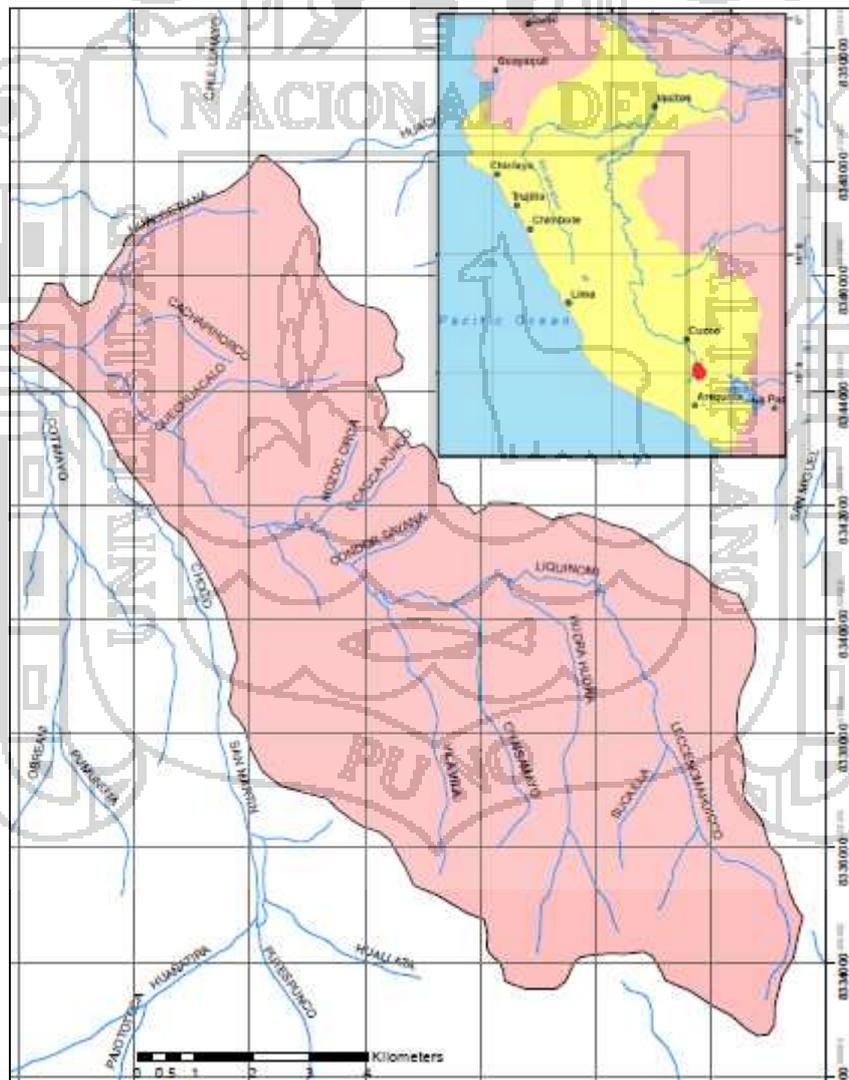


4. APLICACION A LA CUENCA DEL RIO ALLAHUALLA

4.1.- Área de Aplicación

La cuenca Allahualla está ubicada al sur este de la Región de Cusco, en el distrito de Yauri perteneciente a la provincia de Espinar. La cuenca Allahualla tiene una extensión de 89.5 km² aproximadamente. En la figura 4.1 se muestra la ubicación de la cuenca.

Figura 4.1: Mapa de Ubicación de la Cuenca Allahualla.



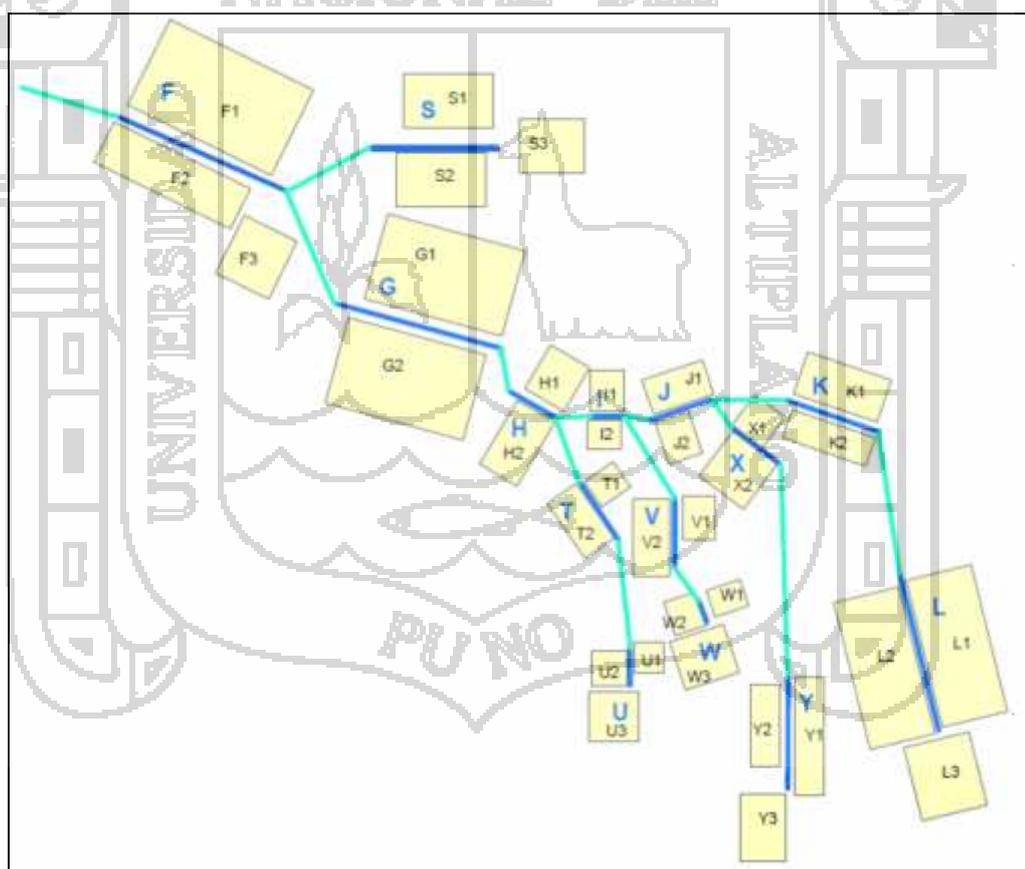
Fuente: Elaboración Propia

La Cuenca del río Allahualla es un afluente del río Cañipia. el río Cañipia entrega sus aguas al río Salado, y este finalmente desemboca en el río Apurímac de la vertiente del Océano Atlántico.

4.2.- Caracterización Hidrológica de la Cuenca Allahualla

En la figura 4.2 se visualiza la red caracterizada para ambos modelos distribuidos. Esta red está conformada por 14 subcuencas, 34 sectores (planos) y 14 cursos (canales).

Figura 4.2: Caracterización hidrológica de la Cuenca Allahualla.



Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 1 del Anexo, se muestra la clasificación de las 14 subcuencas de donde se construyó la caracterización hidrológica.

4.3.- Aplicación de las Metodologías Propuestas

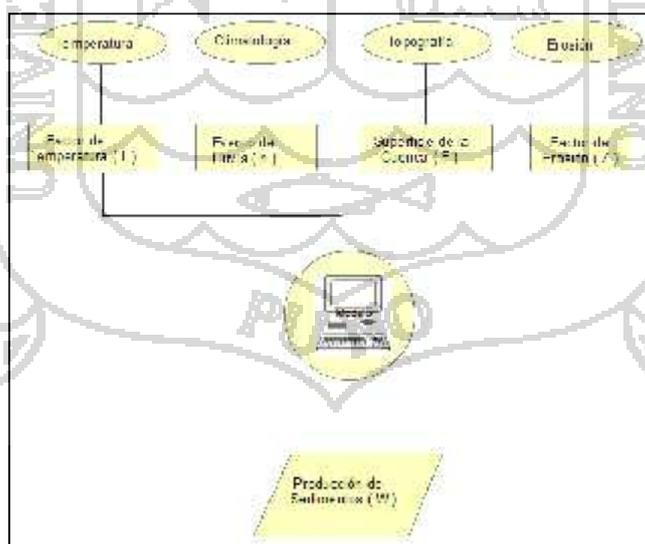
4.3.1.- Aplicación con los Métodos Teóricos

Para cuantificar la producción de sedimentos se hará uso de los métodos Gavrilovic y USLE explicado en los Items 3.1.2 y 3.1.4, ya que éstos métodos tienen como resultado a la cantidad de sedimentos por evento de una tormenta, lo que también ocurre en los modelos hidrológicos Sed Cad 4 y Kineros 2.

