

# 1. GENERALIDADES

## 1.1. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica superficial es muy perjudicial ya que se relaciona con la disminución de la capacidad del suelo para producir cultivos, debido sustancialmente a la pérdida de materia orgánica de los horizontes del mismo. Además de este problema local, originado por el desprendimiento y erosión de partículas de suelo, existe el transporte y posterior deposición de sedimento en zonas alejadas, donde el problema es justamente la deposición del sedimento generado por la erosión a nivel de la cuenca.

Para estimar la erosión hídrica a nivel de cuenca existen distintos abordajes metodológicos.

Un abordaje está representado por las evaluaciones basadas en la apreciación de expertos que asignan distintos grados de severidad al proceso o dan un puntaje a distintos factores los cuales son posteriormente combinados. Ejemplo de este tipo de abordajes lo constituyen los trabajos de De Ploey y Poesen en 1985, Morgan R. en 1995, Montier, Daroussin, King y Le Bissonnais en 1998. El otro abordaje se sustenta en aplicaciones de distintos tipos de modelos matemáticos. Una descripción detallada de estos modelos ha sido recientemente por Singh y Woolisher en 2002.

Los modelos matemáticos para el pronóstico de erosión hídrica pueden ser clasificados de diferentes maneras. Una manera de clasificarlos es en función de la escala temporal para la cual han sido desarrollados, es decir, algunos modelos permiten estimar la erosión producida por un evento hidrológico particular, mientras que otros, por ejemplo, evalúan la erosión media anual a largo plazo. Se puede asimismo establecer otra división entre modelos empíricos y modelos físicamente basados. La elección de un tipo particular de modelo depende sustancialmente del objetivo que se persigue y de la disponibilidad de datos, tiempo y financiamiento. (Basile, Riccardi y Stenta, 2005)

## 1.2. ANTECEDENTES

En cuanto a la estimación de la erosión, la cual es la fuente de la producción de sedimentos, los primeros estudios los realizó Wolly un edafólogo alemán entre 1877 y 1885. En Estados Unidos las primeras investigaciones comenzaron en 1907. Miller llevó a cabo sus primeros experimentos en Missouri en 1917. H. Benett y L.A. Jones midieron la erosión de parcelas experimentales entre 1928 y 1933. Hacia 1936 Cook ya intuía la relación entre la erosión, el suelo, la lluvia, la pendiente y la cobertura vegetal. Siendo Zingg en 1940 el primero en proponer la primera ecuación para estimar la pérdida de suelo. Laws en 1940 y Ellison en 1944 identificaron la lluvia como el factor de peso de la erosión. 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. (B. Simons y Sentürk, 1992: 21)

Para 1959 con base en el trabajo de sus predecesores y experimentación Wischmeir propone la primera versión de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE <sup>1</sup>), la cual se mejora para 1965 y 1978 en conjunto con Smith. Esta ecuación es la más aceptada para la estimación de producción de sedimentos. Debido al gran éxito de la USLE, surgieron versiones de otros autores como Williams y Berndt en 1972 con la MUSLE, Kinnell y Risse en 1998 con la USLE-M, Renard et al en 1997 con la RUSLE y McCool et al en 2004 con la RUSLE2, entre otros. Otra línea de investigación que también se ha seguido para estimar la producción de sedimentos en cuencas son los métodos estocásticos y los de simulación de procesos físicos como los planteados por Simons y Sentürk en 1992 que proporcionan suficiente información al respecto.

Los trabajos realizados donde se aplicó el modelo de la USLE en Bolivia son diversos, entre ellos se tienen:

- La situación ambiental en relación con la erosión en Bolivia realizado por la FAO en 1992.

---

<sup>1</sup> USLE es el acrónimo para Universal Soil Loss Equation, es decir, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. La USLE expresa el promedio de las pérdidas anuales de suelo a largo plazo (en toneladas métricas por hectárea y año, t/ha/año), y por tanto no es válida para un año concreto ni para un evento particular.

- Valoración hidrológica de las cuencas de los ríos de Tolomosa y La Victoria realizado por el instituto de hidráulica e hidrología de la universidad Mayor de San Andrés en 2002.
- Evaluación de la erosión utilizando el modelo USLE cuenca del lago Poopo y Uru realizado por la Sociedad Boliviana de la Ciencia del Suelo (SBCS) en 2007.
- Erosión de suelos en Bolivia realizado por el instituto boliviano de ciencia y tecnología nuclear centro de investigaciones nucleares en 2009.
- El estudio de la erosión hídrica laminar de la TIOC del Ayllu de Sikuya del municipio de Llallagua realizado por la UMSA en 2017.
- Estimación de las tasas de sedimentos en la cuenca minera del lago Poopo y tendencias ante variaciones climáticas realizado por la Universidad Técnica de Oruro en 2018.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En San Lorenzo, el carácter estacional había marcado periodos claramente diferenciados de avenida y estiaje, pero en los últimos años esto fue cambiando ocasionado probablemente por el calentamiento global. Esto sumado al aumento poblacional y de cultivos en las zonas áridas conllevó a la construcción del reservorio de La Hondura para aprovechar los excedentes del periodo húmedo y utilizarlo en el periodo seco. Sin embargo, como en muchos de los reservorios construidos, se han presentado problemas de sedimentación, particularmente después de la ocurrencia del fenómeno El Niño o La Niña que produjeron climas extremos, ya sea sequias de varios meses en zonas tropicales, lluvias de gran intensidad en zonas áridas, etc.

El presente trabajo final de grado permitirá la profundización en el conocimiento de los factores involucrados en los procesos de la erosión hídrica que son los que intervienen en la producción de sedimentos. Se planteará una herramienta de análisis que es el modelo matemático USLE para la representación de dichos procesos. Un mejor conocimiento del fenómeno estudiado permitirá prevenir y evitar la disminución de la vida útil de los embalses, además de contribuir a la universidad con el conocimiento de la aplicación de dicho método.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

Las presas en Bolivia tienen un papel fundamental en la transformación y modernización del país. Su construcción es ejemplo del avance tecnológico nacional y ha respondido permanentemente al objetivo de aprovechar racionalmente un recurso que es estratégico para el desarrollo sostenible del país. Por lo tanto, estimar la producción de sedimentos más acertadamente resulta necesario. Recordando que la sobreestimación de sedimentos añade un innecesario costo a las estructuras involucradas, por otro lado, subestimarlos llevará a dejar fuera de servicio infraestructura útil y los servicios dependientes de ella antes de tiempo. Queda claro que las obras hidráulicas son onerosas, en la mayoría de las ocasiones son pagadas por el erario público y al quedar fuera de operación se ocasiona una pérdida para todos los ciudadanos, es decir para la nación. Por lo que debemos estar en la búsqueda constante de soluciones óptimas e innovadoras para los tiempos venideros. Los resultados que se pueden obtener de esta investigación son de interés y beneficio de toda la ciudadanía.

## **1.5. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.5.1. Objetivo General**

- Evaluar el nivel de sedimentos en el embalse La Hondura mediante una combinación de factores propios de la USLE y compararlo con el estudio batimétrico para que llegue a ser una alternativa económica frente a este estudio, permitiendo tener un mejor control del embalse usado por la comunidad para riego y pesca.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Comparar las diferentes combinaciones realizadas en Arc Map y con el programa erosión 6.0 para la determinación de sedimentos, estableciendo cuál es el mejor, con el fin de tener el modelo más aplicable al embalse.

- Establecer un aproximado del tiempo de vida útil restante del embalse en función al análisis de los resultados obtenidos, para que las autoridades correspondientes analicen si es necesario ir desarrollando un plan alternativo en caso que este se colmate.

- Identificar las áreas que presentan un mayor grado de erosibilidad y por ende son las de mayor aporte de volumen de sedimentos, que serán en las que se trabajarán para disminuir los aportes de las mismas.
- Mencionar alguna alternativa para disminuir la producción de sedimentos de la cuenca que permita alargar su vida útil.

### **1.5.3. Hipótesis**

Es posible evaluar el conjunto de ecuaciones que intervienen en los procesos erosivos de la cuenca y que permitan obtener resultados aproximados al estudio batimétrico.

## **1.6. ALCANCE**

### **1.6.1. Ubicación del Proyecto**

La cuenca de Pajchani Tarija - Bolivia, se encuentra ubicada en la provincia Méndez Latitud  $21^{\circ}22' 54''$  y Longitud  $64^{\circ}47'3''$  limitando en el sudeste con San Lorenzo, con una superficie de  $8,63 \text{ km}^2$ . Es una cuenca exorreica por lo que para poder aprovechar mejor las aguas del río Pajchani se construyó la presa La Hondura.

La presa La Hondura es una presa de tierra, con un área de aporte de  $8,63 \text{ km}^2$  tiene una altura de 24 m, cuyo vaso de almacenamiento es de  $0,12 \text{ km}^2$ , una capacidad de  $1\ 187\ 000 \text{ m}^3$  teniendo una cota de coronamiento de 2107 msnm.



Figura 1.1 Vista satelital de la presa La Hondura y la cuenca de aporte

Fuente: Análisis de funcionalidad y riesgo Presa La Hondura.

### 1.6.2. Antecedentes de la presa

La presa “La Hondura” fue construida por el Programa Ejecutivo de Rehabilitación de Tierras Tarija (PERTT) por la modalidad de administración directa, la construcción dio inicio el 01 de septiembre de 2006 y concluyó el 15 de diciembre de 2008.

Las características de la presa descritas a continuación se adquirieron del estudio “Análisis de funcionalidad y riego Presa Pajchani” realizado el año 2009, ejecutado por el Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR), con el apoyo del Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable de la Cooperación Alemana al Desarrollo (PROAGRO/GIZ, 2010).

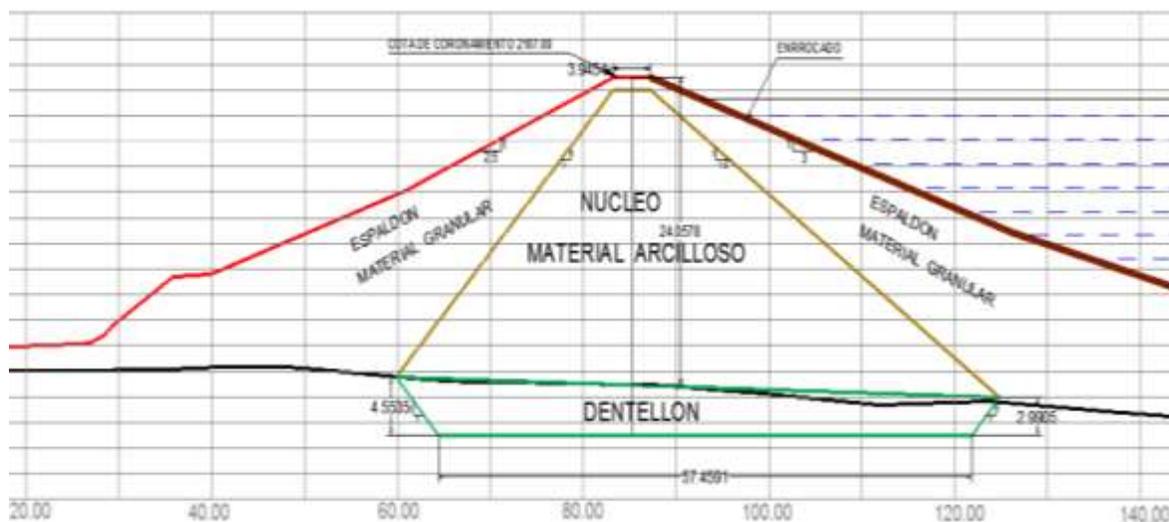


Figura 1.2 Geometría del cuerpo de la presa "La Hondura"

Fuente: Análisis de funcionalidad y riego de Presa La Hondura

La presa Pajchani está construida con materiales sueltos y es del tipo zonificada, el cuerpo de la presa está constituido por un núcleo central de material arcilloso con taludes de inclinación diferenciados, el talud del núcleo aguas arriba es 1V:1,5H, y el talud aguas abajo 1V:1H.

El espaldón aguas arriba está constituido por material granular protegido por un rip rap de espesor promedio de 0,35 m, tiene una inclinación de 1V:3H; el espaldón abajo también es de material granular y el talud tiene una inclinación de 1V:2,5H.

Los niveles característicos del embalse son los siguientes:

Tabla 1.1 Niveles característicos del embalse "La Honduras"

Coronamiento	2106,90 m.s.n.m.	25,70 m (desde nivel de fundación) 23,70 m (desde lecho del río)
Nivel de Aguas Normales (NAN)	2106,30 m.s.n.m.	23,10 m
Nivel de Aguas Mínimas (NAMin)	2088,00 m.s.n.m.	4,80 m
Nivel de Aguas Muertas (NAMuer)	2088,00 m.s.n.m.	4,80 m

Fuente: Análisis de funcionalidad y riesgo Presa La Honduras.

El vaso de almacenamiento presenta las condiciones básicas de estanqueidad, la calidad de las aguas embalsadas es buena, sin presencia de sedimentos en suspensión.

Sin embargo, debido a que la explotación de la presa es reducida por falta de una adecuada obra de toma el nivel del agua de la presa llega hasta un máximo de 6 metros por debajo del coronamiento manteniéndose la mayor parte del año llena, el agua no se renueva lo que afecta directamente a la calidad de este recurso.

Tabla 1.2 Volúmenes característicos del embalse "La Honduras".

<b>Volumen Total de Almacenamiento</b>	<b>1,19 hm<sup>3</sup></b>
<b>Volumen Útil</b>	1,15 hm <sup>3</sup>
<b>Volumen Muerto</b>	No se conoce

Fuente: Análisis de funcionalidad y riesgo Presa La Honduras.

El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje, es básico en la modelación

hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua de lluvia. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua y Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, 2016)

Tabla 1.3 Parámetros morfométricos de la cuenca Pajchani

	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>De la superficie</b>	Área	km <sup>2</sup> .	8,63
	Perímetro de la cuenca	km.	12,87
<b>Pendiente</b>	Pendiente promedio de la cuenca	grados	13,60
	Pendiente media (porcentaje)	%	25,09
<b>Cotas</b>	Cota máxima	m.s.n.m.	2687,00
	Cota mínima	m.s.n.m.	2085,00
<b>Centroide (WGS 84 UTM Zona 20S)</b>	X Centroide	m.	312899,35
	Y Centroide	m.	7635994,00
<b>Altitud</b>	Altitud media	m.s.n.m.	2470,47
<b>De la red hídrica</b>	Longitud del curso principal	km.	6,18
	Pendiente promedio del río principal	grados	10,14
	Pendiente promedio del río principal	%	9,74
	Coefficiente de sinuosidad hidráulico	Adim.	1,44
<b>Parámetros generados</b>	Coefficiente de compacidad (Gravelius)	Adim.	1,65
	Relación circular	Adim.	0,37

	Tiempo de concentración Kirpich	Horas.	0,68
	Índice de forma (Horton)	Adim.	0,43
	Relación de elongación	Adim.	0,83

Fuente: Análisis de funcionalidad y riesgo Presa La Hondura.

### 1.6.3. Ubicación de las estaciones meteorológicas

Se localizaron las siguientes estaciones meteorológicas, que si bien no se encuentran dentro de la cuenca son las que se encuentran más próximas a la presa “La Hondura”.

Tabla 1.4 Ubicación de las estaciones meteorológicas

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
Coimata	21°29'57.12" S	64°47'20.04" O
Tucumillas	21°27'39.96" S	64°49'51.96" O
Sella Quebrada	21°23'11.04" S	64°40'51.96" O
Trancas	21°18'29.16" S	64°48'56.88" O
Campanario	21°30'45,01" S	64°58'32.16" O
Tomayapo	21°16'5.88" S	65°2'42" O

Fuente: SISMET - SENAMHI

## **2. MARCO TEÓRICO**

El modelo de la USLE es complejo, además de ser muy sensible en cualquiera de sus parámetros pudiendo variar sus resultados de forma significativa con una ligera variación de dichos parámetros, existiendo otras derivadas de esta como la RUSLE que incorpora aspectos relacionados a la nieve y la MUSLE que relaciona aspectos relacionados al volumen de escorrentía y caudal instantáneo máximo.

Entre sus principales ventajas son que es un método sumamente económico pudiendo obtener resultados a través de datos satelitales y otra que es el modelo básico cuyos datos necesarios para su aplicación se obtienen sin mucha dificultad a diferencia de sus derivadas.