Aplicación del Método Teórico Gavrilovic

Determinando los factores descriptivos (según la tabla 3.1) para la cuenca del río Allahualla según la visita de campo, fotografías y ortofotos, se tiene:

Diagrama de Flujo de GAVRILOVIC



Fuente: Elaboración Propia

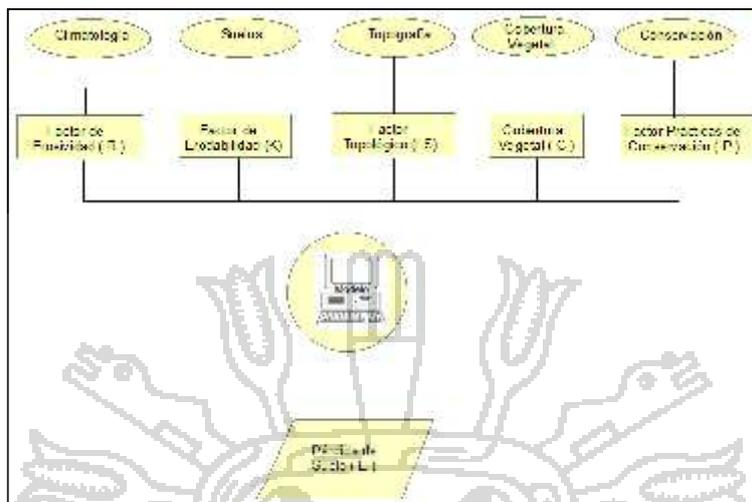
- Cobertura y uso del suelo (X): 0.6;

- Resistencia del suelo a la erosión (Y): 1.0;
- Tipo de proceso erosivo y estado (): 0.50, además se conoce los valores de:
 - Pendiente media de la cuenca Allahualla (I): 15.6%;
 - Temperatura media de la zona de estudio (t_m): 15°C, se calculan los valores de T y Z:
 - Coeficiente de temperatura (T): 1.26, también son conocidos los parámetros de F y h:
 - Superficie de la cuenca Allahualla (F): 89.4 km²;
 - Precipitación por evento de tormenta (h): 43 mm/tormenta;
 - Coeficiente de erosión(Z): 2.67, luego se llega a determinar el valor de W;
 - Producción media anual de sedimento por erosión superficial (W): 177 782 Tn,
 - Para determinar R: Se conoce los siguientes parámetros morfológicos: L=23 km, Li=69km, O=49km, D=0.8km, F=89.4km²;
 - Coeficiente de retención (R): 0.195;
 - Descarga media del material erosionado (G): 34 480 Tn.

Aplicación del Método Teórico USLE

Siguiendo el análisis desarrollado en el ítem 3.1.4 se realizará la aplicación para la cuenca del río Allahualla como el anterior método. Se conoce que:

Diagrama de Flujo de USLE



Fuente: Elaboración Propia

- La tormenta de lluvia (P): 43 mm, calculando el parámetro R (Roose, 1995);
- Erosividad pluvial (R): 37.2 MJ.mm/ ha.h.año, determinando el factor K con el monograma de Foster (figura 3.1);
- Erosionabilidad del suelo (K): 0.45, calculando el factor L.S., según las relaciones de Wischmeier. Sabiendo que los parámetros declive y pendiente son 305m y 20 % ;
- Factor topológico (L.S): 14.77;
- Factor de cobertura vegetal (C): 0.008, según C. T. Haan;
- Factor de prácticas de conservación (P): 1.0, según C. T. Haan;
- Pérdida Anual del Suelo (E): 1.978 Tn/ha; Considerando el área de la cuenca Allahualla que tiene una extensión de 89.4 km² se tiene que;
- Pérdida Anual del Suelo (E): 17 686 Tn.

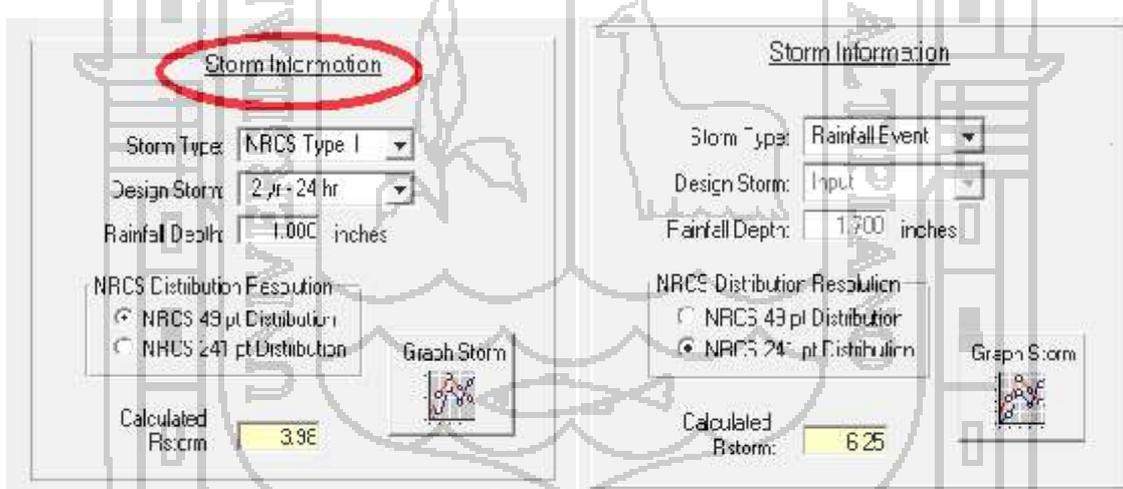
4.3.2.- Aplicación con el Modelo Sed Cad 4

En el Ítem 3.2.1 se explicó los conceptos que considera este modelo hidrológico. en los Ítem siguientes se hablará de cada elemento que compone el modelo matemático distribuido.

Storm Information (Información de Tormenta)

Aquí es donde se introducen al modelo hidrológico todos los inputs relacionados a la energía producida por las precipitaciones. En la figura 4.3 se muestra los tipos y parámetros de precipitación que se incorporan.

Figura 4.3: Información de la Tormenta en el Modelo SC4.



Fuente: Modelo Sed Cad.

Storm Type (Tipo de Tormenta)

En este opción es donde se especifica el hietograma de diseño(Rain Event) acumulado en 24 horas (información horaria), En la Tabla 4.1 se reporta tal información.

Tabla 4.1: Evento de lluvia (Estación Quechua).

Data	Time	Rain (pulg)	Rain Acumulated (pulg)
24/01/2010	4:00 PM	0.00	0.00
24/01/2010	5:00 PM	0.69	0.69
24/01/2010	6:00 PM	0.10	0.79
24/01/2010	7:00 PM	0.13	0.91
24/01/2010	8:00 PM	0.11	1.02
24/01/2010	9:00 PM	0.06	1.08
24/01/2010	10:00 PM	0.06	1.14
24/01/2010	11:00 PM	0.06	1.20
25/01/2010	12:00 AM	0.03	1.23
25/01/2010	1:00 AM	0.02	1.24
25/01/2010	2:00 AM	0.02	1.26
25/01/2010	3:00 AM	0.04	1.30
25/01/2010	4:00 AM	0.06	1.35
25/01/2010	5:00 AM	0.06	1.41
25/01/2010	6:00 AM	0.04	1.45
25/01/2010	7:00 AM	0.02	1.47
25/01/2010	8:00 AM	0.01	1.48
25/01/2010	9:00 AM	0.06	1.54
25/01/2010	10:00 AM	0.04	1.58
25/01/2010	11:00 AM	0.09	1.68
25/01/2010	12:00 PM	0.02	1.69
25/01/2010	1:00 PM	0.01	1.70
25/01/2010	2:00 PM	0.00	1.70
25/01/2010	3:00 PM	0.00	1.70
25/01/2010	4:00 PM	0.00	1.70

Fuente: Ministerio de Ambiente del Peru

De no tener tal información se puede elegir un tipo de tormenta del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS tipo IA, tipo I, Tipo II y Tipo II) que el modelo ofrece como alternativa.

NRCS Distribution Determination (Determinación de la Distribución)

Una descripción muy simplificada de la metodología para determinar las distribuciones del NRCS son lo siguiente:

Suponga que los valores de los incrementos de precipitaciones se conocen desde hace 10 años de tormentas en la región de aplicación de un tipo de distribución. Luego de ello analizar los 10, 15, 30 valores más altos de 5 minutos se determinan para toda el área geográfica. También, la más alta 1, 2, 3 ... lluvia horas intensidades se indican. Estas intensidades observadas más altas se colocan en una precipitación 24 de distribución para luego compararlas con las tormentas propuestas del NRCS. De esa manera podríamos asumir un tipo de tormenta para la región de aplicación (Manual de diseño SC4, 2010).

Design Storm (Diseño de tormenta)

La tormenta de diseño se describe por la frecuencia (intervalo de frecuencia-año) y tormenta Duración (horas). Se puede elegir entre una lista de las tormentas de diseño que son utilizados frecuentemente y el diseño de tormenta deseado.

Rainfall Depth (Altura de lluvia)

En éste ítem se hace mención de la información sobre la altura de la tormenta de diseño, que está asociada a una frecuencia y duración específica.

El valor de la tormenta de diseño asciende a 43.2mm (1.7 pulgadas) y una intensidad de 17.4 mm/hra, estos valores han sido extraídos de la Estación Meteorológica Quechua, los registros de la estación son a nivel horario. Considerando la clasificación de Ven Te Chow la tormenta está considerada como una fuerte lluvia. En la figura 2 del Anexo se ilustra espacialmente la ubicación de la estación pluviométrica mencionada.

Sedimentology (Sedimentología)

En esta componente del modelo Kíneros se consideran las distribuciones del tamaño de partículas erosionables de la cuenca o sector en estudio, es decir la granulometría de las muestras de suelo erosionable. En la figura 4.4 se muestra la distribución granulométrica del Río Allahualla.

La granulometría es un factor determinante para calcular la erosión laminar producida en una cuenca, esta distribución de partículas proviene de los muestreos realizados de suelos erosionables en el área de estudio.