Entre su más grande desventaja es que de no contar con un estudio de comparación y/o validación (batimetría entre otros) sus resultados solo pueden servir para identificar zonas de riesgo erosivo, pero no para cuantificar cuanto erosionan estas.

### **2.1. MÉTODO DOBLE MASA**

El tratamiento estadístico de datos requiere, como condición básica, que éstos sean de la misma naturaleza, del mismo origen, obtenidos mediante observaciones y mediciones que hayan seguido procedimientos y métodos semejantes. Las series de datos climatológicos disponibles son muestras extraídas de una población cuya existencia y permanencia se suponen de antemano. El primer problema consiste en determinar la homogeneidad de la muestra, ya que muchas de éstas no cumplen con esta condición esencial y, lo que es peor, no se tiene un registro documental de las posibles heterogeneidades.

Casi todos los métodos de corrección se basan en la comparación de los datos de una estación con los de otras estaciones próximas, situadas en una zona climática similar y cuya homogeneidad haya sido verificada. (Montealegre, 1990)

Con este método se analiza la consistencia de la serie de valores de algún elemento hidrometeorológico medido en la estación "X", con base en los datos tomados en otra estación o grupo de estaciones "Y". Este sistema de homogenización de series, se utiliza cuando puede suceder un cambio relativo en la variable observada, medida o registrada en

una estación meteorológica. El método puede ser aplicado también, con mucho éxito en la interpolación para el relleno de datos faltantes y la extrapolación para extender una serie incompleta al período de comparación.

Si tomamos por caso la precipitación, en el análisis de dobles masas se compara la lluvia anual o mensual (valores acumulados), con la precipitación anual o mensual, acumulada de otra estación o grupo de estaciones. Graficando estas dos variables observamos si se presenta un cambio de pendiente, el cual solo puede deberse a causas diferentes a las meteorológicas.

En caso de presentarse cambio de pendiente es necesario reestablecer la homogeneidad bajo las condiciones del tramo más confiable, generalmente es el primero, o sea el correspondiente al último período y realizar el ajuste con base en la relación de las pendientes de los dos segmentos de la curva de dobles masas. La relación proporciona una constante  $K$ , que multiplicada por los valores inconsistentes de la estación analizada  $X$ , permite el ajuste de la serie.

## **2.2. EROSIÓN**

### **2.2.1. Tipos de erosión**

La erosión es el arrastre de partículas de suelo por variables como la acción del agua y el viento. Es un proceso natural, es decir que sucede de manera normal en el transcurso del tiempo. Sin embargo, las acciones del hombre hacen que este proceso suceda en un tiempo más corto de lo normal rompiendo un equilibrio en la formación de los suelos.

Los tipos de erosión se dividen en dos; los de origen natural y los antrópicos<sup>2</sup>. Como factores que interviene en la erosión natural están el clima, el relieve, la vegetación y las clases de suelos entre otros. Como factores que intervienen en la erosión antrópica se encuentran el uso y manejo de los suelos, la tenencia de la tierra, educación y la falta de consultas técnicas entre otras.

La erosión hídrica se debe en principio al impacto de las gotas de lluvia sobre suelo poco o nada cubierto, lo cual hace que la percolación se retarde causando escorrentía. El agua al

---

<sup>2</sup> Originado por actividad humana

correr sobre el relieve del suelo transporta consigo partículas de suelo causando mazamorras, deslizamientos, erosión etc. (Marcano, 2009: 310-311)

### **2.2.2. Pérdida de suelo**

La pérdida de suelo es el resultado del arrastre de las partículas de suelo, esto sucede cuando la lluvia golpea directamente en el suelo en vez de gotear gradualmente por la cobertura vegetal o materia orgánica. De esta manera el suelo se transporta con mayor rapidez que la normal acumulando energía con la distancia de acuerdo a la pendiente y llevando aún mayor cantidad de suelo. (Marcano, 2009: 311)

### **2.2.3. Efectos de la erosión en la agricultura**

El principal efecto directo que presenta la erosión de los suelos es la pérdida de las características de los mismos haciendo que estos pierdan su fertilidad, estructura, textura, etc.

De acuerdo con la FAO en 1995 en el mundo se afectan entre 5 y 7 millones de hectáreas cultivables degradando los suelos y haciendo de estos poco o nada productivos. Por otro lado, el transporte de sedimentos generado por la erosión contamina ríos y lagos afectando la producción de especies acuáticas.

## **2.3. MODELO USLE**

El modelo USLE o ecuación universal de la pérdida de suelo es un modelo cuantitativo empírico que ayuda a calcular o predecir el estado actual de los suelos calculando la pérdida que estos tienen en un tiempo, espacio y características específicas dadas. Toma como datos de ingreso varios factores que intervienen en los procesos de erosión como la erosividad, erodabilidad, las características de relieve, el uso del suelo y las prácticas de conservación que mediante algoritmos estiman la pérdida de suelo en toneladas por año (Tn/ha/año).

$$A=R*K*L*S*C*P$$

Donde:

A = Pérdida de suelo por año (Tn/ha/año).

R = Índice de erosividad de la lluvia (MJ\*mm/ha\*h).

K = Factor de erodabilidad del suelo (Tn\*h/MJ\*mm).

$L*S$  = Factor topográfico (adimensional).

$C$  = Factor de cubierta (adimensional).

$P$  = Factor de prácticas de conservación (adimensional).

Este modelo es bastante usado en la actualidad por su fácil aplicabilidad y resultados puntuales que pueden ser llevados a cálculos con herramientas S.I.G. para la estimación de gran cantidad de eventos de riesgo y fenómenos naturales.

Sin embargo, como la escala con la que se maneja el modelo USLE es muy pequeña y el llevarlo a aplicaciones reales es algo difícil, los resultados son estimados y no así exactos. (Geler, 2004:100)

### 2.3.1. Erosividad (R)

R: Factor de lluvia y escurrimiento, número de unidades de índice de erosión pluvial (EI), que para una tormenta determinada es producto de su energía total (E) y su máxima intensidad en 30 minutos (I30). (Wischmeier y Smith, 1965)

Este factor depende de la intensidad de lluvia y de la lluvia total. Cuando llueve, gotas de hasta 6 mm de diámetro bombardean la superficie del suelo a velocidades de hasta 32 km/h. El impacto de la gota en el suelo lanza partículas y agua en todas direcciones a una distancia de hasta un metro. En nuestro caso hemos derivado una ecuación propia ajustando los datos obtenidos para calcular el Índice Modificado de Fournier *MFI* según Arnoldus en 1980. Por tanto, el factor R se obtiene al aplicar la siguiente ecuación.

$$R = 95,77 - 6,081MFI + 0,4770MFI^2$$

$$R = 0,07397 * MFI^2$$

$$R = 0,66 * MFI - 3$$

$$MFI = \sum_1^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

Donde:

$P_i$  = Precipitaciones mensuales el año “i” (mm)

P = Precipitación total anual del año en estudio (mm).

MFI = Índice de Fournier Modificado

Cabe recalcar que existe muchas otras ecuaciones para el cálculo en función del MFI, pero esas tres fueron usadas en Centro América al igual que en Uruguay en el programa que ellos manejan de Erosión 6.0. (Pérez Bidegain, Piaggio, Baethge y García Préchac, 2017)

### 2.3.2. Erodabilidad (K)

La erodabilidad, erosionabilidad o vulnerabilidad del suelo a la erosión, es una característica propia del suelo ligada a su granulometría, porosidad, condiciones hidrológicas, etc., y distinta a la erosión del suelo, proceso resultante de esta erosionabilidad, expuesta a unas determinadas condiciones de clima, relieve y cobertura vegetal. (Wischmeier & Smith, 1965)

#### Fórmula de Williams

$$K=0,1317 * f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand}$$

$$f_{csand} = \left( 0,2 + 0,3 e^{\left( -0,0256 m_s \left( 1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right)} \right)$$

$$f_{cl-si} = \left[ \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right]^{0,3}$$

$$f_{org} = \left[ 1 - \frac{0,25 \text{ org C}}{\text{org C} + e^{[3,72 - 2,95 \text{ org C}]}} \right]$$

$$f_{hisand} = \left[ 1 - \frac{0,70 \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + e^{[-5,51 + 22,9 \left( 1 + \frac{m_s}{100} \right)]}} \right]$$

Donde:

$f_{csand}$  = Contenido de arena

$f_{cl-si}$  = Contenido de limo - arcillo

$f_{org}$  = Contenido de carbono orgánico

$f_{hisand}$  = Parámetro relacionado con la arena

$m_s$  = Contenido de arena (%)

$m_{\text{silt}}$  = Contenido de limo (%)

$m_c$  = Contenido de arcilla (%)

orgC = Contenido de carbono orgánico (%)

### 2.3.3. Factor topográfico (LS)

L: factor de longitud de pendiente, proporción de pérdida de suelos en longitud de pendiente específica con respecto a una longitud de pendiente estándar, de 22,13 m.

S: factor de inclinación de pendiente, proporción de pérdida de suelos de una superficie con una pendiente específica con respecto a una pendiente estándar de 9 por ciento.

L, S: longitud e inclinación de pendiente.

Pérdidas de suelo se incrementan conforme la longitud crece y con la inclinación de la pendiente; dependen de la tasa de erosión laminar o por surcos.

Este factor responde al efecto combinado de la longitud y el ángulo de inclinación de la pendiente, cuyos efectos son imposibles de individualizar. Su valor sirve para estimar las pérdidas de suelo que se producen en un terreno en pendiente. En el área de estudio, la pendiente no es uniforme porque el terreno se divide en terrazas (canteros), por lo cual se realizó el cálculo del factor LS siguiendo los procedimientos indicados por Foster en 1977, Desmet junto con Govers en 1996 y Velásquez en el 2008, aplicando las siguientes ecuaciones:

Factor L

Según Foster en 1977:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22,13} \right)^m$$

$$m = \frac{F}{1+F}$$

$$F = \frac{\sin \beta / 0,0896}{3(\sin \beta)^{0,8} + 0,56}$$

Con los SIG., de Desmet y Govers en 1996 y Velásquez en el 2008.

$$L_{(i,j)} = \frac{[A(i,j)+D^2]^{(m+1)} - A(i,j)^{m+1}}{x^m D^{m+2} (22,13)^m}$$

Donde:

B = Pendiente a nivel de pixel (debe estar expresada en radianes, a grados multiplicar por 0,01745)

A = Acumulación del flujo a nivel del pixel.

D = Lado del Pixel

X = coeficiente de forma (x= 1 para sistemas pixelados)

Factor S

McCOOLS

Cuando  $\tan \beta_{(i,j)} < 0,09$

$$S_{(i,j)} = 10,8 \sin \beta_{(i,j)} + 0,03$$

Cuando  $\tan \beta_{(i,j)} \geq 0,09$

$$S_{(i,j)} = 10, \sin \beta_{(i,j)} + 0,03$$

#### **2.3.4. Factor de cubierta (C)**

Es la capa superior de sus hojas que impide que una considerable cantidad de lluvia alcance el suelo.

Este factor es muy complejo ya que al igual que el de las lluvias varía en cada año y la vegetación también lo hace y por tanto deben buscarse imágenes satelitales que ayuden a la identificación de la vegetación que se presentó en los diferentes años.

El índice de vegetación de diferencia normalizada, también conocido como NDVI, por sus siglas en inglés, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. (Verdín, 2003)

### 2.3.5. Práctica conservacionista, Factor (P)

Este último factor de la USLE recoge la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión de una parcela, realizando los trabajos culturales o disponiendo la vegetación siguiendo curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar las líneas de escorrentía.

Las estrategias para el control de la erosión utilizan técnicas de conservación de suelos con las que se pretende mantener las pérdidas de suelo por debajo del umbral que, teóricamente, debe permitir a la velocidad natural de formación del suelo compensar las pérdidas por erosión. La erosión es un proceso natural, no puede evitarse totalmente, pero puede reducirse a un valor máximo aceptable o pérdida tolerable de suelo. (Morgan R. , 1990)

### 2.3.6. Niveles de erosión de suelos según USLE

Según el modelo de USLE, los niveles de pérdida de suelo considerados van desde erosión baja hasta erosión crítica. (Wischmeier & Smith, 1965)

Tabla 2.1 Clasificación de la erosión

Niveles de erosión, USLE	Valores de erosión
Erosión baja	$E < 5 \text{ Tn/ha/año}$
Erosión moderada	$E = 5-25 \text{ Tn/ha/año}$
Erosión media	$E = 25-50 \text{ Tn/ha/año}$
Erosión alta	$E = 50-100 \text{ Tn/ha/año}$
Erosión muy alta	$E = 100-200 \text{ Tn/ha/año}$
Erosión crítica	$E > 200 \text{ Tn/ha/año}$

Fuente: Wischmeier y Smith 1965

## 2.4. TELEDETECCIÓN

Teledetección también llamada Percepción Remota se define como la tecnología de observación terrestre desde el espacio, utilizando las propiedades de las ondas

electromagnéticas emitidas, reflejadas o difractadas por los objetos, de acuerdo a la composición física y química que poseen estos. Son utilizados para fines de mejoramiento de gestión de los recursos naturales y la ordenación del territorio. Que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales.

#### 2.4.1. Elementos básicos teledetección

La adquisición de información a distancia implica la existencia de un flujo de información entre el objeto observado y el captador. Todos los cuerpos (Planetas, seres vivos, objetos inanimados) emiten radiación electromagnética; la cantidad y tipo de esta radiación emitida depende fundamentalmente de su temperatura.

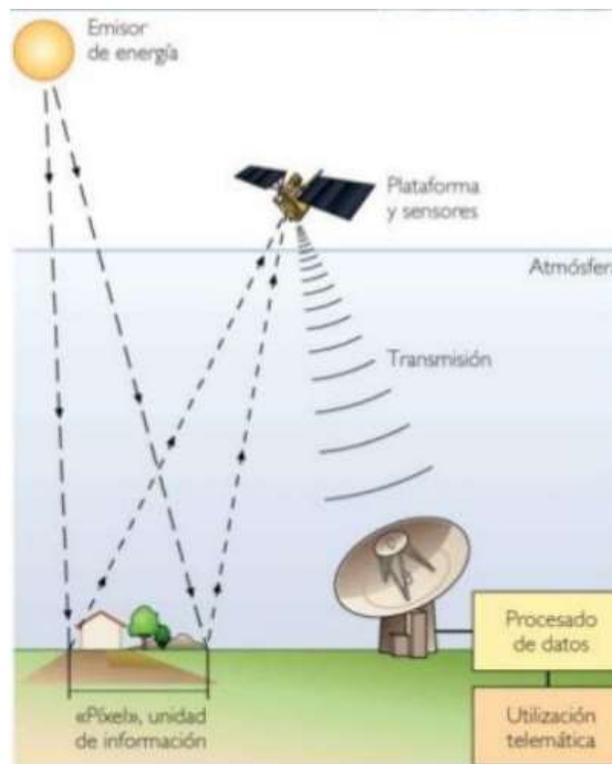


Figura 2.1 Elementos de Teledetección

Fuente: Bravo Morales 2019

#### 2.4.2. Energía electromagnética

También llamado energía radiante es una entidad física que se manifiesta bajo dos aspectos entre sí el ondulatorio y el corpuscular. La concepción ondulatoria que permite explicar ciertos fenómenos como la difracción en interferencia interpreta la radiación

electromagnética como un campo eléctrico y uno magnético oscilando en planos perpendiculares.

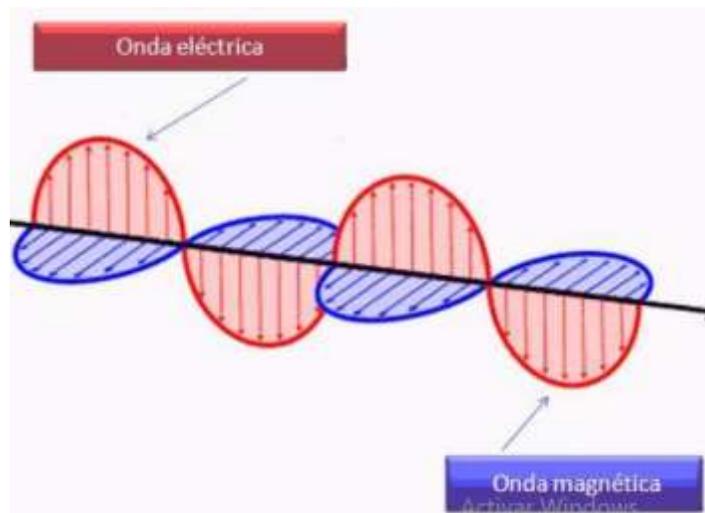


Figura 2.2 Representación de la energía electromagnética

Fuente: Bravo Morales 2019

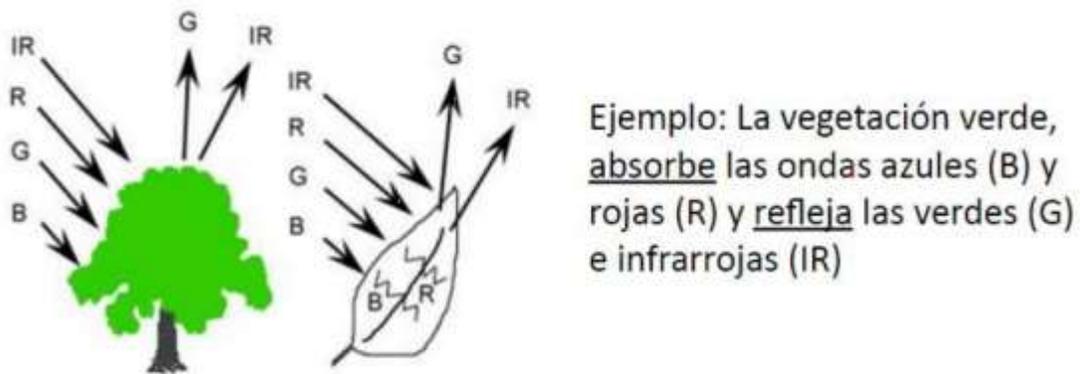


Figura 2.3 Ejemplo de energía electromagnética

Fuente: Bravo Morales 2019

## 2.5. TIPOS DE RESOLUCIÓN

### 2.5.1. Resolución espacial

Se determina mediante el campo de visión instantáneo (CVI) es la distancia que corresponde a la unidad mínima de información incluida en la imagen (píxel). Así, a menor tamaño del píxel mayor será la resolución espacial, lo que implica que el sensor obtendrá más detalle de los objetos.

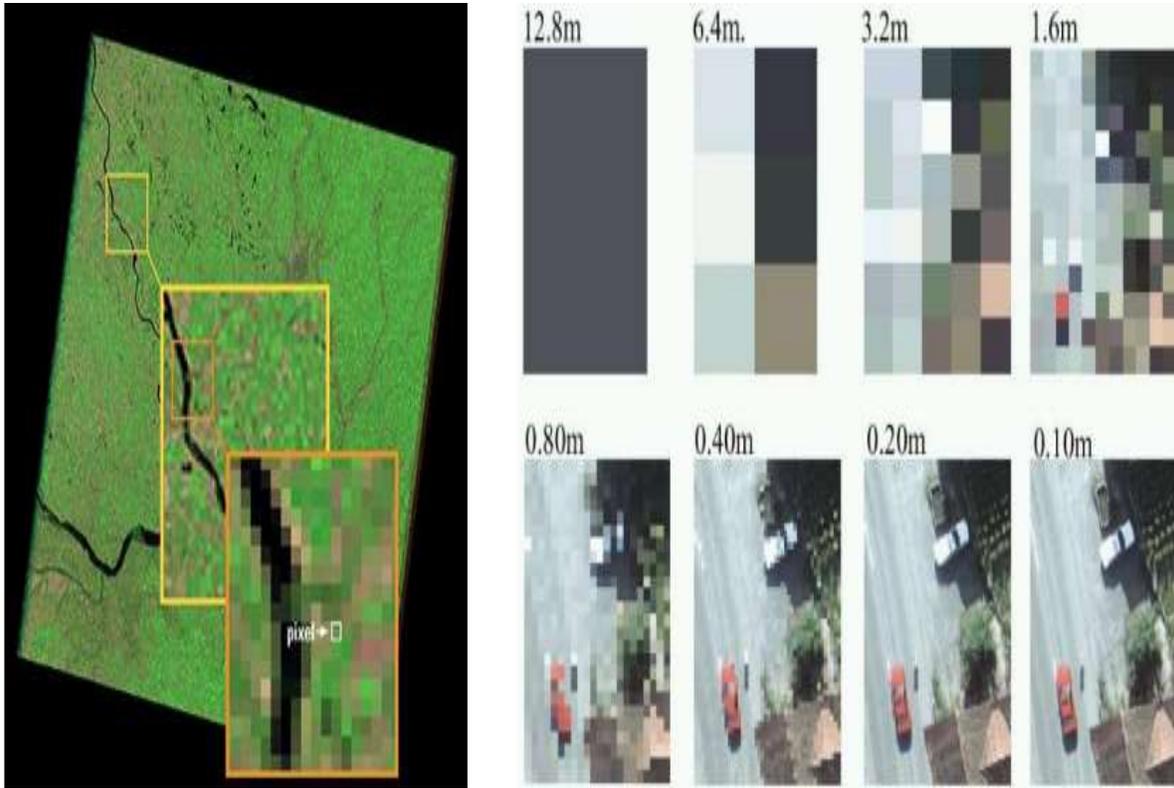


Figura 2.4 Resolución espacial

Fuente: Bravo Morales 2019

### 2.5.2. Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Entre mayor sea esta resolución se tendrá información del comportamiento de una misma cobertura en diferentes bandas espectrales.

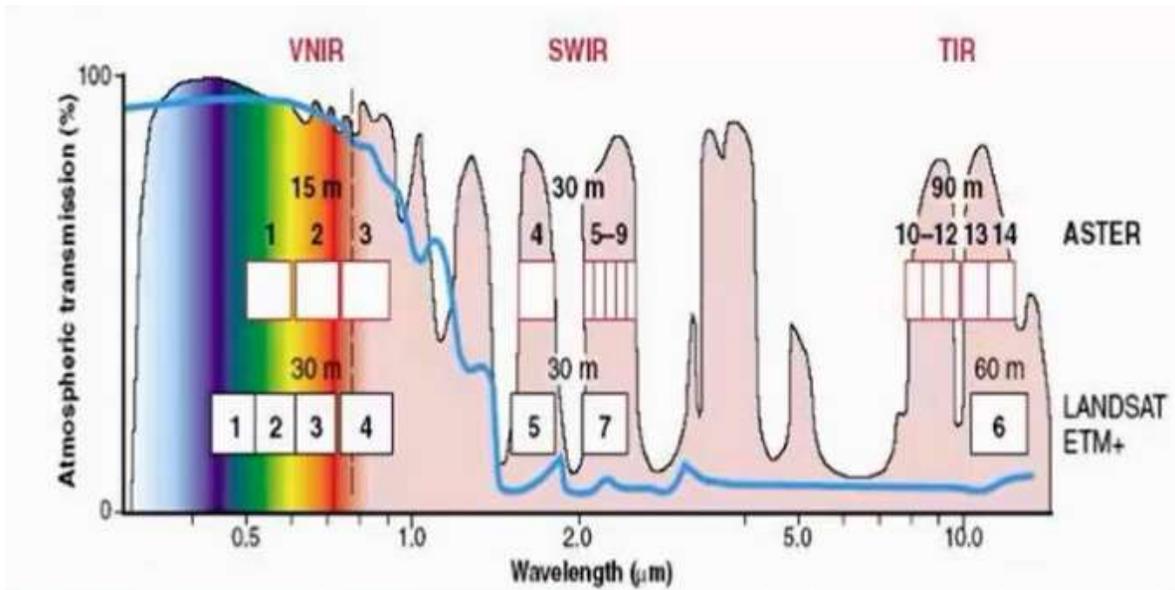
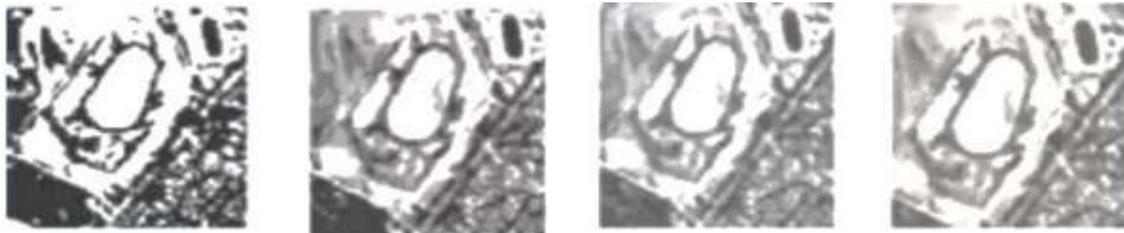


Figura 2.5 Resolución espectral

Fuente: Bravo Morales 2019

### 2.5.3. Resolución radiométrica

Indica la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia. La energía electromagnética recibida por el sensor, cuando se convierte a número digital, necesita un formato binario (número de bits) para codificarse.



1bit

2 bit

3 bit

8 bit

$$2^{(\text{número de bits})} = \text{Niveles de Gris}$$

Figura 2.6 Resolución radiométrica

Fuente: Bravo Morales 2019

Tabla 2.2 Rangos que abarcan los niveles de gris

bits	niveles de gris	rango	
1	2	0	1
2	4	0	3
3	8	0	7
4	16	0	15
5	32	0	31
6	64	0	63
7	128	0	127
8	256	0	255
9	512	0	511
10	1024	0	1023
11	2048	0	2047
12	4096	0	4095
13	8192	0	8191
14	16384	0	16383
15	32768	0	32767
16	65536	0	65535

Fuente: Bravo Morales 2019

#### 2.5.4. Resolución temporal

Se refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor.

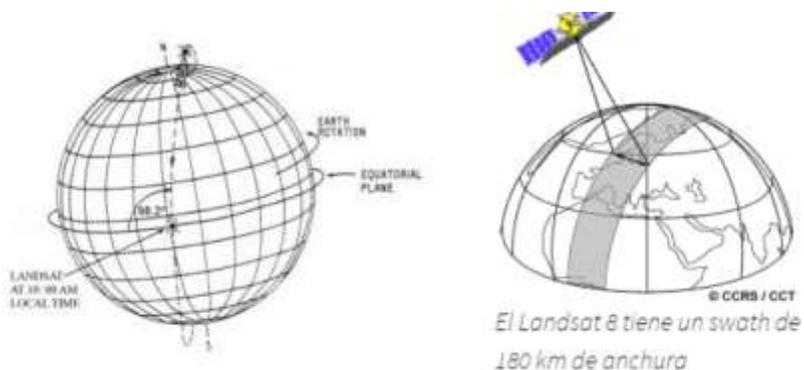


Figura 2.7 Resolución temporal

Fuete: Bravo Morales 2019

## 2.6. INTRODUCCIÓN LANDSAT

### 2.6.1. Antecedentes LandSat

LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite) fue el primer satélite enviado por los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. Inicialmente se le llamó ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) y posteriormente los restantes recibieron el nombre de LANDSAT. La constelación LANDSAT está formada por 8 satélites que provenían, tanto conceptual como estructuralmente, de los satélites para fines meteorológicos Nimbus. Llevaron a bordo diferentes instrumentos, siempre con la filosofía de captar mayor información de la superficie terrestre, con mayor precisión y a mayor detalle, de ahí sus mejoras radiométricas, geométricas y espaciales.

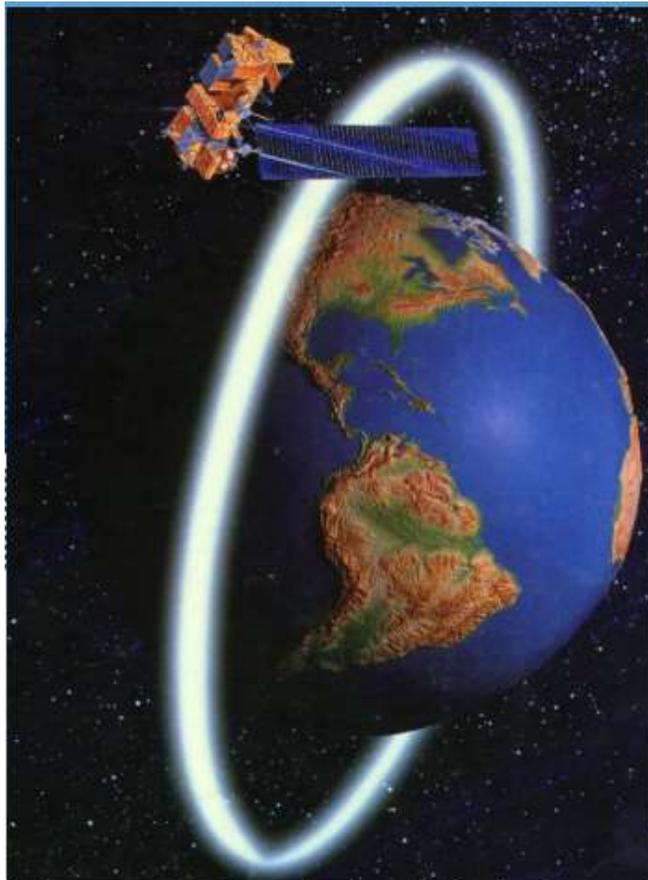


Figura 2.8 LandSat orbitando la tierra

Fuente: Bravo Morales 2019

### **2.6.2. Generalidades LandSat**

Actualmente sólo se encuentran activos el LANDSAT 5, 7 y 8, que son administrados por la NASA (National Space and Space Administration), en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las imágenes LANDSAT 5 y 7 están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, y el LANDSAT 8 está compuesta por 11 bandas espectrales, que fueron elegidas especialmente para el monitoreo de la vegetación, para aplicaciones geológicas y para el estudio de los recursos naturales. Estas bandas pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones.