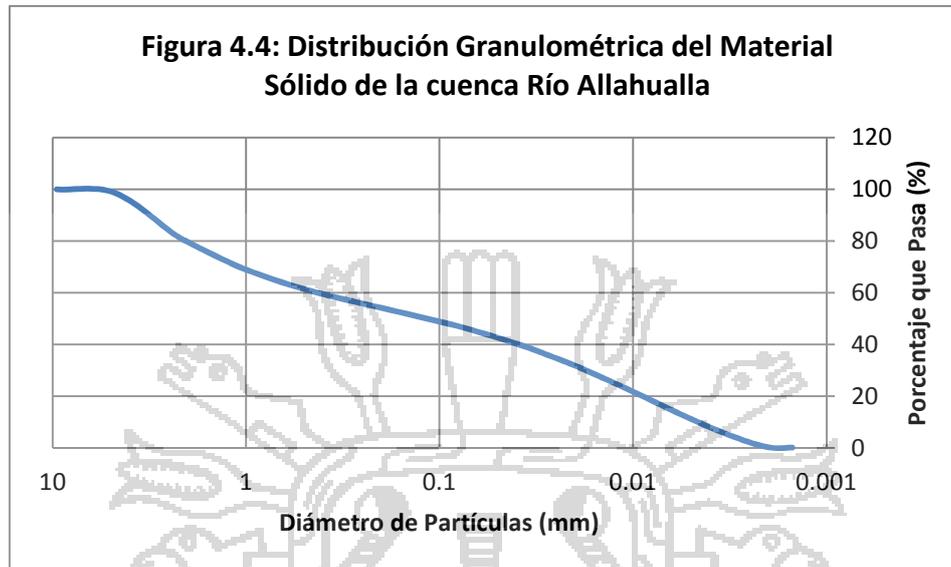
En los libros de "Introducción al estudio de Transporte de sedimentos " de Rocha Felices y "Principios de Transporte de Sedimentos en Ríos, Estuarios y Mares Costeros" de Van Rijn se muestran una clasificación de partículas de acuerdo a la American Geophysical Union (AGU), y en la tabla 4.2 se reportan.

Tabla 4.2: Clasificación de Partículas Según la AGU.

1) Cantos rodados (250-4 000 mm)	muy grandes grandes medianos pequeños	4 000-2 000 mm 2 000-1 000 mm 1 000-500 mm 500-250 mm
2) Cuijarros (64-250 mm)	grandes pequeños	250-125 mm 125-64 mm
3) Gravas (2-64 mm)	muy gruesa gruesa media fina muy fina	64-32 mm 32-16 mm 16-8 mm 8-4 mm 4-2 mm
4) Arenas (0,062-2 mm)	muy gruesa gruesa media fina muy fina	2-1 mm 1-0,5 mm 0,5-0,25 mm 0,25-0,125 mm 0,125-0,062 mm
5) Limos (4 a 62 μ) = (0,004 a 0,062 mm)		
6) Arcillas (0,24 a 4 μ) = (0,00024 a 0,004 mm)		

Fuente: American Geophysical Union

La granulometría con la que trabajó incorpora las cuatro últimas clasificaciones que son: Gravas, Arenas, Limos y Arcillas.

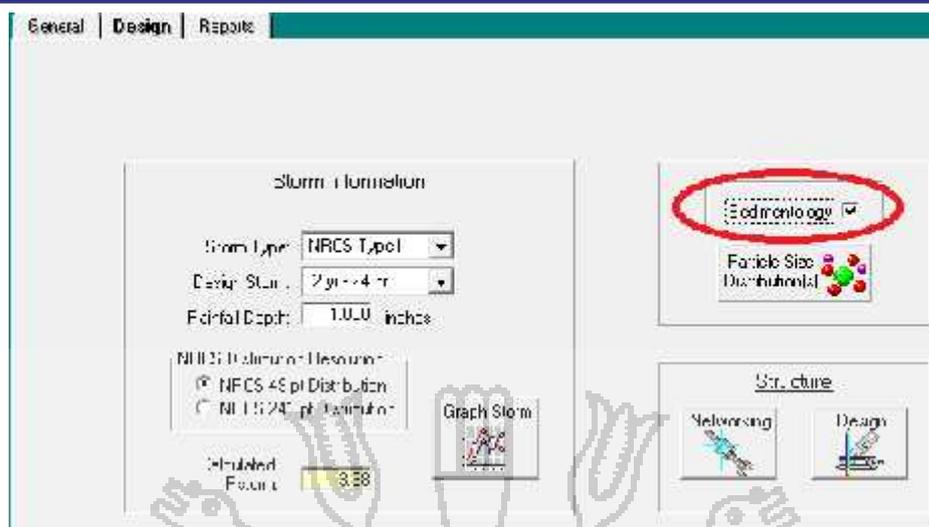


Fuente: Ministerio de Ambiente del Perú.

La distribución granulométrica muestra que el material sólido está constituido por gravas, arenas, limos y arcillas. En su mayoría está constituido por arena y limo.

Como input sedimentológico se incluye también la gravedad específica de dichos muestreos (2.65 Tn/m^3). En la figura 4.5 se señala la opción introducen las características mencionadas.

Figura 4.5: Información Sedimentológica en el Modelo SC4

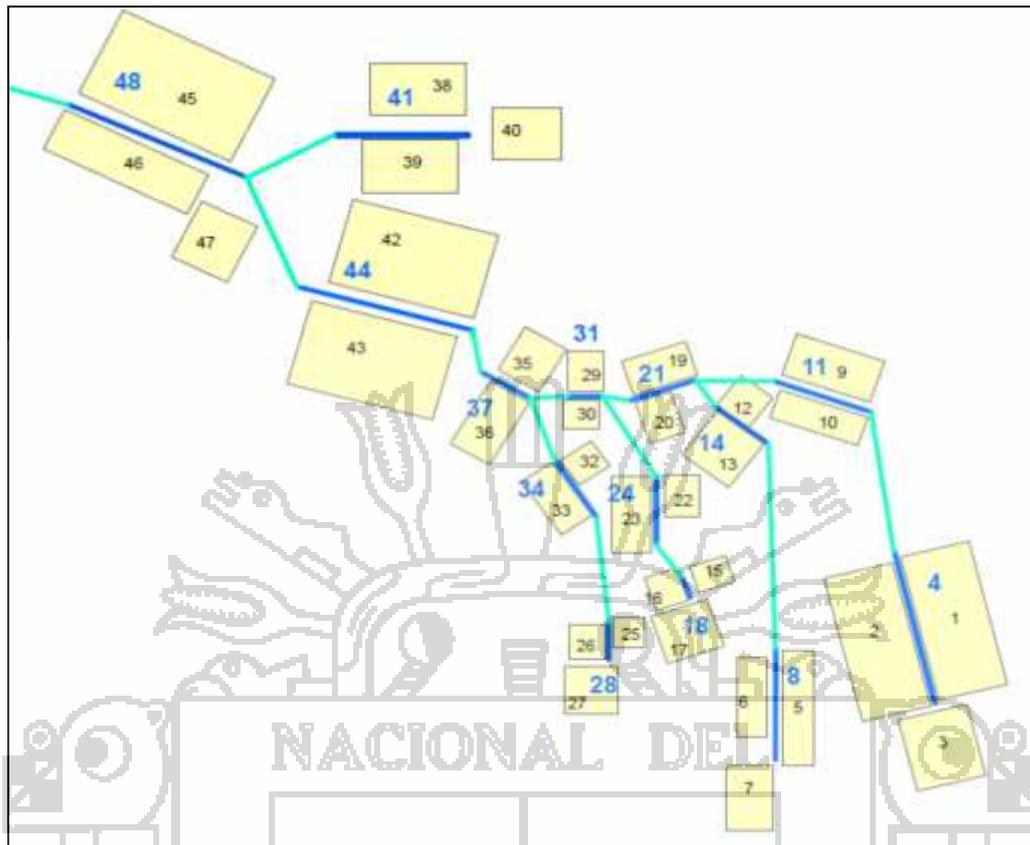


Fuente: Modelo Sed Cad.

Networking (Redes y Conexiones)

En esta componente se considera las redes de subcuencas y cauces del sistema de la cuenca de estudio Allahualla que se han obtenido de la delimitación de sectores en la zona de estudio, en esta opción se enlaza como están distribuidos los cauces naturales y subcuencas en cuestión. En la figura 4.6, se idealiza una caracterización para el modelo determinístico Sed Cad 4.

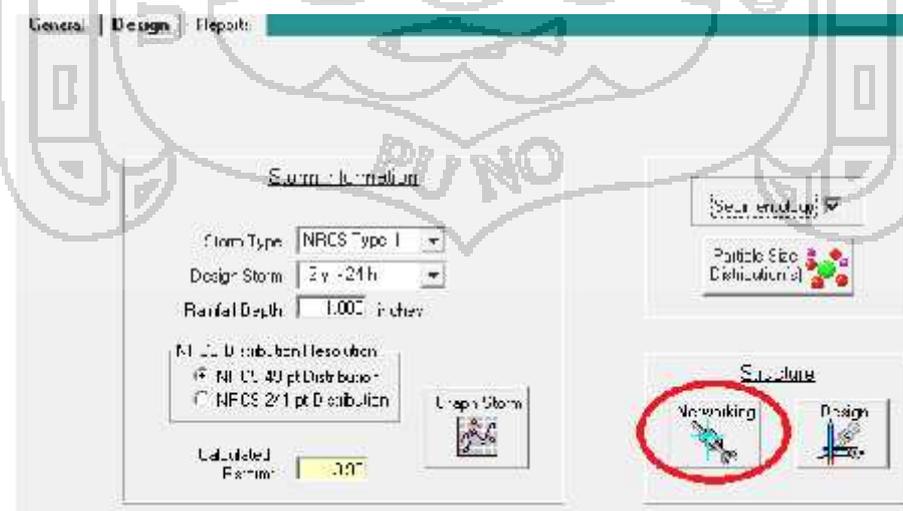
Figura 4.6: Caracterización hidrológica de la Cuenca Allahualla para el Modelo Matemático Sed Cad 4.