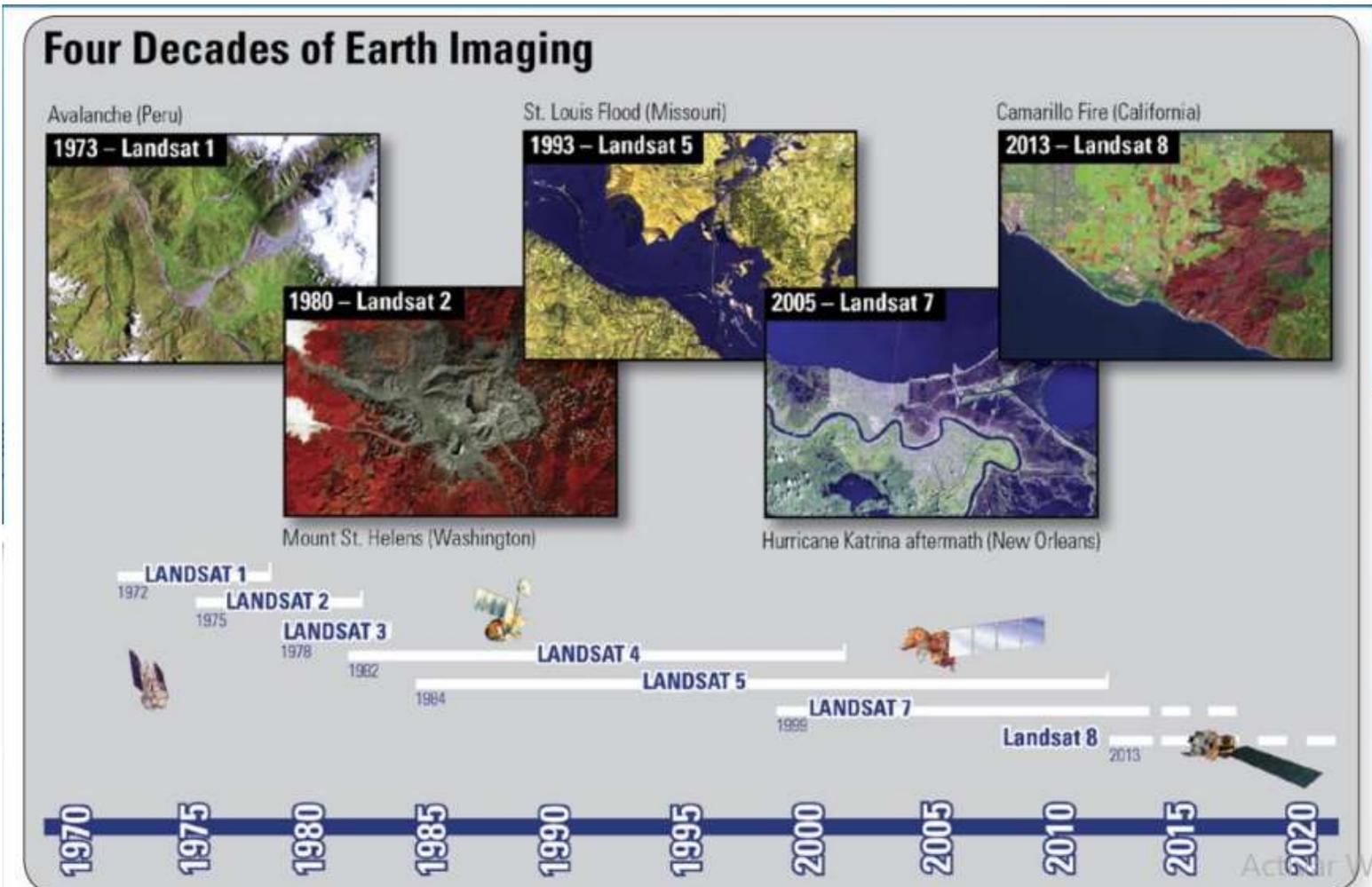


Figura 2.9 Satélites lanzados desde 1970 a la fecha

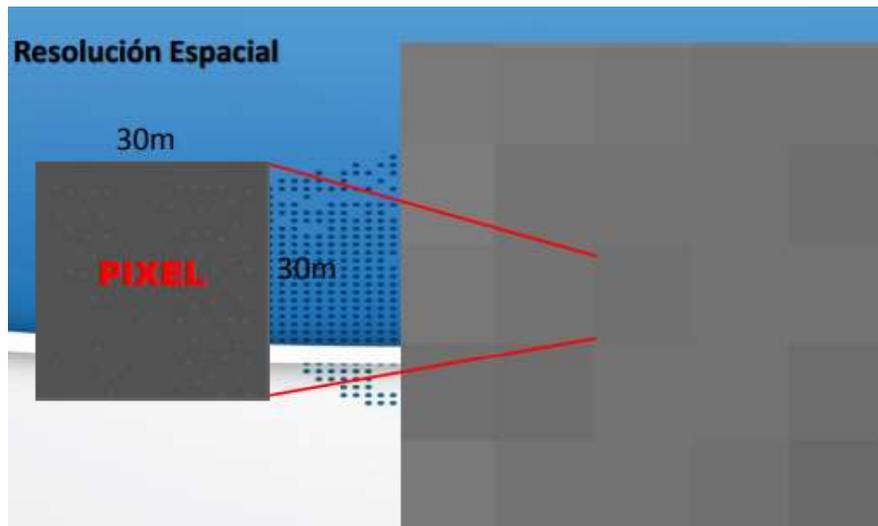
Fuente: Bravo Morales 2019

<b>SATELITE</b>	<b>LANZAMIENTO</b>	<b>DESARMADO</b>	<b>SENSOR</b>
ERTS1 – LANDSAT 1	23 de Julio, 1972	05 de Enero, 1978	MSS/RBV
LANDSAT 2	22 de Enero, 1975	27 de Julio, 1983	MSS/RBV
LANDSAT 3	5 de Marzo, 1978	07 de Setiembre, 1993	MSS/RBV
LANDSAT 4	16 de Junio, 1982	15 de Junio, 2001	MSS/TM
LANDSAT 5	01 de Marzo, 1984	2013	MSS/TM
LANDSAT 6	03 de Octubre, 1993	no alcanzó la órbita	ETM
LANDSAT 7	15 de mayo, 1999	OPERACIÓN	ETM+
LANDSAT 8	11 de febrero, 2013	OPERACIÓN	OLI/TIRS

Figura 2.10 Satélites activados y desarmados

Fuente: Bravo Morales 2019

### 2.6.3. Tipo de resolución – Espacial



BANDAS ESPECTRALES	RESOLUCION ESPACIAL (Metros)
BANDA 1 - Blue	30
BANDA 2 - Green	
BANDA 3 - Red	
BANDA 4 - Reflected IR	
BANDA 5 - Reflected IR	
BANDA 7 - Reflected IR	15
BANDA 8 - Panchromatic (LandSat 7)	
<b>BANDA 6 – Thermal</b>	<b>120</b>

Figura 2.11 Resolución espacial

Fuente: Bravo Morales 2019

### 2.6.4. Tipo de resolución - Radiométrica

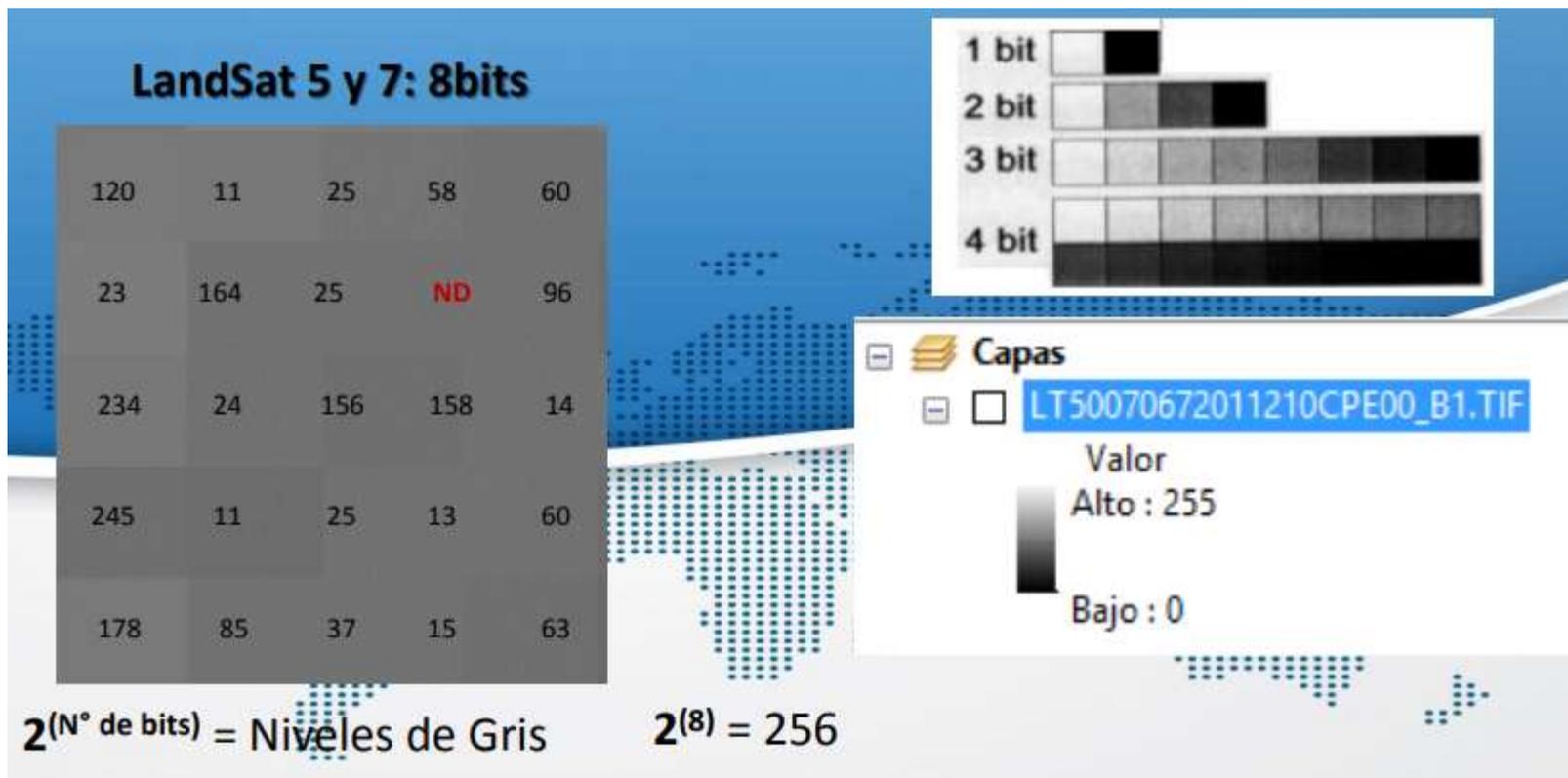
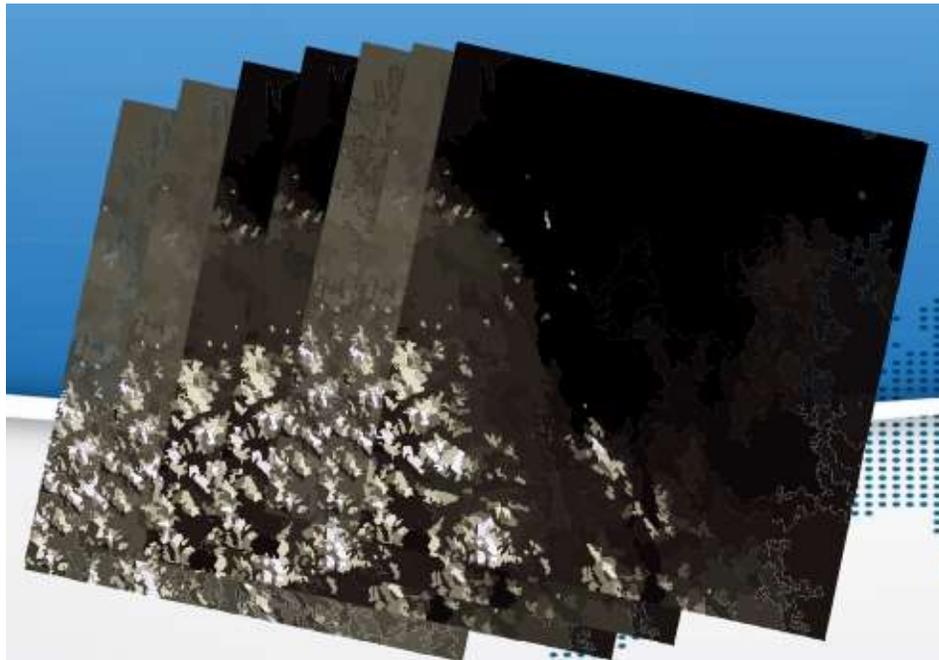


Figura 2.12 Niveles de grises

Fuente: Bravo Morales 2019

### 2.6.5. Tipo de resolución – Espectral



BANDAS ESPECTRALES	LONGITUD DE ONDA (Micrómetros)
BANDA 1 - Coastal/aerosol	0,43 - 0,45
BANDA 2 - Blue	0,45 - 0,51
BANDA 3 - Green	0,53 - 0,59
BANDA 4 - Red	0,64 - 0,67
BANDA 5 - Near IR	0,85 - 0,88
BANDA 6 - SWIR 1	1,57 - 1,65
BANDA 7 - SWIR 1	2,11 - 2,29
BANDA 8 - Panchromatic	0,50 - 0,68
BANDA 9 - Cirrus	1,36 - 1,38
BANDA 10 - TIRS 1	10,60 - 11,19
BANDA 11 - TIRS 2	11,50 - 12,51

Figura 2.13 Resolución espectral

Fuente: Bravo Morales 2019

### 2.6.6. Tipo de resolución – Temporal

Periodicidad con que el sensor capta la información de un mismo objeto. Depende de las características orbitales del satélite (altura, velocidad e inclinación).

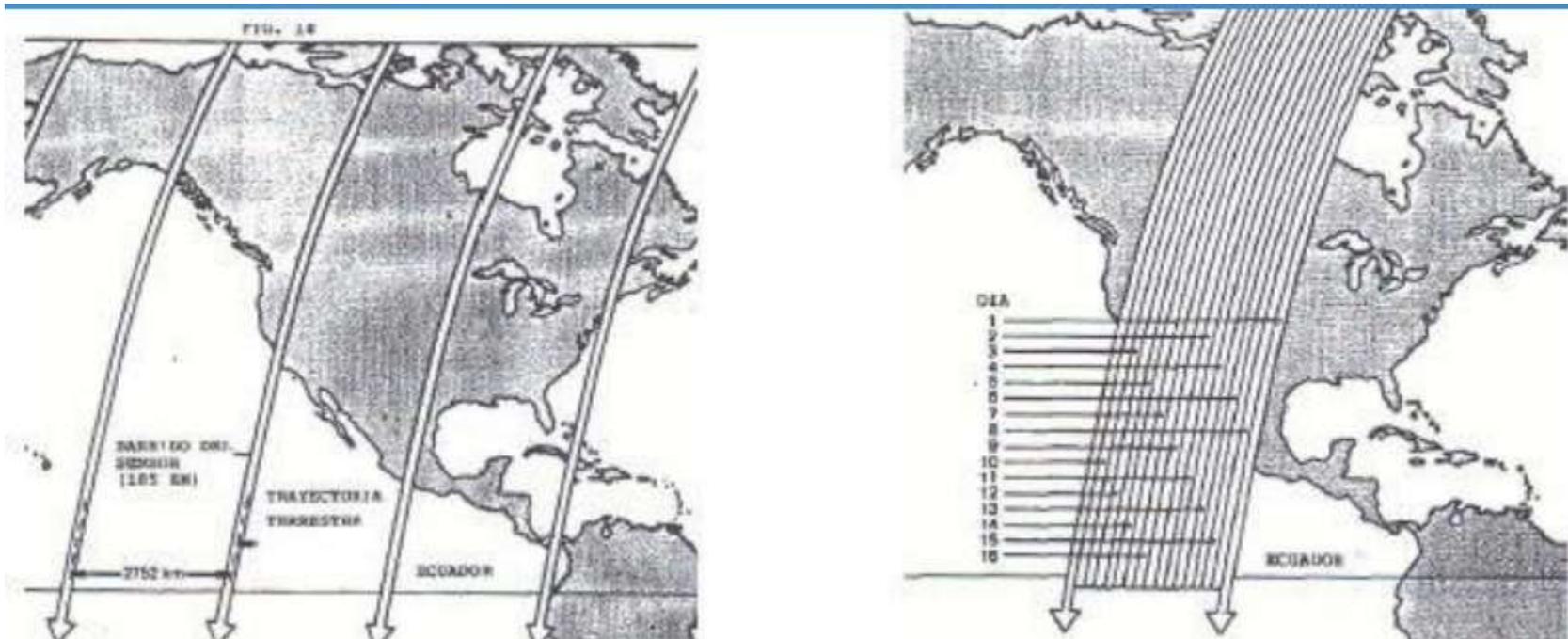


Figura 2.14 Resolución temporal

Fuente: Bravo Morales 2019

## 2.7. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE SUPERFICIE

### 2.7.1. ND a Radiancia

Desde sus inicios, las imágenes de satélite Landsat fueron distribuidas como números digitales (ND), es decir, valores enteros entre 0-255. Esta corrección fue originalmente necesaria para hacer posible almacenarlas y distribuirlas más eficientemente. Conversión de ND a Radiancia, conocido también como calibración radiométrica. Es importante ya que productos como los Índices de Vegetación se encuentran calculados para la Reflectancia sobre la superficie. Cada sensor tiene un conjunto particular de ecuaciones para la transformación en radiancia y Reflectancia.

#### 1.1.1.1 Método de escalamiento de la radiancia espectral

$$L_{\lambda} = \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Qcalmax - Qcalmin} \right) (Qcal - Qcalmin) + LMIN_{\lambda}$$

Tabla 2.3 Variables de la ecuación de ND a radiancia

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
$L_{\lambda}$	Radiancia espectral de entrada en el sensor	Watts/(m <sup>2</sup> *srad*μm)
Qcal	valores de píxel de productos estándar cuantificadas y calibrados	DN
$LMIN_{\lambda}$	Radiancia espectral correspondiente a Qcalmin	Watts/(m <sup>2</sup> *srad*μm)
$LMAX_{\lambda}$	Radiancia espectral correspondiente a Qcalmax	Watts/(m <sup>2</sup> *srad*μm)
QCALmin	Valor máximo del píxel, en este caso 1	DN
QCALmax	Valor mínimo del píxel, en este caso 255	DN

Fuente: Bravo Morales 2019

## 2.7.2. Conversión de radiancia a reflectancia

### 2.7.2.1. Cálculo de la reflectancia con corrección atmosférica el por método de sustracción de superficie oscuras (DOS1) para satélites ASTER L1T, Sentinel2, Landsat 4, 5, 7 y 8

El cálculo del valor de la reflectancia en superficie implica introducir algún tipo de corrección sobre el efecto que imprime la atmósfera sobre la señal recibida por el sensor. (Administración de Parques Nacionales y Sistemas, 2005)

Para el cálculo la reflectividad de la superficie necesitamos estimar la transmisividad de la atmósfera (descendente  $T_v$  y ascendente  $T_z$ ), la irradiancia difusa ( $E_{down}$ ) y la radiancia atmosférica debida a la dispersión ( $L_p$ ).

La reflectancia de la superficie ( $p_s$ ), tal como lo describe (Moran & Jackson, 1992):

$$p_s = \frac{\pi * (L_\lambda - L_p) * d^2}{T_v * [(ESUN_\lambda * SEN_{(\theta SE)} * T_z) + E_{down}]}$$

Donde:

$L_p$ : Es el efecto bruma, en inglés Path radiance

$L_\lambda$ : Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).

$d$ : Distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresada en Unidades Astronómicas (Calculado según una formula en función del día juliano).

$ESUN_\lambda$ : Irradiancia Media Solar exo-atmosférica.

$E_{down}$ : Es la irradiancia difusa descendiente, se considera igual a cero.

$T_v$ : Es la transmitancia de la atmosfera en la dirección de visión.

$T_z$ : Es la transmitancia atmosférica en la dirección de iluminación.

$\theta SE$ : Ángulo local de elevación del sol. El ángulo de elevación del centro del escenario en grados se proporciona en los metadatos (SUN\_ELEVATION).

Tabla 2.4 Valores de irradiancia Media Sola Exo-atmosférica  $ESUN_{\lambda}$  Landsat

<b>Banda</b>	<b>Landsat 7 ETM+</b>	<b>Landsat 5 TM</b>	<b>Landsat 4 TM</b>	<b>Landsat 4 y 5 MSS</b>	<b>Landsat 1 - 3 MSS</b>
1	1970	1958	1958	1848	
2	1842	1827	1826	1588	
3	1547	1551	1554	1235	
4	1044	1036	1033	856,6	1848
5	255,7	214,9	214,7		1588
6					1235
7	82,06	80,65	80,7		856,6
8	1369				

Fuente: Bravo Morales 2019

Las transmisividades se calculan de la siguiente forma

Para determinar la transmisividad “ $T_v$ ” y “ $T_z$ ”, se va calcular con el espesor óptico para dispersión de Rayleigh propuesto por Kaufman en 1989.

$$\tau_r = 0,00856\lambda^{-4} (1 + 0,0113\lambda^{-2} + 0,00013\lambda^{-4})$$

$$T_v = \exp^{-\frac{\tau_r}{\cos(\theta_v)}}$$

$$T_z = \exp^{-\frac{\tau_r}{\sec(\theta_z)}}$$

Donde:

$\lambda$ : Valor promedio del rango espectral de la banda.

$\tau_r$ : Espesor óptico para dispersión de Rayleigh.

$\theta_z$ : Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a:  $90^\circ - \theta_{SE}$

$\theta_V$ : El ángulo de observación del sensor, entonces el ángulo es  $0^\circ$  y  $\text{COS}(0^\circ) = 1$

Tabla 2.5 Rango espectral de las bandas

Sensor	Banda	Rango espectral		$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
		Min	Max	
TM - ETM+	1	0,45	0,52	0,485
TM - ETM+	2	0,52	0,61	0,565
TM - ETM+	3	0,63	0,69	0,66
TM - ETM+	4	0,76	0,9	0,83
TM - ETM+	5	1,55	1,75	1,65
TM - ETM+	6	2,08	2,35	2,215
TM - ETM+	7	0,52	0,9	0,71
ETM+	8	0,43	0,45	0,44
OLI Y TIRS	1	0,45	0,51	0,48
OLI Y TIRS	2	0,53	0,59	0,56
OLI Y TIRS	3	0,64	0,67	0,655
OLI Y TIRS	4	0,85	0,88	0,865
OLI Y TIRS	5	1,57	1,65	1,61
OLI Y TIRS	6	2,11	2,29	2,2
OLI Y TIRS	7	0,5	0,68	0,59
OLI Y TIRS	8	1,36	1,38	1,37

Fuente: Bravo Morales 2019

Determinación del efecto bruma

$$L_p = L_{\min} - L_{\text{DO1\%}}$$

$$L_{\min} = ML * ND_{\min} + AL$$

$$L_p = 0,01 * \frac{ESUN_{\lambda} * SEN_{(\theta_{SE})}}{\pi * d^2}$$

$$L_p = ML * ND_{\min} + AL - 0,01 * \frac{ESUN_{\lambda} * SEN_{(\theta_{SE})}}{\pi * d^2}$$

Donde:

$L_{\min}$ : Radiancia que corresponde a un valor digital para el cual la suma de todos los píxeles con valores digitales menores o iguales a este valor es igual al 0,01 % de todos los píxeles de la imagen considerada, por lo tanto, la radiancia obtenida con ese valor de conteo digital ( $DN_{\min}$ ).

$L_{DO1\%}$ : Radiancia del objeto oscuro, con un valor asumido de reflectancia de 0,01

ML: Factor Multiplicativo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de banda)

AL: Factor Aditivo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de banda).

$ND_{min}$ : Valor digital mínimo.

Entonces la reflectancia de la superficie está dada por:

$$p_s = \frac{\pi * (L_\lambda - L_p) * d^2}{ESUN_\lambda * SEN_{(\theta SE)}}$$

Donde:

$L_p$ : Es el efecto bruma, en inglés Path radiance.

$L_\lambda$ : Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).

d: Distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresada en Unidades Astronómicas (Calculado según una formula en función del día juliano).

$ESUN_\lambda$ : Irradiancia Media Solar exo-atmosférica.

$\theta SE$ : Ángulo local de elevación del sol. El ángulo de elevación del centro del escenario en grados se proporciona en los metadatos (SUN\_ELEVATION).

## 2.8. ÍNDICE DE IMÁGENES SATELITALES

### 2.8.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - NDVI

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado, también conocido como NDVI según Rouse propuesto en 1974 por sus siglas en inglés. Es un índice usado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias del rojo y del infrarrojo cercano, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas. (Bravo Morales, 2019)

$$NDVI = \frac{(pS_{NIR} - pS_{RED})}{(pS_{NIR} + pS_{RED})}$$

Donde:

$\rho_{S_{NIR}}$ : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR (Banda 4 en LandSat 5,7 “ $\rho_{S_{B4}}$ ” y B5 para LandSat 8 “ $\rho_{S_{B5}}$ ”).

$\rho_{S_{RED}}$ : Reflectancia de la banda roja – RED (Banda 3 en LandSat 5,7 “ $\rho_{S_{B3}}$ ” y B4 para LandSat 8 “ $\rho_{S_{B4}}$ ”).

Por lo tanto, en los satélites

Para LandSat 5,7

$$NDVI = \frac{(\rho_{S_{B4}} - \rho_{S_{B3}})}{(\rho_{S_{B4}} + \rho_{S_{B3}})}$$

Para LandSat 8

$$NDVI = \frac{(\rho_{S_{B5}} - \rho_{S_{B4}})}{(\rho_{S_{B5}} + \rho_{S_{B4}})}$$

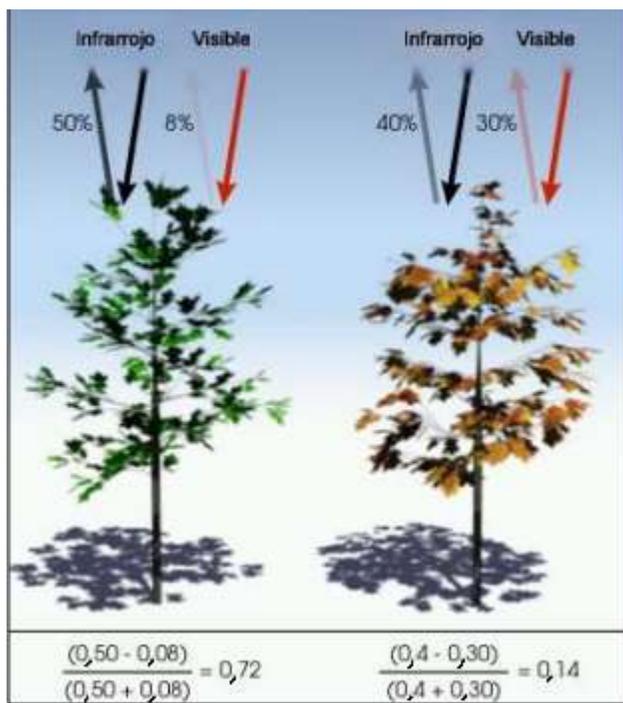


Figura 2.15 Característica de NDVI en una planta sana y enferma

Fuente: Bravo Morales 2019

Tabla 2.6 Ejemplo de cálculo y valor de NDVI

<b>Valor NDVI</b>	<b>Descripción</b>
< 0	El materia inanimado/muerto: carreteras, edificios, ríos, etc.
0 – 0,32	Material vegetativo no saludable
0,33 – 0,65	Material vegetativo sano
≥ 0,66	Material vegetal muy saludable

Fuente: Bravo Morales 2019

## **3. MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN A REALIZAR**

La presente investigación es experimental exploratorio por ser un tema muy poco estudiado donde varios datos se desconocen y se tendrán que obtener experimentalmente.

### **3.2. MATERIALES Y EQUIPOS**

Los materiales y equipos utilizados fueron:

- Computadora para el procesamiento de información.
- Programa Arc Map 10.5.
- Programa ENVI.
- Imágenes satelitales Landsat 7 y 8 de base datos USGS.
- NDVI a partir de imágenes satelitales Landsat 8 (TM 10) y Landsat 7 (TM7).
- Datos de precipitación de la zona de estudio de SENAMHI, SISMET.
- Mapas de suelos del ámbito de estudio de la FAO.
- Imágenes DEM (Digital Elevation Model) de la zona estudio.
- Levantamiento batimétrico y clasificación del suelo del embalse La Hondura realizado por la estudiante Carrazana Gallardo en el 2019.

### **3.3. MÉTODOS**

Los métodos fueron desarrollados bajo una secuencia de procedimientos y técnicas, con los contenidos y metodologías que a continuación se pasa a describir:

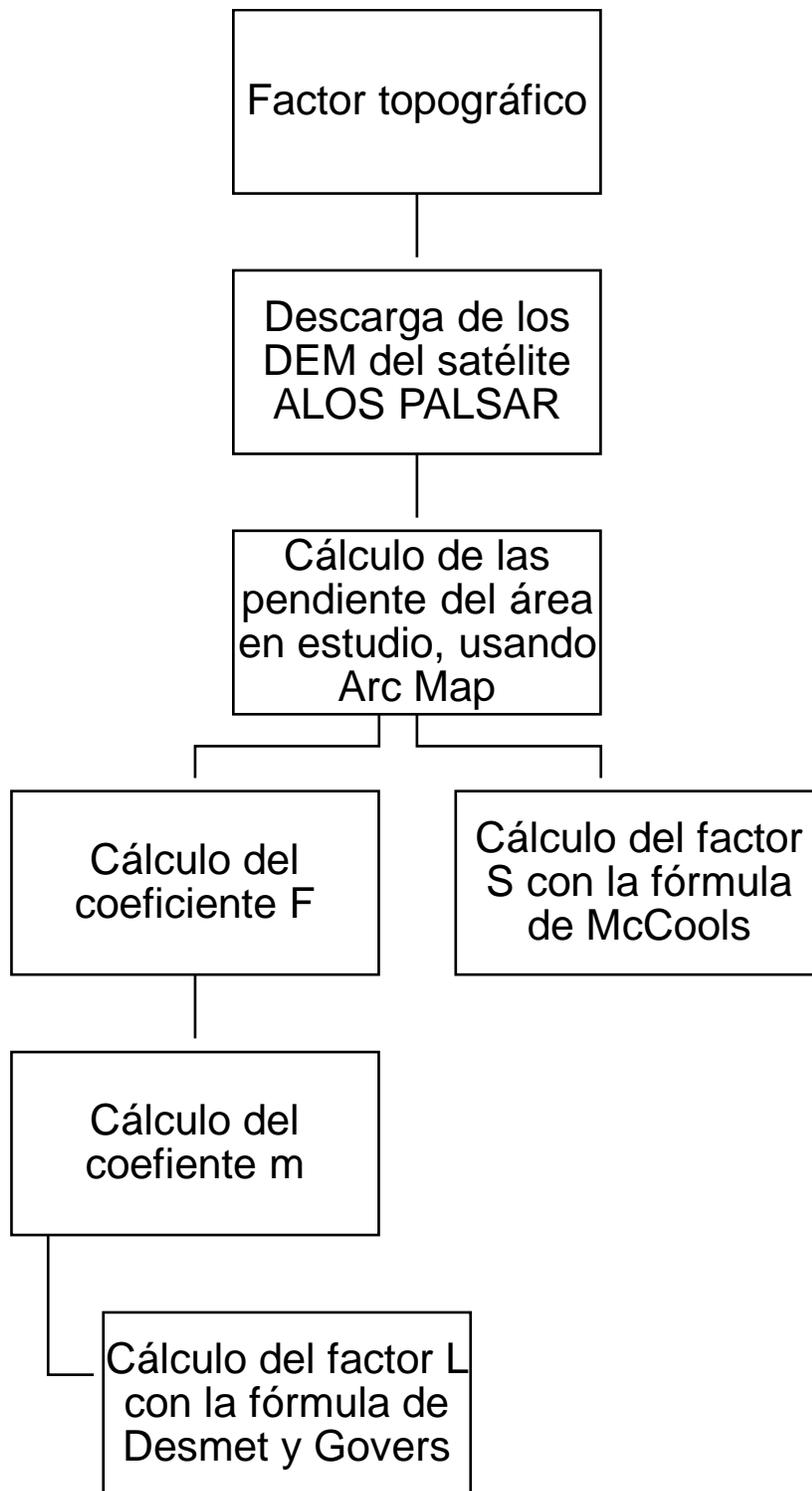


Figura 3.1 Procedimiento para obtener el factor LS

Fuente: Elaboración propia

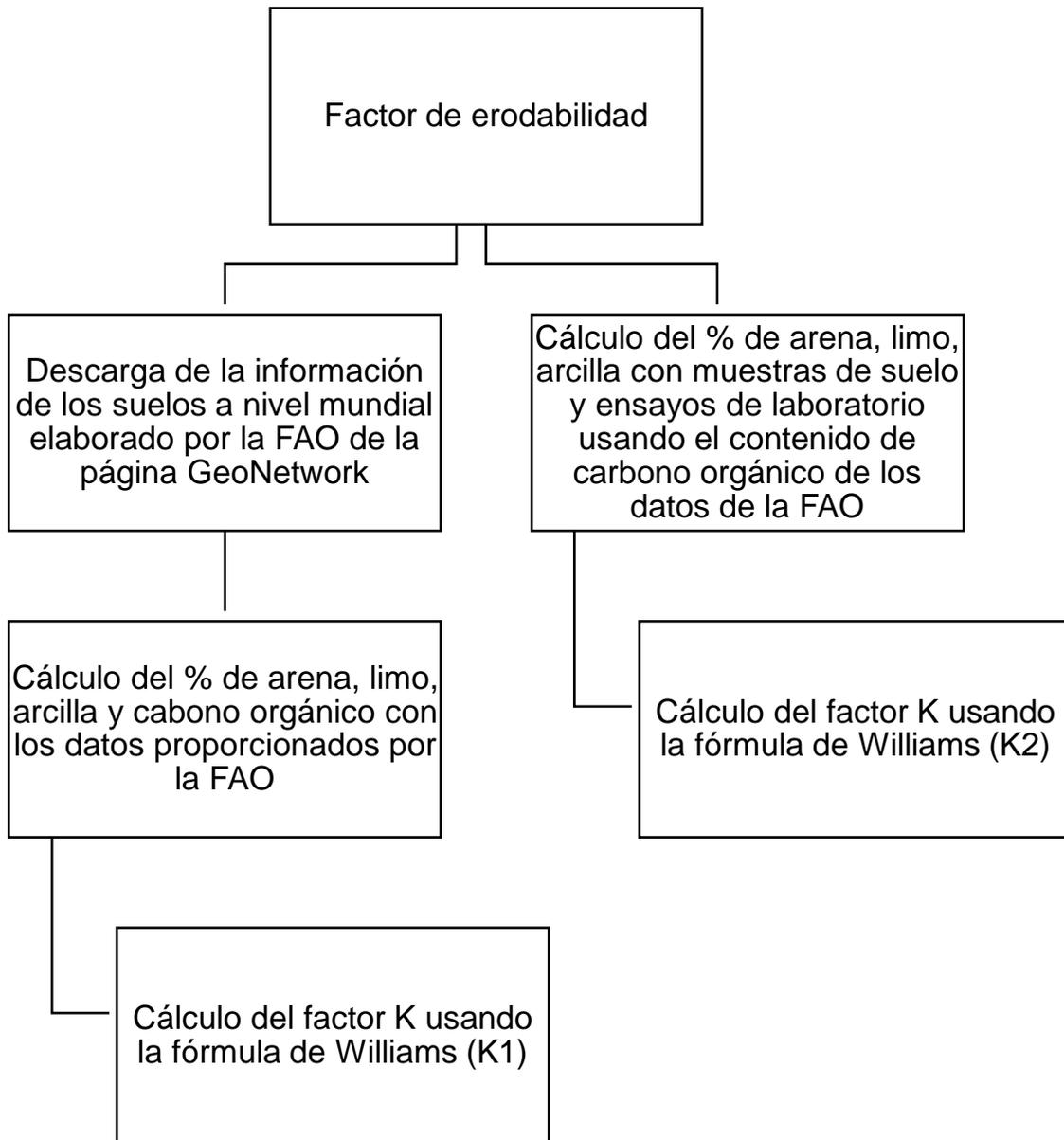


Figura 3.2 Procedimiento para obtener el factor K

Fuente: Elaboración propia

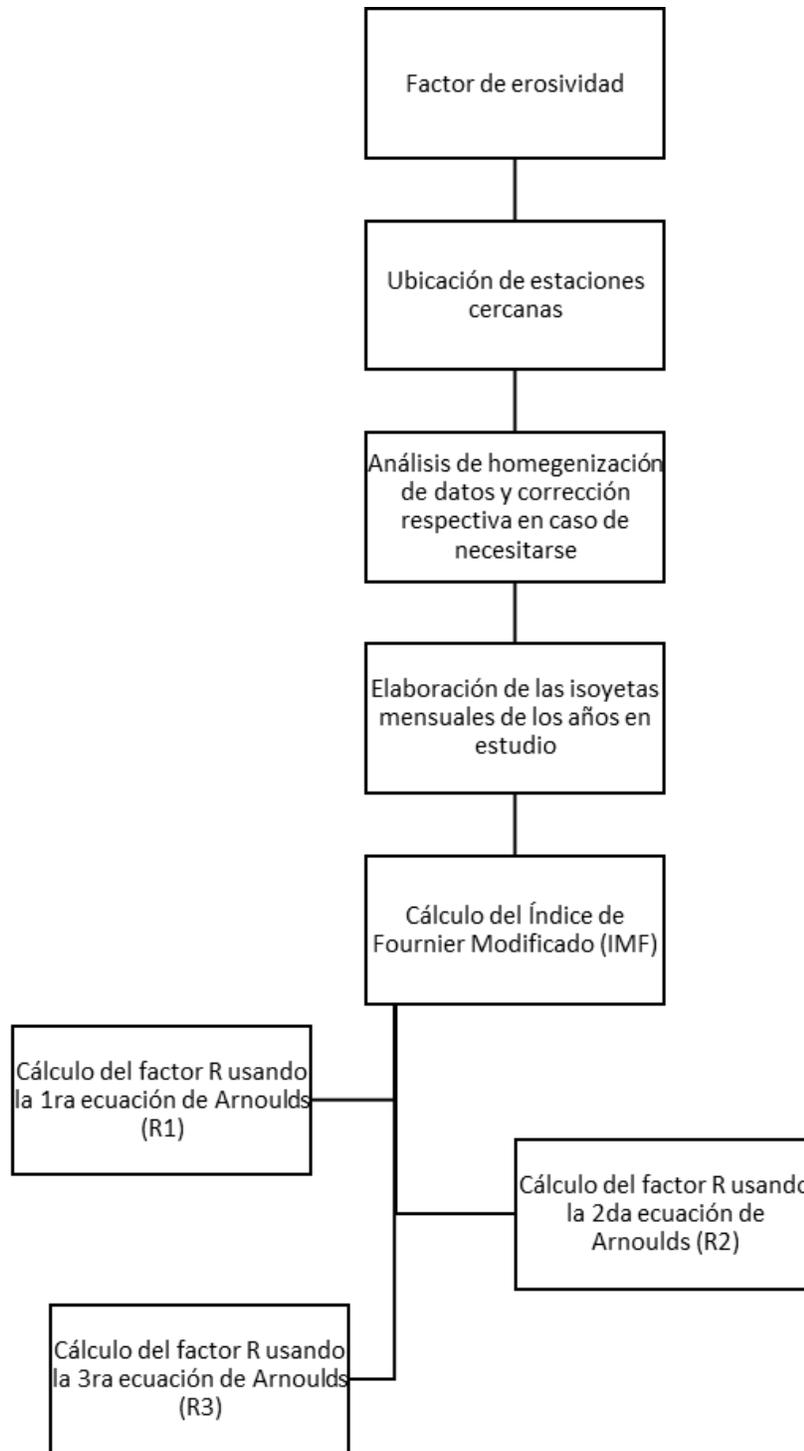


Figura 3.3 Procedimiento para obtener el factor R

Fuente: Elaboración propia

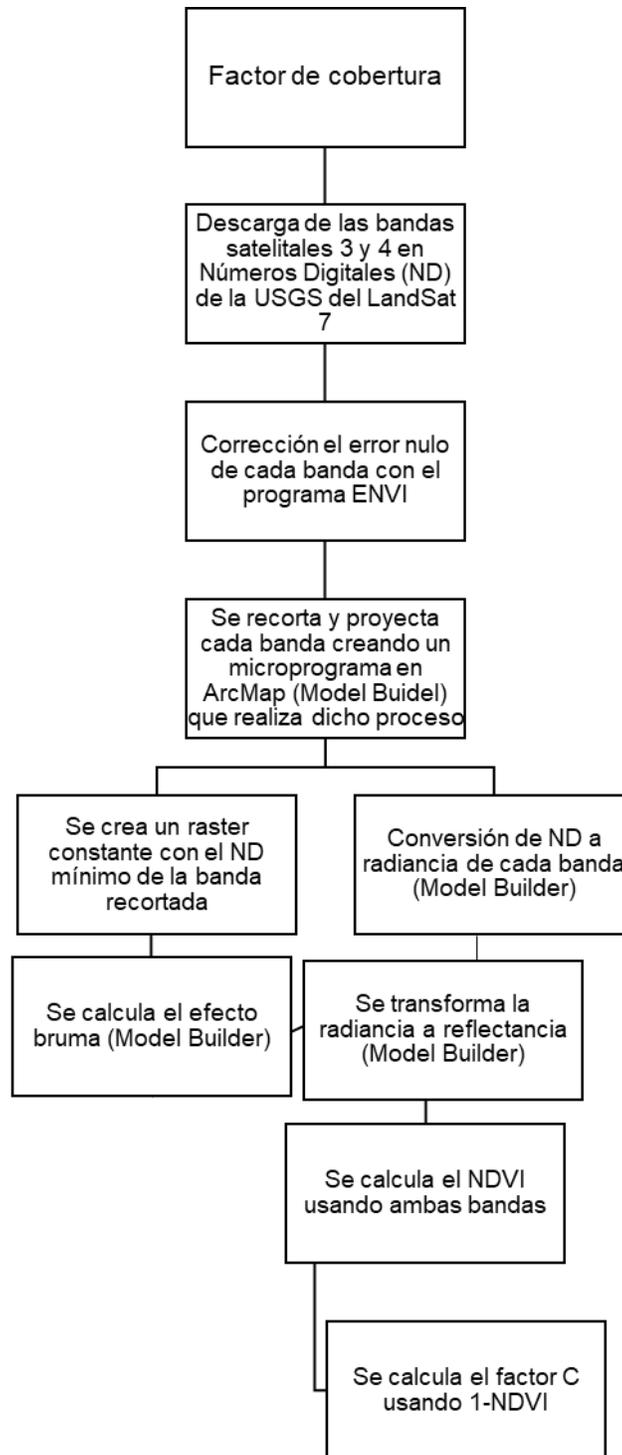


Figura 3.4 Procedimiento para obtener el factor C

Fuente: Elaboración propia

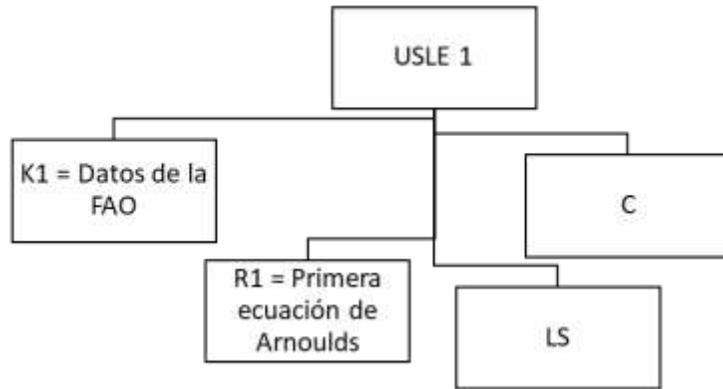


Figura 3.5 Factores usados en la primer combinación

Fuente: Elaboración propia

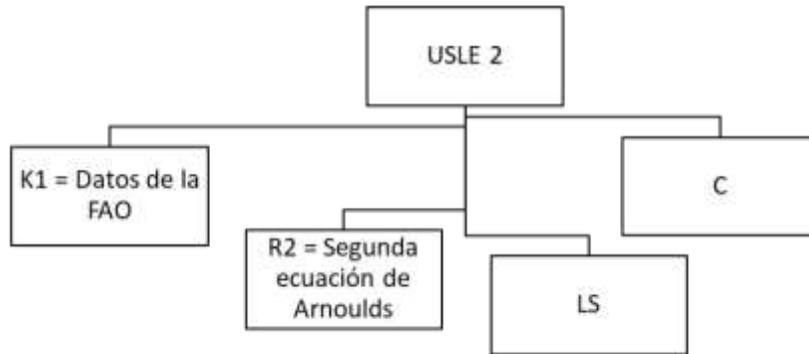


Figura 3.6 Factores usados en la segunda combinación

Fuente: Elaboración propia

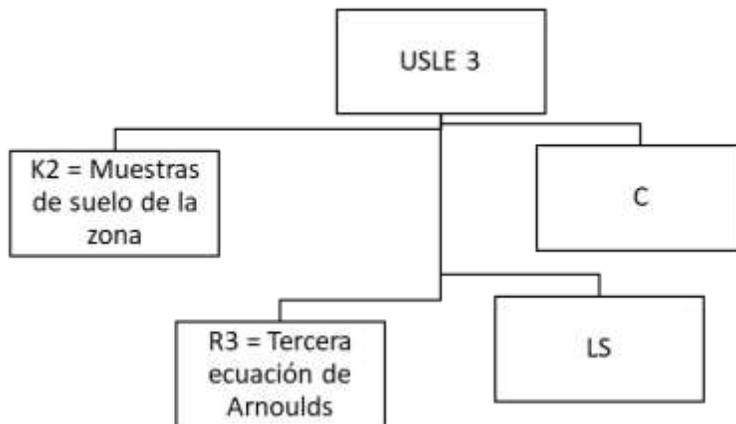


Figura 3.7 Factores usados en la tercer combinación

Fuente: Elaboración propia

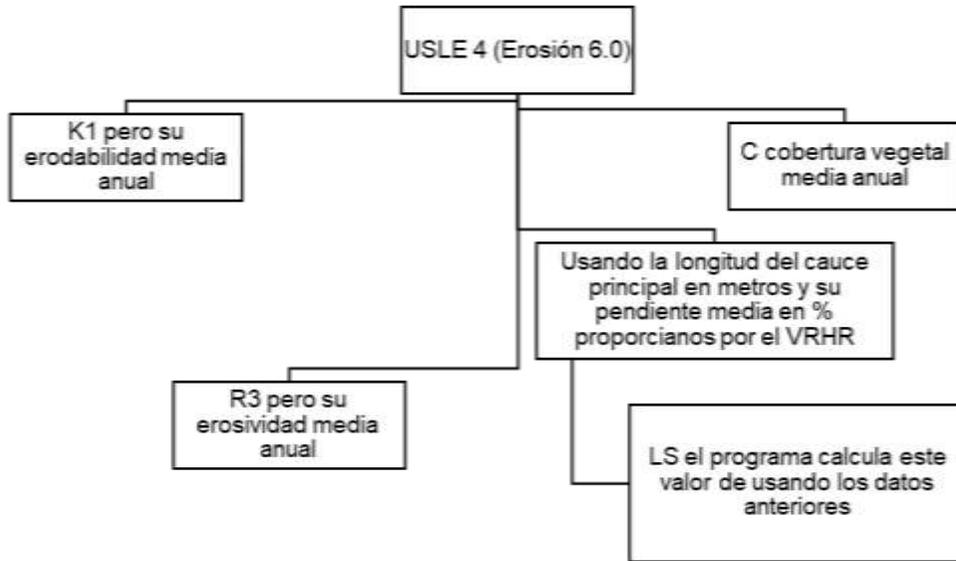


Figura 3.8 Factores usados en la cuarta combinación

Fuente: Elaboración propia

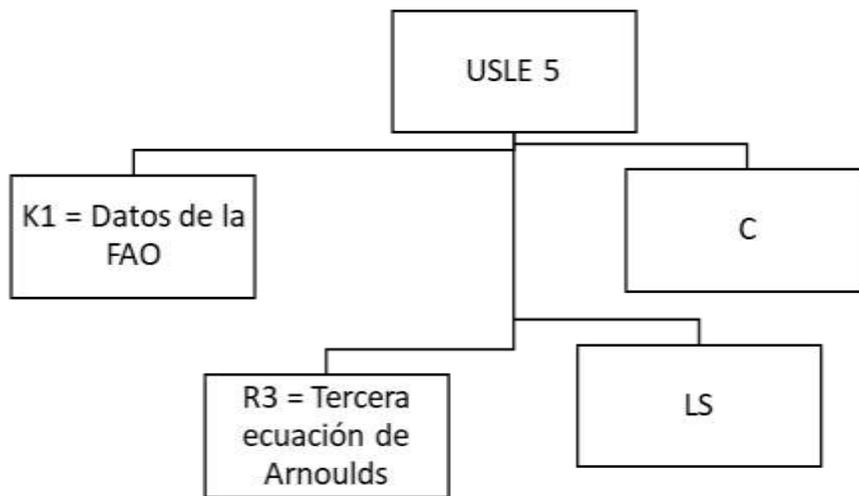


Figura 3.9 Factores usados en la quinta combinación

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1. Factor topográfico LS

#### 3.3.1.1. Cálculo de las pendientes de la cuenca

Obteniendo la delimitación de la cuenca se pudo recortar el DEM usando la herramienta extracción de spatial analyst que se encuentra dentro del ArcToolbox.