Fuente: Elaboración Propia.

La caracterización hecha (34 sectores y 14 cauces) en la figura 4.5 se introduce en la opción Networking de la figura 4.7.

Figura 4.7: Información hidrológica en el Modelo SC4



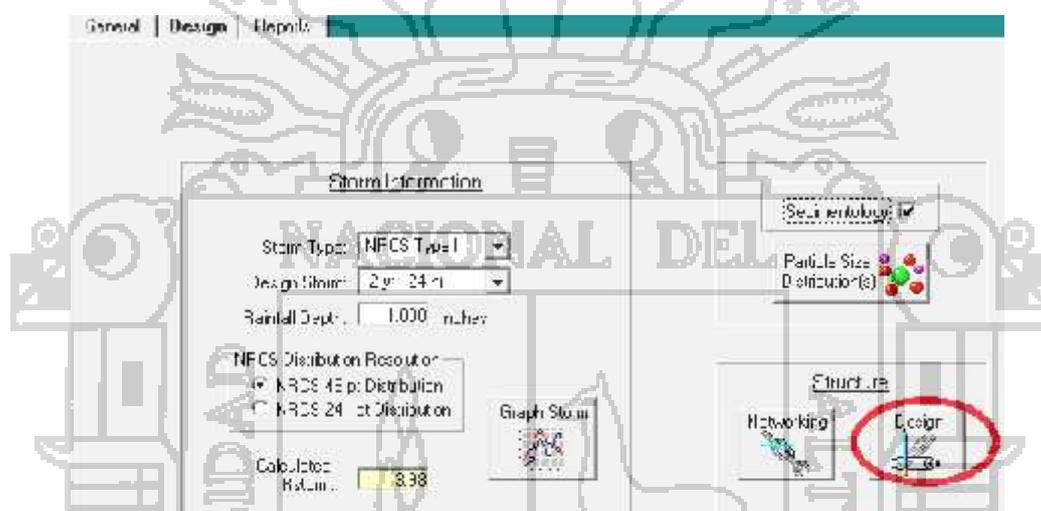
Fuente: Modelo Sed Cad.

Otro a considerar son las transiciones que ofrece el modelo, es decir la atenuación que se dan en las quebradas y ríos.

Subwatershed Information - Design (Información de la Cuenca - Diseño)

En la componente Design de Estructura se considera el cuerpo del modelo dado a que se introducen los parámetros hidrológicos, hidráulicos y sedimento lógicos.

Figura 4.8: Información Subwatershed en el Modelo SC4



Fuente: Modelo Sed Cad.

Dentro de esta ventana se encuentra el cuerpo del modelo. Aquí se introducen las áreas, tiempos de concentración, números de curva (NC), curvas granulométricas, factor de erosionabilidad del suelo (K), factor de la cobertura del suelo (C), factor topológico del suelo (LS), factor de práctica de conservación (P). De ser el caso también se llegan a incorporar pozas sedimentadoras o pozas de atenuación. En la tabla 4.3 se muestran los inputs que corresponden a la estructura Design del modelo.

Tabla 4.3: Parámetros hidráulicos y sedimentológicos de ingreso a la Cuenca en el Sed Cad 4.



ID (1)	Element (2)	Area (km ²)	NC (3)	L (m)	K (4)	L (m)	S (%)	C (5)	P (5)
45	F1	12.8	80	4443	0.45	305	19.3	0.008	1
46	F2	2.1	80	747	0.45	305	5.9	0.008	1
47	F3	0.2	80	1126	0.45	305	21.4	0.008	1
42	G1	8.2	80	2142	0.45	305	25.9	0.008	1
43	G2	9.2	80	3969	0.45	305	12.5	0.008	1
35	H1	0.2	80	968	0.45	305	16.4	0.008	1
36	H2	3.2	80	5772	0.45	305	18	0.008	1
29	I1	0.6	80	1164	0.45	305	22.7	0.008	1
30	I2	0.6	80	1205	0.45	305	10.2	0.008	1
19	J1	1.9	80	1669	0.45	305	22.4	0.008	1
20	J2	1.5	80	2655	0.45	305	14	0.008	1
9	K1	5.6	80	1166	0.45	305	19.2	0.008	1
10	K2	1.2	80	860	0.45	305	10.7	0.008	1
1	L1	5.1	80	1293	0.45	305	20.8	0.008	1
2	L2	8.1	80	2643	0.45	305	22.6	0.008	1
3	L3	2.4	80	1723	0.45	305	15.2	0.008	1
38	S1	1.5	80	2643	0.45	305	27	0.008	1
39	S2	2.5	80	2329	0.45	305	24.1	0.008	1
40	S3	1.3	80	1862	0.45	305	32.3	0.008	1
32	T1	0.7	80	694	0.45	305	10.6	0.008	1
33	T2	2.2	80	2682	0.45	305	16	0.008	1
25	U1	0.3	80	232	0.45	305	18.6	0.008	1
26	U2	0.7	80	1235	0.45	305	22.7	0.008	1
27	U3	2.1	80	1768	0.45	305	27.1	0.008	1
22	V1	0.9	80	713	0.45	305	16.6	0.008	1
23	V2	2.3	80	2799	0.45	305	15.4	0.008	1
15	W1	0.4	80	693	0.45	305	26.5	0.008	1
16	W2	0.1	80	260	0.45	305	20.1	0.008	1
17	W3	1.4	80	3454	0.45	305	24.6	0.008	1
12	X1	0.2	80	292	0.45	305	7.8	0.008	1
13	X2	1.0	80	2373	0.45	305	11.9	0.008	1
5	Y1	3.9	80	1252	0.45	305	26	0.008	1
6	Y2	3.1	80	2562	0.45	305	27	0.008	1
7	Y3	1.9	80	1465	0.45	305	37.6	0.008	1

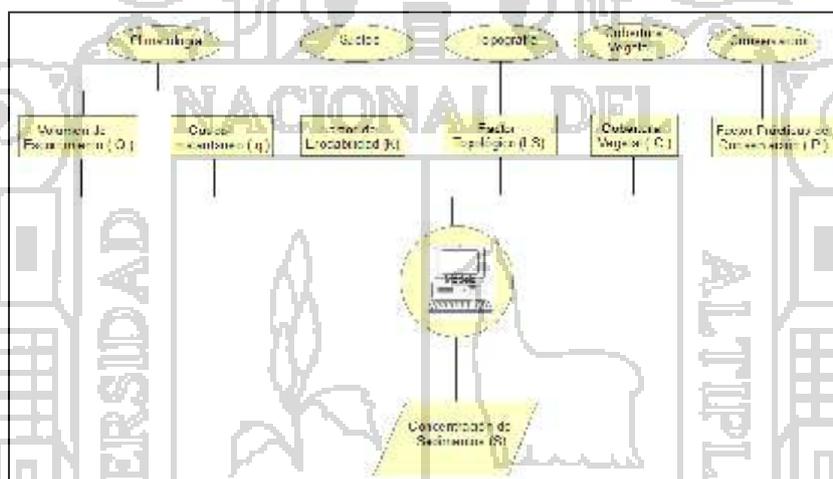
(1) Caracterización hidrológica de la cuenca Allahualla(ver figura 4.2).

- (2) Caracterización Sed Cad 4(ver figura 4.6).
- (3) Ven Te Chow, Hidrología aplicada 1994.
- (4) Monograma de Foster (ver figura 3.1).
- (5) C. T. Haan, Diseño hidrológico y sedimentológicos para cuencas pequeñas 1994.

Aplicación de la Ecuación MUSLE

Dado que el modelo Sed Cad 4 determina la cantidad de sedimentos en función al criterio MUSLE que ha sido analizado en el ítem 3.2.1, a continuación se harán unos cálculos que simulen la secuencia del modelo.

Diagrama de Flujo de MUSLE - SED CAD



Fuente: Elaboración Propia

Son conocidos los parámetros K, L.S, C, y P.

1. Erosionabilidad del suelo (K): 0.45, que fue determinado del monograma de Foster (figura 3.1);
2. Factor topológico (L.S): 14.77, determinado de las relaciones de Wischmeier. Sabiendo que los parámetros declive y pendiente son 305m y 20 % ;
3. Factor de cobertura vegetal (C): 0.008, según C. T. Haan;
4. Factor de prácticas de conservación (P): 1.0, según C. T. Haan;
5. Volumen de escurrimiento por descarga (Q): 743 530 m³ Según la simulación Sed Cad 4;

6. Máximo caudal instantáneo (q): 24 m³/s Según la simulación Sed Cad 4;
7. Concentración de Sedimentos (S): 7 218 Tn/ tormenta.

4.3.3.- Aplicación con el Modelo Kineros

En el Ítem 3.2.2 se explicó los conceptos que considera este modelo hidrológico. en los Ítem siguientes se hablará de cada elemento que compone el modelo matemático distribuido.