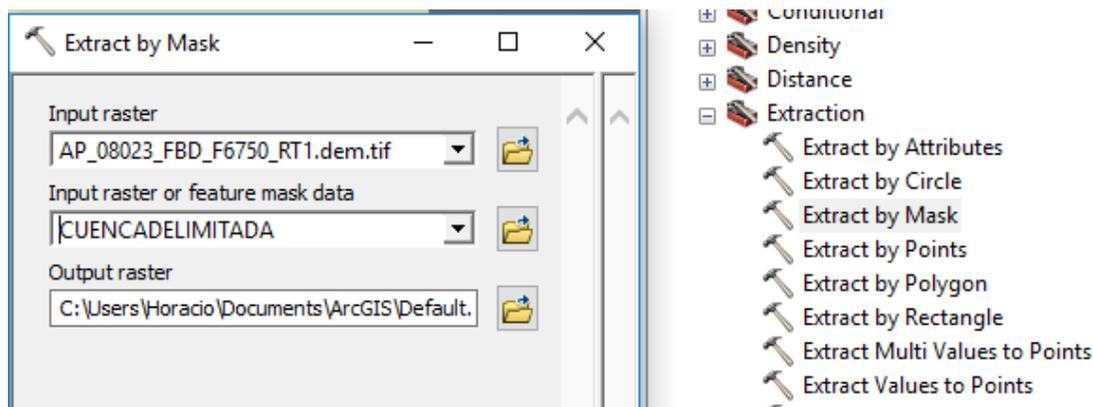


Figura 3.10 Herramienta para recortar un DEM

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde:

Input raster = Seleccionamos el archivo DEM

Input raster or feature mask data = Seleccionamos el polígono

Output raster = Definimos el directorio y nombre del raster

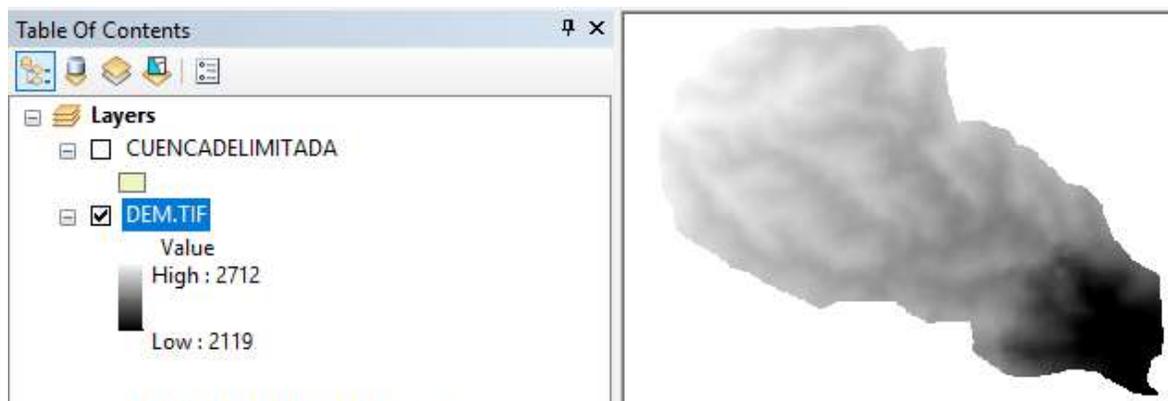


Figura 3.11 DEM recortado

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Ya que la ecuación que se desarrolló más adelante utiliza las pendientes de la cuenca se utilizó la herramienta de Arc Map slope que se encuentra en spatial analyst.

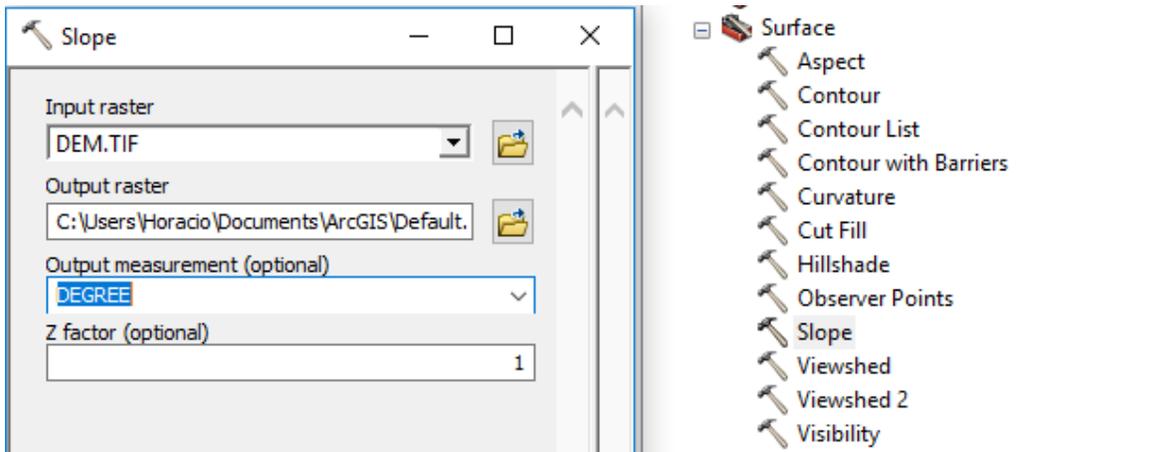


Figura 3.12 Herramienta para calcular las pendientes de la cuenca

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde:

Input raster = Seleccionamos el archivo DEM

Output raster = Definimos el directorio y nombre del raster

Output measurement = En grados y no en porcentaje

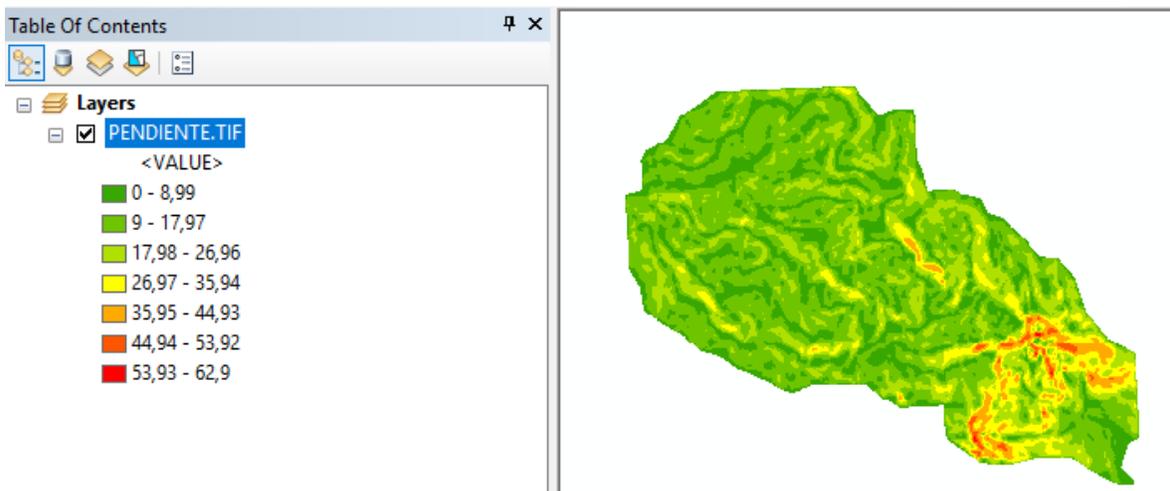


Figura 3.13 Pendientes de la cuenca en grados

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.1.2. Cálculo de F

$$F = \frac{\sin \beta / 0,0896}{3(\sin \beta)^{0,8} + 0,56}$$

Donde:

B = Pendiente a nivel de pixel (debe estar expresada en radianes, a grados multiplicar por 0,01745)

Este se calcula usando la herramienta de calculadora raster

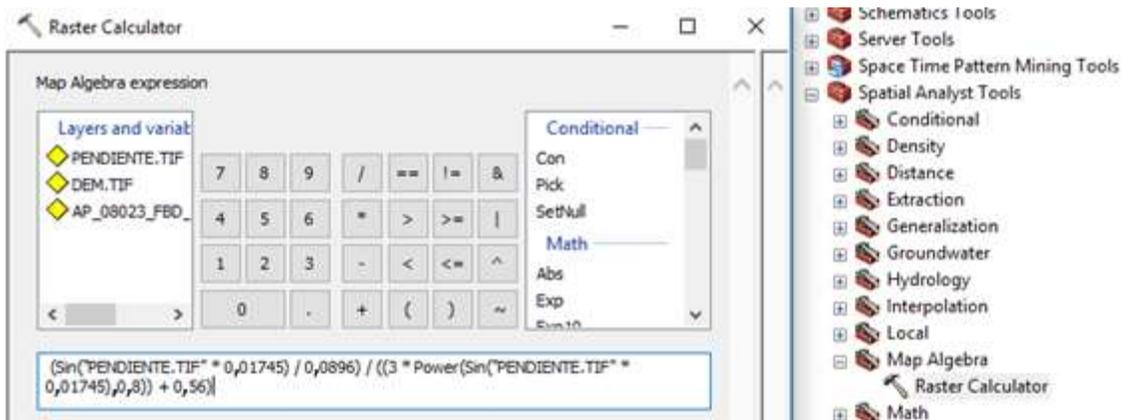


Figura 3.14 Cálculo del factor F

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.1.3. Cálculo de m

$$m = \frac{F}{1+F}$$

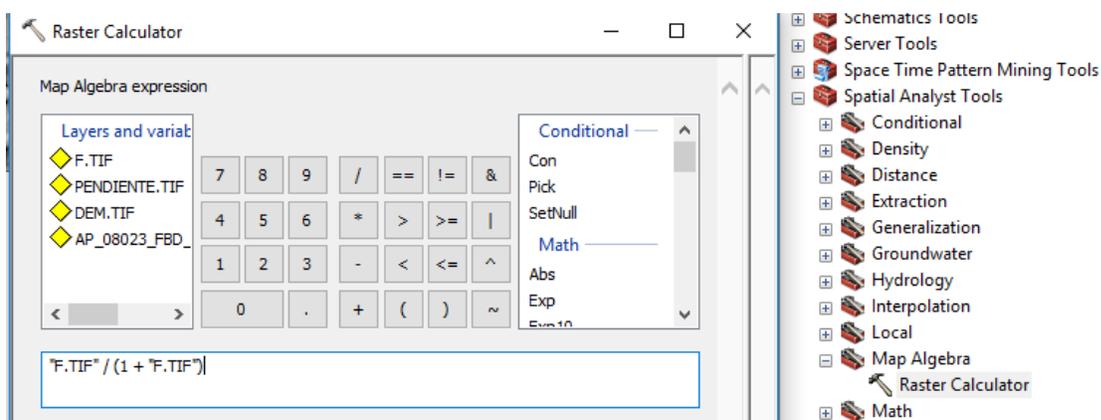


Figura 3.15 Cálculo del factor m

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.1.4. Cálculo del factor L

$$L = \left( \frac{\lambda}{22,13} \right)^m$$

Con los SIG, de (Desmet y Govers, 1996) y (Velásquez, 2008)

$$L_{(i,j)} = \frac{[A(i,j)+D^2]^{(m+1)} - A(i,j)^{m+1}}{x^m D^{m+2} (22,13)^m}$$

Donde:

A = Acumulación del flujo a nivel del pixel (raster acumulación de flujo).

D = Lado del Pixel (12,5)

X = coeficiente de forma (x= 1 para sistemas pixelados)

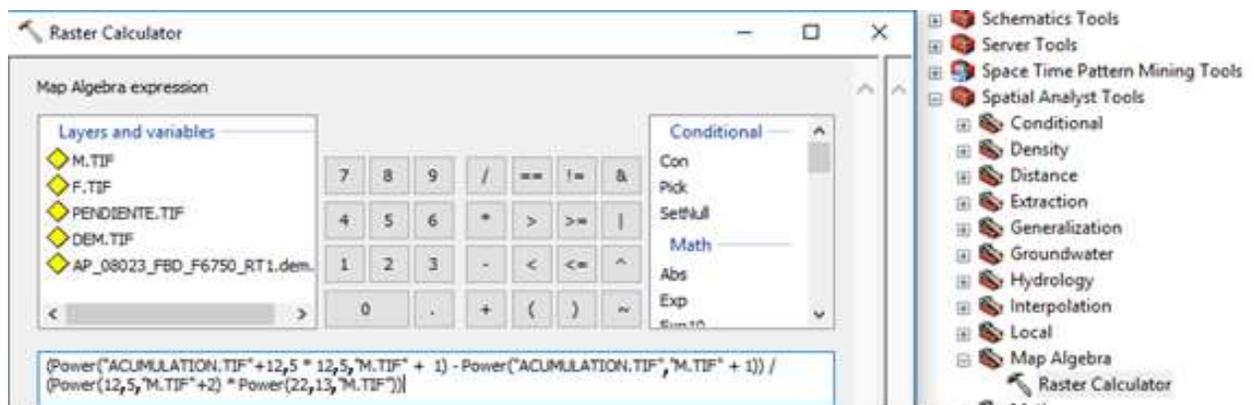


Figura 3.16 Cálculo del factor L

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.1.5. Cálculo del factor S

McCOOLS

Cuando  $\tan \beta_{(i,j)} < 0,09$

$$S_{(i,j)} = 10,8 \sin \beta_{(i,j)} + 0,03$$

Cuando  $\tan \beta_{(i,j)} \geq 0,09$

$$S_{(i,j)} = 10, \sin \beta_{(i,j)} + 0,03$$

Donde

B = Pendiente a nivel de pixel (debe estar expresada en radianes, a grados multiplicar por 0,01745)

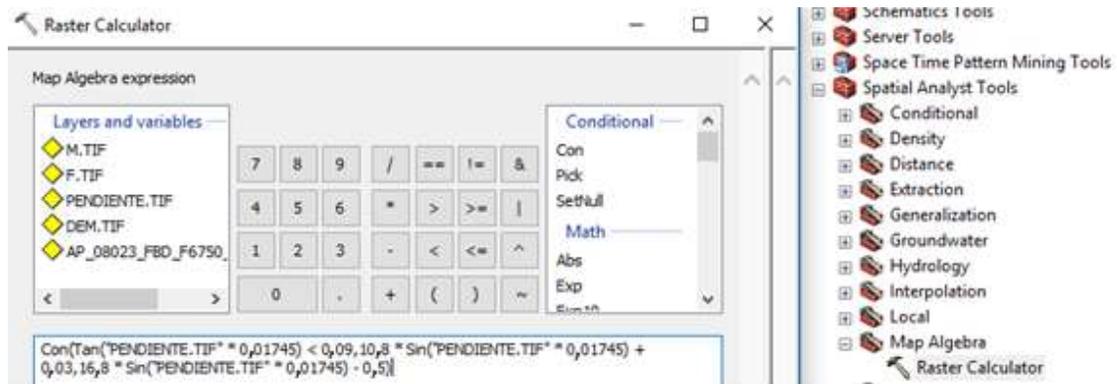


Figura 3.17 Cálculo del factor S

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.1.6. Calculo del factor LS

Este factor ahora se obtiene multiplicando los factores S y L previamente calculados

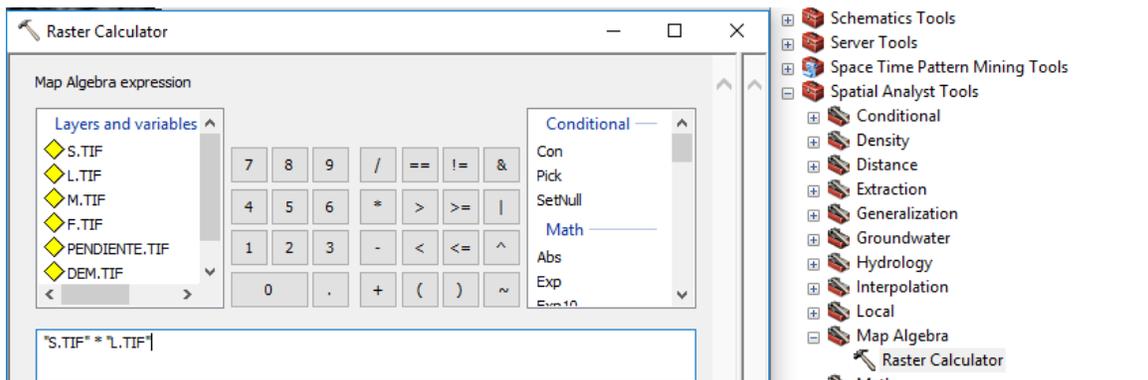


Figura 3.18 Cálculo del factor LS

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

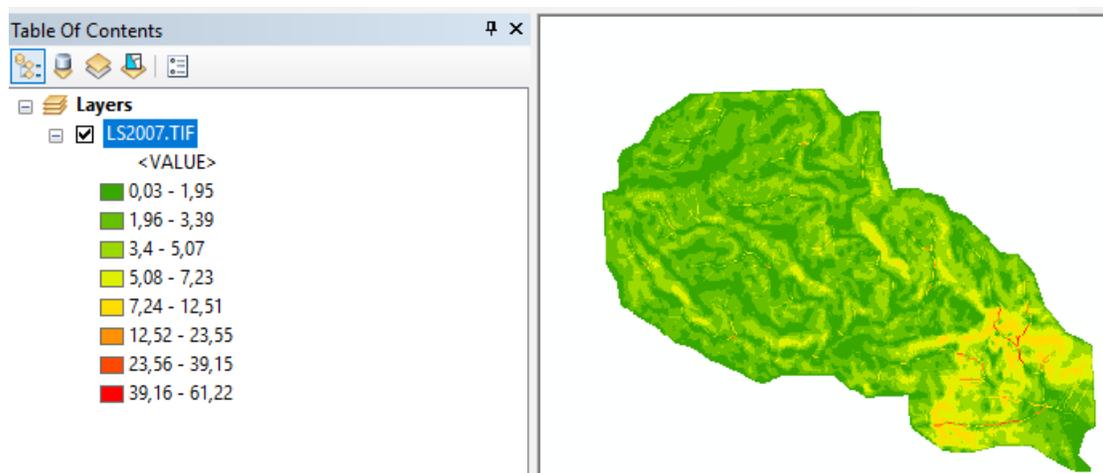


Figura 3.19 Factor LS (adimensional)

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.2. Cálculo de la erodabilidad del suelo o factor K

Existieron dos formas para la obtención de los datos que intervinieron en el cálculo de este factor, el primero fue en base a los datos de la FAO y el otro a partir de toma de muestras de suelo de la zona.