Creation de Input Files (Creación de los archivos de Ingreso al modelo)

KINEROS lee los datos de entrada de los dos archivos de entrada: Uno con extensión PRE y otra con extensión PAR:

- Un archivo contiene los datos de lluvia (extensión PRE) para todas las estaciones pluviométricas sobre o cerca de la cuenca que se utilizan en la simulación, tal archivo se puede visualizar en el Anexo Kineros.
- El segundo archivo contiene datos que describen las características hidrológicas de las superficies y canales de la cuenca (extensión PAR). En este archivo están los datos que describen la red de las cuencas y los canales, su tamaño y la pendiente, rugosidad hidráulica de cada uno, y de infiltración y erosión parámetros de cada elemento, tal archivo se puede visualizar en el Anexo Kineros.

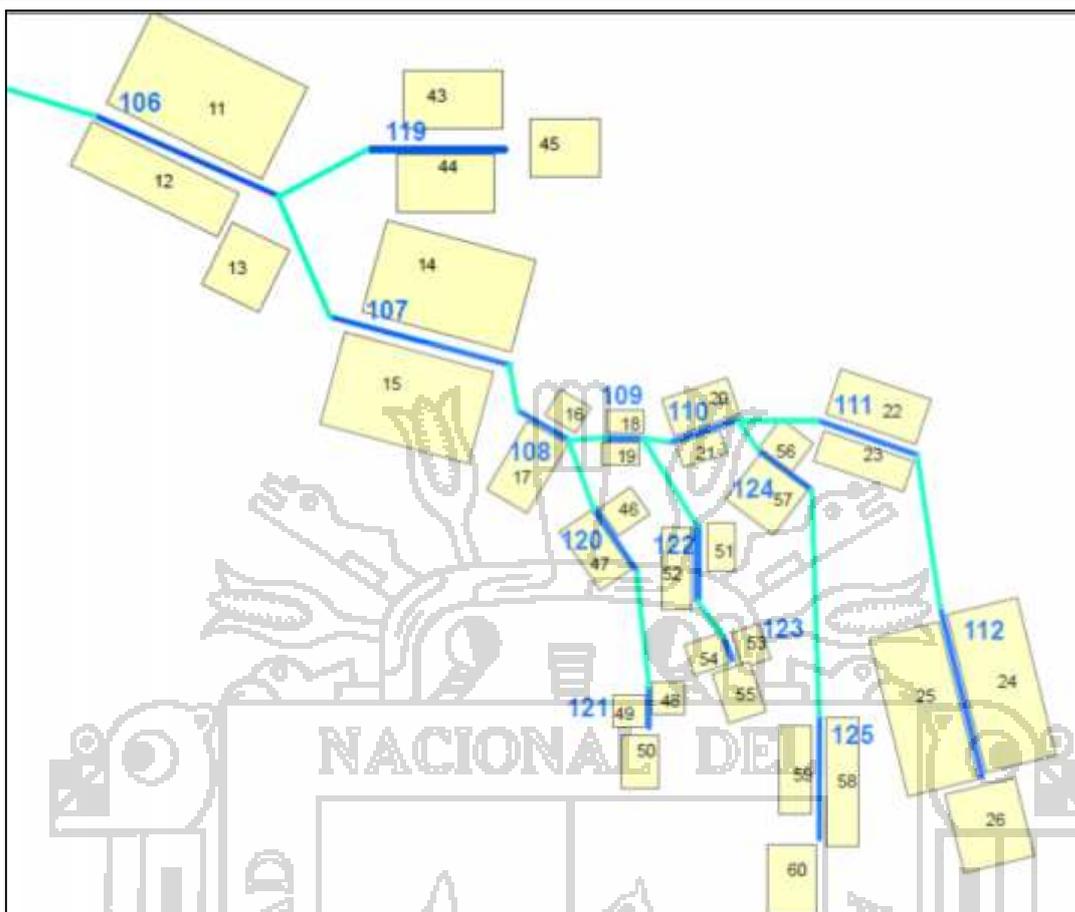
Watershed Geometry - Selection of Planes and Channels (Geometría de la Cuenca - Selección de los Planos y Canales).

El objetivo es seleccionar un conjunto de planos y canales y la vinculación de flujo que preserve las variaciones espaciales más significativos de la topografía,

los suelos, la cubierta, y las precipitaciones. Aunque no existe un método objetivo para la selección de la red de planos y canales, Lane et al. (1975) proporciona algunas pautas y puntos de vista sobre los efectos de la simplificación geométrica de los valores de los parámetros y simulación hidrograma. En la figura 4.9 se muestra la vinculación entre los planos y los canales (34 planos y 14 canales).



Figura 4.9: Caracterización hidrológica de la Cuenca Allahualla para el Modelo Matemático Kineros 2.



Fuente: Elaboración Propia.

Los parámetros que intervienen en la caracterización de los planos de la cuenca son:

Conductividad hidráulica efectiva (K_s), Capilaridad (G), Porosidad (ϕ), Fracción de la distribución de partículas, Intercepción de la lluvia, Manning (n) de los planos o subcuencas, geometría de la cuenca.

En la Tabla 4.4 se muestran estos parámetros de ingreso de los planos de la cuenca.

Tabla 4.4: Parámetros hidráulicos y sedimentológicos de ingreso a la Cuenca en el Kineros 2.



ID Kineros (2)	Elemento (1)	Length [m]	Width [m]	Slope [m/m]	Manning (n) ⁽³⁾	Interception [mm] ⁽⁴⁾	Ksat [mm/hr] ⁽⁵⁾	Capillary G [mm] ⁽⁴⁾	Porosity ⁽⁴⁾	Vol. fract. Rock	Size distribution	CV of Ks	Fractions of the particle sizes ⁽⁶⁾	Rain splas coeff.	Cohesion coeff
11	F1	9304	1381	0.193	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
12	F2	5947	358	0.059	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
13	F3	1126	194	0.214	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
14	G1	7242	1137	0.259	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
15	G12	10569	870	0.125	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
16	H1	968	229	0.164	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
17	H2	5772	561	0.180	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
18	I1	1964	314	0.227	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
19	I2	2205	286	0.102	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
20	J1	3169	596	0.224	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
21	J2	3955	381	0.140	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
22	K1	7166	784	0.192	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
23	K2	2860	415	0.107	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
24	L1	9793	524	0.208	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
25	L2	7443	1082	0.226	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
26	L3	4223	567	0.152	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
43	S1	4643	330	0.270	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
44	S2	4329	588	0.241	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
45	S3	1862	693	0.323	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1



46	T1	2694	259	0.106	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
47	T2	4682	477	0.160	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
48	U1	2632	124	0.186	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
49	U2	2635	248	0.227	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
50	U3	3268	656	0.271	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
51	V1	2413	353	0.166	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
52	V2	5199	438	0.154	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
53	W1	1193	331	0.265	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
54	W2	960	118	0.201	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
55	W3	3454	404	0.246	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
56	X1	1092	173	0.078	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
57	X2	4373	230	0.119	0.15	1	4	260	0.4	0.2	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
58	Y1	8252	474	0.260	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
59	Y2	7362	417	0.270	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1
60	Y3	2265	830	0.376	0.15	1	4	260	0.4	0.1	0.33	0.8	0.0015, 0.1105, 0.3530, 0.3620, 0.1730.	50	0.1

(1) Caracterización hidrológica de la cuenca Allahualla(ver figura 4.2).

(2) Caracterización Kíneros 2(ver figura 4.9).

(3) Woolhiser (1975) and Engman (1986).

(4) <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>

(5) Mannaerts, 1999.

(6) Minera Quechua.

Estimation of Hydraulic Resistance Parameters (Estimación de los parámetros de Resistencia Hidráulica)

EL parámetro de resistencia que aplica a la cuenca en estudio, es el número de manning, tanto en los planos como en los canales. En la tabla 4.5 se muestra algunas recomendaciones para adoptar la resistencia según sea el material.

Tabla 4.5: Recomendación de Coeficientes de Número de Manning para Flujo Superficial.

Cover or treatment	Residue rate (tons/acra)	Value recommended	Range
Concrete or asphalt		0.011	0.01 - 0.013
Bare sand		0.01	0.01 - 0.016
Graveled surface		0.02	0.012 - 0.03
Bare clay loam (eroded)		0.02	0.012 - 0.033
Fallow - no residue		0.05	0.035 - 0.16
Chisel plow	<1/4	0.07	0.036 - 0.17
	1/4 - 1	0.10	0.07 - 0.34
	1 - 3	0.3	0.19 - 0.47
	>3	0.4	0.34 - 0.46
Disk/harrow	<1/4	0.08	0.038 - 0.41
	1/4 - 1	0.16	0.1 - 0.25
	1 - 3	0.25	0.14 - 0.53
	>3	0.3	-
No till	<1/4	0.04	0.03 - 0.07
	1/4 - 1	0.07	0.01 - 0.13
	1 - 3	0.3	0.16 - 0.47
Moldboard plow (fall)		0.06	0.02 - 0.1
Cotter		0.1	0.05 - 0.13
Range (natural)		0.13	0.01 - 0.32
Range (clipped)		0.1	0.02 - 0.24
Grass (bluegrass soil)		0.45	0.39 - 0.63
Short grass prairie		0.15	0.1 - 0.2
Dense grass ¹		0.24	0.17 - 0.3
Bermuda grass ¹		0.41	0.3 - 0.48

Fuente: (Woolhiser (1975) and Engman (1986))

Infiltration Parameter Estimation (Estimación de los parámetros de Infiltración)

Kineros requiere de tres parámetros básicos para describir las propiedades de infiltración de un suelo: La conductividad hidráulica efectiva saturada de campo (K_s), la capilaridad del suelo (G) y la porosidad del suelo (n).

Los parámetros también se pueden determinar a partir de las características hidráulicas del suelo insaturados, pero estos datos son lo más a menudo disponible. Si se conoce la clase textural del suelo por ejemplo, franco arcilloso, franco limoso, franco arcillo arenoso los parámetros pueden ser estimados con base en las tabulaciones de Rawls et al. (1982). En la tabla 4.6 se reporta algunos valores de los parámetros que provocan la infiltración en las subcuencas.

Tabla 4.6: Parámetros hidráulicas del suelo.

Textural Class	Residual Water Content ¹	Effective Saturation ¹	Pore Size Distribution ¹	Saturated Hyd. Conduct. ¹	Total Porosity ²	Mean Capillary Drive ²
	θ_r	θ_e	λ	K_{sat} [mm/h]	n	G [mm]
Sand	0.058	0.37	0.687	210.75	0.437	50
Loamy Sand	0.074	0.39	0.592	94.30	0.437	70
Sandy Loam	0.067	0.37	0.379	17.33	0.463	130
Loam	0.083	0.48	0.237	15.96	0.463	110
Silt	0.123	0.48	0.316	23.21	0.501	200
Silt Loam	0.081	0.43	0.281	12.71	0.390	260
Sandy Clay Loam	0.036	0.4	0.329	4.04	0.464	280
Clay Loam	0.129	0.47	0.270	0.77	0.471	350
Silty Clay Loam	0.090	0.55	0.291	3.09	0.479	380
Silty Clay	0.183	0.47	0.281	3.50	0.475	410
Clay	0.102	0.51	0.167	10.03		

(1) UNSODA (Unsaturated Soil Hydraulic database).

(2) Manual de Usuario Kineros, 1990.

El método utilizado para determinar los parámetros de infiltración depende de la cantidad y el tipo de datos disponibles para una aplicación determinada y la experiencia individual del modelador del KINEROS.

Erosion Parameters (Parámetros de Erosión)

Básicamente se considera la distribución de partículas que se obtiene en los muestreos de campo, además de las densidades de los suelos analizados.

El modelo limita a utilizar solo cinco tamaños de partículas representativas, las cuales son: 0.001 (coloide), 0.002(arcilla), 0.010(limo), 0.6 (arena) y 3.0 mm (grava). Existe el conocimiento suficiente para utilizar los siguientes supuestos en nuestra formulación del modelo, sin embargo:

- 1 . Si el tamaño de partícula más grande en un terreno de tamaños mixtos es por debajo de su umbral de la erosión, la erosión de los tamaños más pequeños será limitado, ya que de otra armadura pronto detener el proceso de erosión.
- 2 . Cuando existen condiciones erosivas para todos los tamaños de partículas, las tasas de erosión de partículas será proporcional a la ocurrencia relativa de los tamaños de partícula en la superficie del suelo. Lo mismo puede decirse de la erosión por salpicadura de la lluvia .
3. Partícula asentando velocidades, cuando las concentraciones exceden transportabilidad, son independientes de la concentración de otros tamaños de partículas.

Rainfall and Interception (Precipitación e Intercepción)

Los datos pluviométricos, se introducen como una altura de lluvia acumulada. Esta información es a nivel horario. Las precipitaciones se modelan como espacialmente uniforme sobre cada elemento, sino que varía entre los elementos si hay más de un pluviómetro.

La tormenta representativa a la cuenca de interés asciende a 43.2 mm, y corresponde a la estación Meteorológica Quechua (ver tabla 4.1). En la figura 2 del Anexo se observa la ubicación espacial de las estaciones pluviométricas.

El efecto de la intercepción está controlada por dos parámetros, la altura de intercepción y la fracción de la superficie cubierta por la intercepción de la vegetación. El primer parámetro refleja la altura media de precipitación retenido por el tipo particular de vegetación. En la tabla 4.7 se resume algunos valores publicados (Horton, 1919) para la altura de intercepción. Estos valores reflejan la temporada, etapa de crecimiento, densidad de la población y la velocidad de viento.

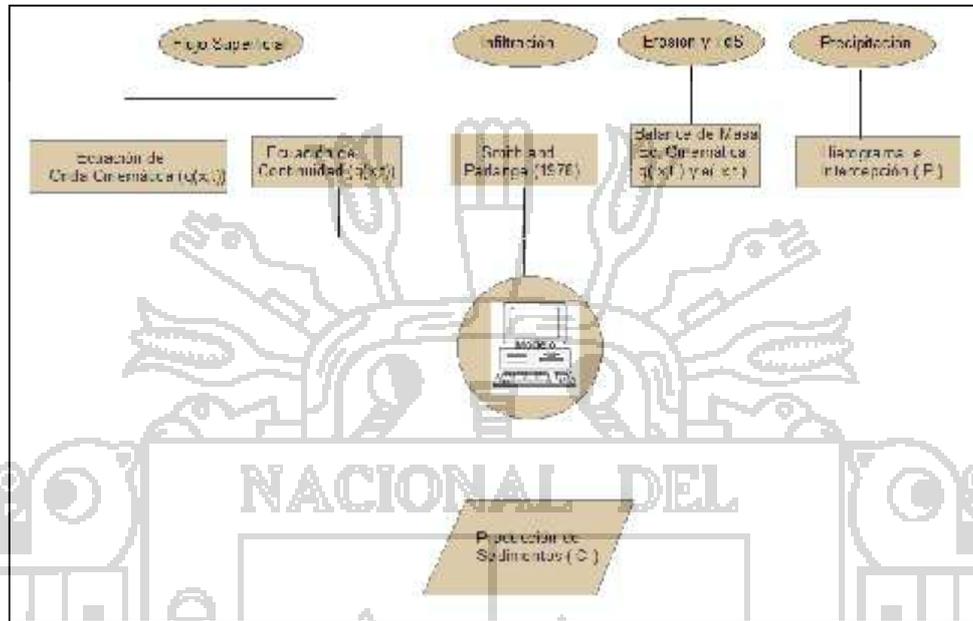
Tabla 4.7: Parámetros de Intercepción.

Vegetative cover	Height		l mm	Reference
	m	ft		
Corn	1.62	0	0.76	Horton (1919)
Tobacco	1.22	4	1.8	Horton (1919)
Small grains	0.91	3	4.1	Horton (1919)
Meadow grass	0.30	1	2	Horton (1919)
Alfalfa	0.30	1	2.8	Horton (1919)
Grass (fescue)	--	--	1.0 - 1.2	Burgy and Pomeroy (1958)
Mixed hardwoods	--	--	0.5 - 1.8	Horton (1919)
Apple	--	--	0.5	Calheiros de Miranda and Butler (1986)
Big Bluestem grass	0.6	2	2.3	Clark (1940)
Bluegrass	--	--	1	Haynes (1940)
Tartuash	--	--	3	Tromble (1983)

Fuente: <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>

Resumen de la Aplicación de Conceptos del Modelo KINEROS 2

Diagrama de Flujo de KINEROS



Fuente: Elaboración Propia

Flujo Superficial: Proceso de flujo Unidimensional en el que el flujo está relacionado con el almacenamiento de unidad de área.

$$Q = \alpha h^m$$

Donde:

Q : Descarga por ancho unitario.

h : Almacenamiento por unidad de área.

α y m : Parámetros que están en función a la pendiente de terreno.

El flujo superficial, también está gobernado por la ecuación de continuidad, ya que el proceso de flujo es unidimensional.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} = q(x, t)$$

Donde:

t : Es el tiempo;

x : Distancia a lo largo de la dirección de la pendiente;

q : Tasa de flujo lateral;

Flujo Superficial en canales: El proceso de flujo superficial en canales también considera aproximaciones de la ecuación cinemática. La ecuación de continuidad en flujos de secciones están representados por;

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} = q_c(x, t)$$

Donde:

A : Sección del área por donde pasa el flujo;

Q : Descarga del canal;

$q_c(x, t)$: Entrada neta lateral de descarga por unidad de longitud del canal;

Además Q puede expresarse en función de A , es decir:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} = q_c(x, t)$$

La simplificación de la ecuación cinemática se basa en relacionar la descarga del canal con la forma de la sección transversal.

$$Q = \alpha R^{m-1} A$$

Donde:

R : Radio hidráulico;

$$\alpha = 1.49S^{1/2}/n;$$

m : 5/3;

Infiltración: Kineros requiere tres parámetros básicos para describir las propiedades de infiltración del suelo: La conductividad hidráulica saturada efectiva (k_s), la capilaridad (G) y la porosidad (ϕ).

Erosión y Transporte de Sedimento: Kineros cuenta por separado la erosión causada por la energía de la lluvia y la erosión causada por el agua que fluye.

La ecuación general que utiliza KINEROS para determinar la dinámica del sedimento en cualquier parte a lo largo de la trayectoria en un flujo superficial es una ecuación de balance de masa similar a la del flujo de agua cinemática (Bennett, 1974).

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x, t) = q(x, t)$$

Donde:

C_s = Concentración de Sedimentos (L^3/L^3);

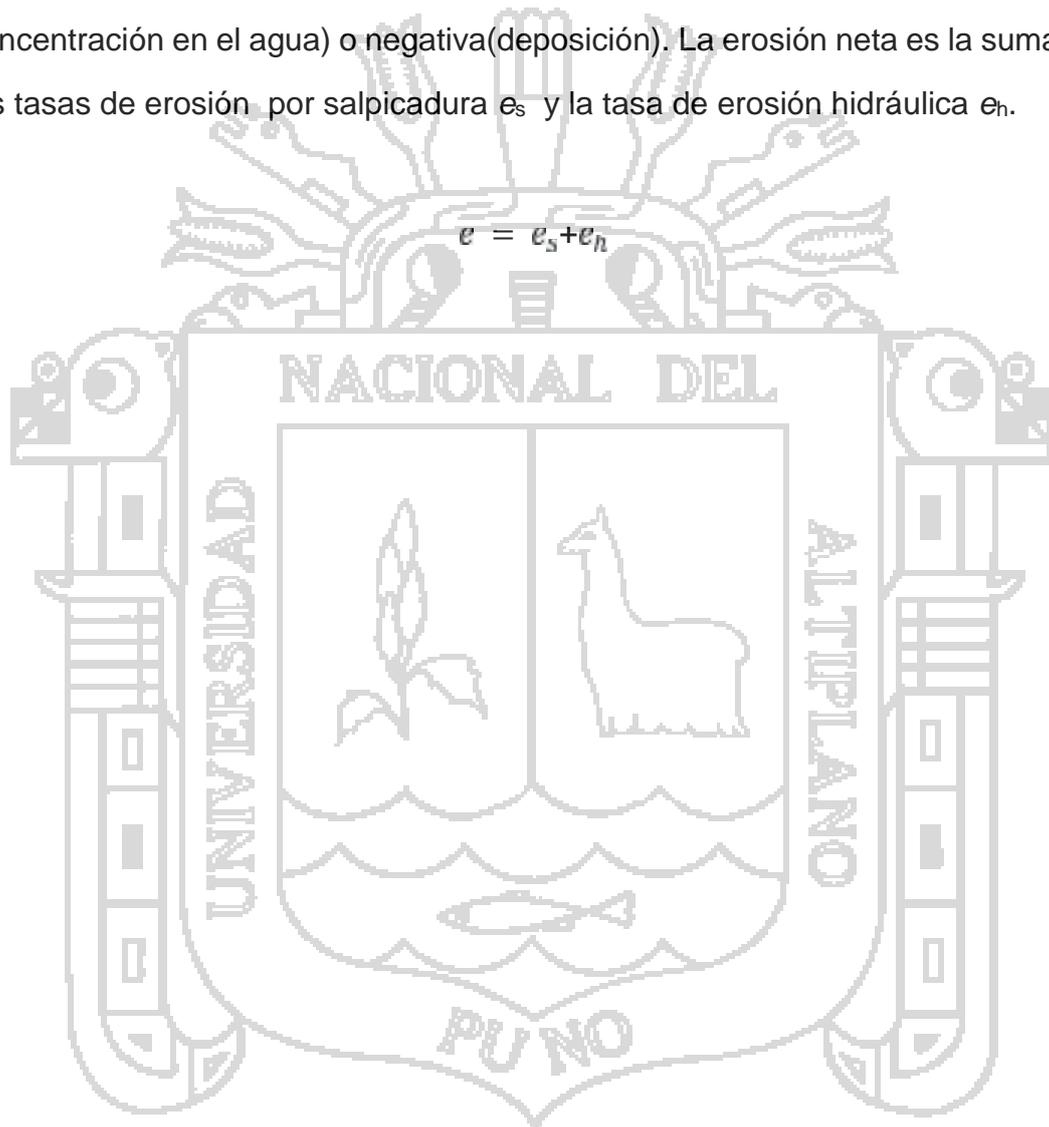
Q =Tasa de Descarga de Agua (L^3/T);

A =Área de la sección del Flujo (L^2);

e =Tasa de Erosión del Lecho de Suelo (L^2/T);

q =Tasa de Sedimentación Lateral del Cauce ($L^2/T/L$).

Para terrenos en pendiente se asume que e se constituye de dos principales componentes: Producción de suelo erosionado por precipitación y erosión (o deposición) hidráulica por la interacción entre la fuerza del agua sobre el suelo y la tendencia de las partículas de suelo de establecerse por acción de la fuerza de la gravedad. De esta manera puede ser positiva (incremento de la concentración en el agua) o negativa (deposición). La erosión neta es la suma de las tasas de erosión por salpicadura e_s y la tasa de erosión hidráulica e_h .



5. SIMULACIÓN, GENERACION DE RESULTADOS.

5.1.- Cálculos Teóricos y Simulación de los Modelos

Se ha calculado la cuantificación del aporte de sedimentos en la cuenca Allahualla con las metodologías teóricas Gavrilovic y USLE, con la finalidad de contrastar los resultados con los modelos matemáticos.

Se ha modelado la respuesta hidrológica y sedimentológica de las áreas de interés empleando los modelos hidrológicos determinísticos SEDCAD 4 (de la Universidad de Kentucky) y el KINEROS 2 (del Departamento de Agricultura de los estados Unidos).

5.2.- Generación de Resultados

En las tablas 5.1 y 5.2 se reportan los resultados de los cálculos con los métodos teóricos Gavrilovic y USLE respectivamente. Los cálculos previos se desarrollaron en el ítem 4.3.1.

Tabla 5.1. Producción de Sedimentos con el Método Gavrilovic

Cuenca	Área (km²)	R	W(m³/año)	G (Tn)
Allahualla	89.4	0.195	66 640	34 480

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2. Producción de Sedimentos con el Método USLE

Cuenca	Área (km ²)	R (J.m- ² .cm.h)	E (Tn)
Allahualla	89.4	37	17 686

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5.3 se reportan los resultados en la simulación con el modelo Sed Cad 4. Se muestran los caudales instantáneos y la producción de sedimentos producidos en un evento de tormenta .

Tabla 5.3. Producción de Sedimentos en el Modelo Sed Cad.

ID	Subcuencas	Área	Caudal	Sedimentos
KINEROS	Nomenclatura	(km ²)	(m ³ /s)	(Tn)
11	F1	12.8	3.06	822.10
12	F2	2.1	0.47	18.30
13	F3	0.2	0.07	11.00
14	G1	8.2	2.32	763.20
15	G2	9.2	1.87	303.70
16	H1	0.2	0.07	8.00
17	H2	3.2	0.92	178.10
18	I1	0.6	0.21	39.80
19	I2	0.6	0.20	14.20
20	J1	1.9	0.63	138.60
21	J2	1.5	0.46	58.30
22	K1	5.6	1.50	345.60
23	K2	1.2	0.38	32.20
24	L1	5.1	1.19	318.50
25	L2	8.1	2.21	635.40
26	L3	2.4	0.74	109.00

43	S1	1.5	0.48	127.10
44	S2	2.5	0.80	199.40
45	S3	1.3	0.46	137.90
46	T1	0.7	1.21	38.35
47	T2	2.2	0.66	104.20
48	U1	0.3	0.10	14.30
49	U2	0.7	0.24	46.70
50	U3	2.1	0.71	1918.00
51	V1	0.9	0.31	42.80
52	V2	2.3	0.67	102.40
53	W1	0.4	0.14	30.00
54	W2	0.1	0.04	4.70
55	W3	1.4	0.46	108.80
56	X1	0.2	0.07	2.20
57	X2	1.0	0.29	290.80
58	Y1	3.9	1.05	323.90
59	Y2	3.1	0.88	268.70
60	Y3	1.9	0.67	245.70
	SALIDA	89.4	23.98	7 900

Fuente: Elaboración propia.

Las salidas, donde se muestran los resultados de la simulación del Modelo Sed Cad 4 se reportan en el Anexo.

En la tabla 5.4 se reportan los resultados en la simulación con el modelo Kineros. Se muestran los caudales instantáneos y la producción de sedimentos producidos en un evento de tormenta .

Tabla 5.4. Producción de Sedimentos en el Modelo Kineros

ID	Subcuencas	Área	Caudal	Sedimentos
KINEROS	Nomenclatura	(km²)	(m³/s)	(Tn)
11	F1	12.8	2.07	1641.09
12	F2	2.1	1.17	89.68
13	F3	0.2	0.15	143.72
14	G1	8.2	3.21	4766.36
15	G2	9.2	1.33	443.12
16	H1	0.2	0.15	84.09
17	H2	3.2	0.39	271.68
18	I1	0.6	0.41	30.52
19	I2	0.6	0.27	67.94
20	J1	1.9	0.86	1062.73
21	J2	1.5	0.35	151.59
22	K1	5.6	3.60	2791.87
23	K2	1.2	0.77	186.88
24	L1	5.1	2.68	2083.41
25	L2	8.1	2.10	1766.49
26	L3	2.4	0.76	287.61
43	S1	1.5	0.42	546.65
44	S2	2.5	0.75	736.73
45	S3	1.3	0.55	1093.71
46	T1	0.7	0.52	360.86
47	T2	2.2	0.53	302.90
48	U1	0.3	0.66	165.10
49	U2	0.7	0.40	360.86
50	U3	2.1	0.88	216.60
51	V1	0.9	0.81	413.79
52	V2	2.3	0.52	273.11
53	W1	0.4	0.42	393.22

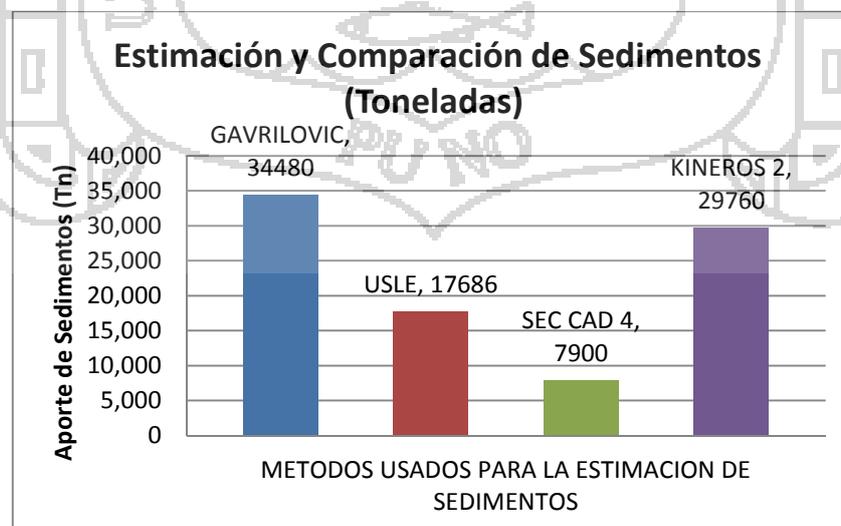
54	W2	0.1	0.21	65.56
55	W3	1.4	0.28	151.59
56	X1	0.2	0.33	23.00
57	X2	1.0	0.23	71.66
58	Y1	3.9	2.37	2689.27
59	Y2	3.1	0.89	1132.62
60	Y3	1.9	1.18	2807.54
	SALIDA	89.4	21.77	29 760

Fuente: Elaboración propia.

Las salidas, donde se muestran los resultados de la simulación del Modelo Kineros 2 se reportan en el Anexo.

Haciendo una comparación entre las metodologías empleadas se obtiene la figura 5.1, que muestra la estimación y comparación de métodos teóricos con modelos matemático en la producción de sedimentos.

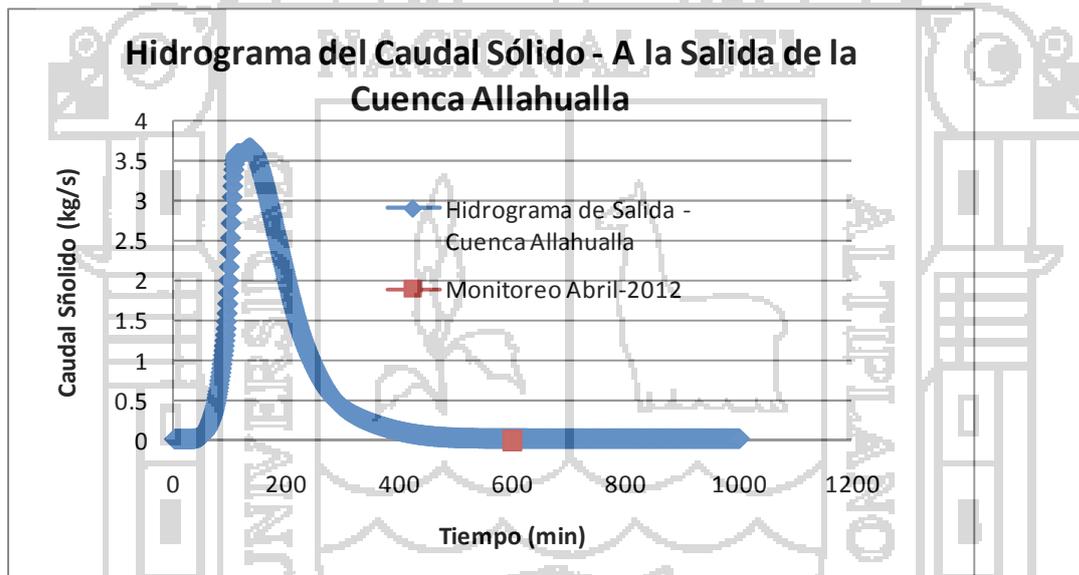
Figura 5.1: Comparativo de Resultados Obtenidos en la Estimación de la producción de Sedimentos.



Fuente: Elaboración Propia

En la figura 5.1 se observa que los métodos Gavrilovic y Kineros 2 muestran cierta similitud en la estimación de sedimentos, por que se podría considerar como resultados aceptables en este informe. En la figura 5.2 se compara el hidrograma del caudal sólido del Modelo Kineros 2 con un aforo de concentración de sedimentos realizado en abril del 2011 a la salida de la cuenca de estudio.

Figura 5.2: Comparativo de Resultados Obtenidos del Modelo Kineros 2 con el Monitoreo Sedimentológico.



Fuente: Elaboración Propia

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1.- Conclusiones

Precipitación

1. El hietograma usado en los modelos pertenecen a la estación Quechua, que es controlada por la Empresa Minera Quechua. La información con la que se cuenta es a nivel horario.
2. El evento de lluvia con la que se calcularon y simularon alcanzan una altura de 43.2 mm y una lluvia media anual de 997 mm.

Caudales

1. Los Caudales que resultan a la Salida de la cuenca Allahualla son de 23.98 m³/s empleando el modelo Sed Cad 4 y 21.77 m³/s empleando el modelo Kineros.

Sedimentos

1. Los sedimentos resultantes de la simulación con modelos determinísticos en la salida de la cuenca Allahualla ascienden a 7 900 Tn empleando el Sed Cad 4 y 29 760 Tn empleando el Kineros 2.
2. Considerando la metodología teórica de Gavrilovic se estima 34 480Tn y mediante la metodología USLE se llega a estimar un aporte de sedimento de 17 686 Tn para un evento de tormenta de 43.2mm.

3. La Cuenca del río Allahualla presenta un aporte de Sedimento de 29 760 Tn para una tormenta de 43.2mm y una tasa promedio anual de 799 444 Tn/Año .

6.2.- Recomendaciones

1. Según sea la importancia del proyecto de la cuantificación de aporte de sedimento, se recomienda tener registros de campo en todos los sectores distribuidos para contrastar con los resultados de los cálculos y simulaciones.
2. Según sea la importancia del proyecto de de la cuantificación de aporte de sedimento, se recomienda construir modelos físicos para validar los resultados de los modelos matemáticos.
3. Los registros de campo como sondeos granulométricos, registros de caudales instantáneos, etc. deberán estar ubicados y emplazados, de tal manera que sean representativos a la cuenca de estudio.

7. BIBLIOGRAFIA.

1. Arturo Rocha Felices, 1998. Introducción a la Hidráulica Fluvial, Facultad de Ingeniería Civil - Perú.
2. Bennett, 1974. Kineros, A Kinematic Runoff and Erosion Model - User Manual, United States Department of Agriculture.
3. Brooks, K. N.; Ffolliot, P. F.; Gregersen, H.M., 1997. Hydrology and the Management of Wathersheds, Iowa University States - USA.
4. Colotti, E, 2004. Aplicabilidad de los datos de lluvia horaria en el cálculo de la erosividad, Departamento de Publicaciones. Universidad Central de Venezuela.
5. Figueroa, B., 1991. Manual de Predicción de Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica, Colegio de Posgraduados, SAHR, México.
6. Foote G.R. and Du Toit, 1969. Terminal Velocity of raindrops aloft, J. Applied Meteor.
7. Hudson, N., 1982. Conservación del Suelo, Universidad Autónoma de México.
8. José Ramirez, 2009. Producción de Sedimentos en Cuencas, Universidad Autónoma de México

9. Julien, P.Y., 2002. Rivers Mechanics. Cambridge, Cambridge University press.
10. Kinnell, 1990. The mechanics of raindrop induced flow transport, University of Canberra - Australia.
11. Levi, E., 1986. El agua según la ciencia, evolución de la hidráulica. Volumen II, Series del Instituto de Ingeniería, D24, UNAM. - México.
12. Leo C. Van Rijn, 1993. Principios de Transporte de Sedimentos en Ríos, Estuarios y Mares Costeros, Aqua Publication P.O. Box 9896 Amsterdam The Netherlands.
13. López Cárdenas, 2003. La Ingeniería en los procesos de desertificación, Grupo TRAGSA, Ediciones Mundi-Prensa - México.
14. Manual de Diseño SC4, 2010. Manual de Diseño y Guía de Usuario, Richar C. Warner - Universidad Kentucky.
15. Manual de Usuario Kineros, 1990. Kineros, A Kinematic Runoff and Erosion Model - User Manual, United States Department of Agriculture.
16. MMA_M, 1998. Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión - Ingeniería Medio Ambiental, TRAGSA.
17. Moss A.J. and Green, 1983. Movement of solids in air and water by raindrop impact, American Society of Agriculture Engineer - Australia.

18. Rivera Trejo, F., Gutiérrez López, A., 2006. La Medición de Sedimentos en México, IMTA, UJAT y UNESCO.
19. Scott y Mount, 2004. Plantation Forestry Impacts on Sediment Yields and Downstream Channel Dynamics in the UK., Progress in Physical geography.
20. Simons, D. B. y Sentürk, F., 1992. Sediment Transport technology: Water and Sediment Dynamics, Editorial: Water Resources Publications, USA.
21. Smith and Parlange, 1978. Kineros, A Kinematic Runoff and Erosion Model - User Manual, United States Department of Agriculture.
22. Varoni, V.A., 1977. Sedimentation Engineering. Manuals and reports on Engineering practice, No 54, ASCE -USA.
23. Vente Te Chow, 1994. Hidrología Aplicada, McGraw-Hill Interamericana - Colombia.
24. Wischmeir y Smith, 1965. Predicting Rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains, guide for selection of practices for soil and water conservation, Agriculture Handbook USDA -ARS - USA.
25. Wischmeir y Smith, 1978. Predicting Rainfall-Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning., Agriculture Handbook USDA -ARS - USA.