#### 3.3.2.1. Descarga de información de los suelos a nivel mundial

Primeramente, se da a conocer que la FAO tiene una base de datos de los suelos, su clasificación y composición a nivel mundial, cuyos datos se encuentran en la página de GeoNetwork.

FAO Food and Agriculture Organization de Geo Network



Figura 3.20 GeoNetwork

Fuente: Elaboración propia (del programa GeoNetwork)

De donde se localizó el archivo Digital Soil Map of the worl – ESRI shapefile format



Figura 3.21 Archivo a descargar

Fuente: Elaboración propia (del programa GeoNetwork)

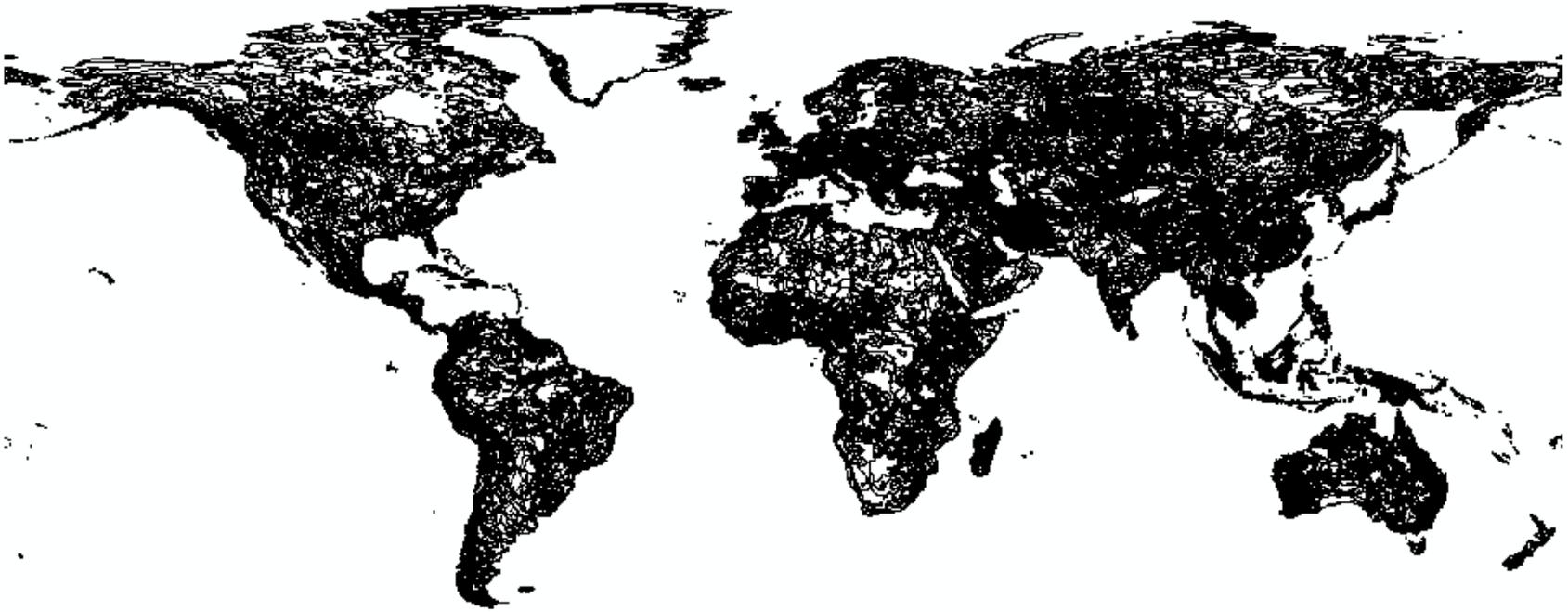


Figura 3.22 Clasificación de suelos a nivel mundial  
Fuente: Elaboración propia (del programa GeoNetwork)

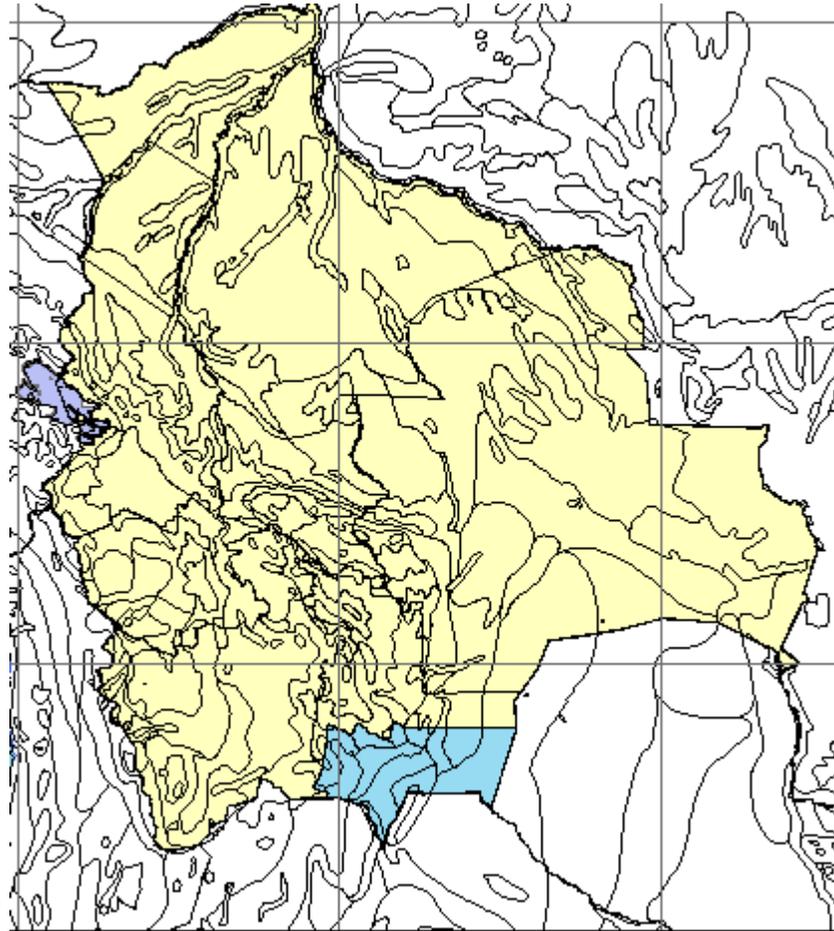


Figura 3.23 Clasificación de suelos a nivel nacional  
Fuente: Elaboración propia (del programa GeoNetwork)

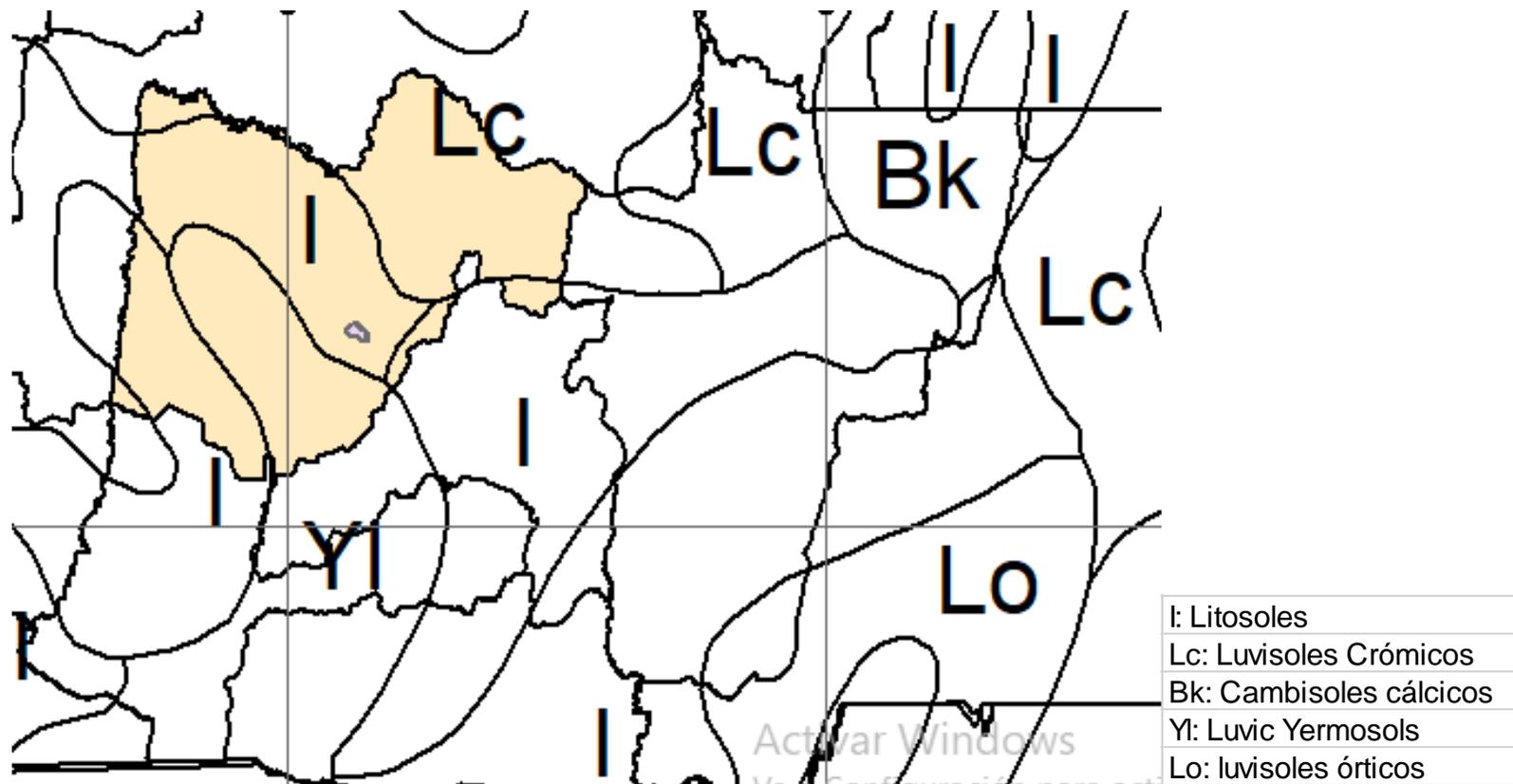


Figura 3.24 Clasificación de suelos a nivel departamental

Fuente: Elaboración propia (del programa GeoNetwork)

Identify

Identify from: <Top-most layer>

DSMW  
BL

Location: -64,841743 -21,252395 Decimal Degrees

Field	Value
FID	29292
Shape	Polygon
SNUM	5548
FAOSOIL	I-c
DOMSOI	I

Figura 3.25 Clasificación de suelos de la cuenca  
Fuente: Elaboración propia (del programa GeoNetwork)

Al ir acercándose para una mejor visualización de la zona de clasificación de suelo a la que pertenece de nuestra cuenca se observa que el tipo de suelo es el mismo por tanto se comenzará a calcular el K con los valores que provienen del Excel que se descarga con el archivo SHP.

Soil unit symbol	(ms) sand % topsoil	(msilt) silt % topsoil	(mc) clay % topsoil	(org C) OC % topsoil
I	58,9	16,2	24,9	0,97

$$f_{csan} = 0,2 + 0,3 * e^{[-0,256 * ms * (1 - \frac{msilt}{100})]} = 0,200000$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3} = 0,756316$$

$$f_{orgC} = \left[ 1 - \frac{0,25 * orgC}{orgC + e^{(3,72 - 2,95 * orgC)}} \right] = 0,927168$$

$$f_{hisand} = \left( 1 - \frac{0,70 * \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + e^{(-5,51 + 22,9 * \left( 1 + \frac{m_s}{100} \right))}} \right) = 1,000000$$

$$k = 0,1317 * f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand} = 0,018470$$

Como el valor es único para toda la cuenca y para no complicar el cálculo puede crearse un raster constante con ese valor usando la herramienta raster creation del Arc Map.



Figura 3.26 Ubicación de la herramienta Create Constant Raster

Fuente: Elaboración propia (ArgGis)

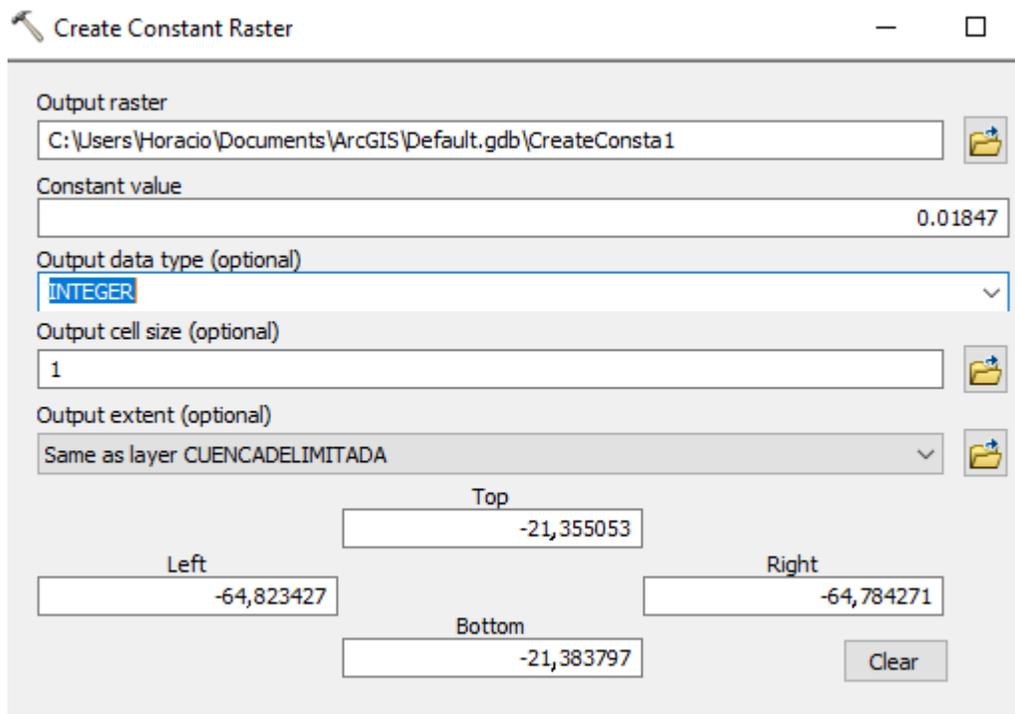


Figura 3.27 Utilización de la herramienta Create Constant Raster

Fuente: Elaboración propia (ArgGis)

Donde:

Output raster = Donde y el nombre con el que se guardará el archivo (x.TIF)

Constante value = Valor K

En este procedimiento solo se realiza cuando el suelo es constante para una cuenca ya que si el suelo es variable el procedimiento es muy diferente al planteado.



Figura 3.28 Factor K ( $T_n \cdot h / MJ \cdot mm$ )

Fuente: Elaboración propia (ArgGis)

### 3.3.2.2. A través de muestras de suelo

Se seleccionó una serie de puntos de diferentes zonas, en este caso se aprovechó la primera forma para hacer un pre cálculo de las zonas con mayor riesgo erosivo y se seleccionó esos puntos para la extracción de muestras de suelo,

Tabla 3.1 Ubicación de las muestras

ESTACION	LATITUD	LONGITUD
Punto 1	-21,372869	-64,787552
Punto 2	-21,380533	-64,796773
Punto 3	-21,362751	-64,818413

Fuente: Elaboración propia

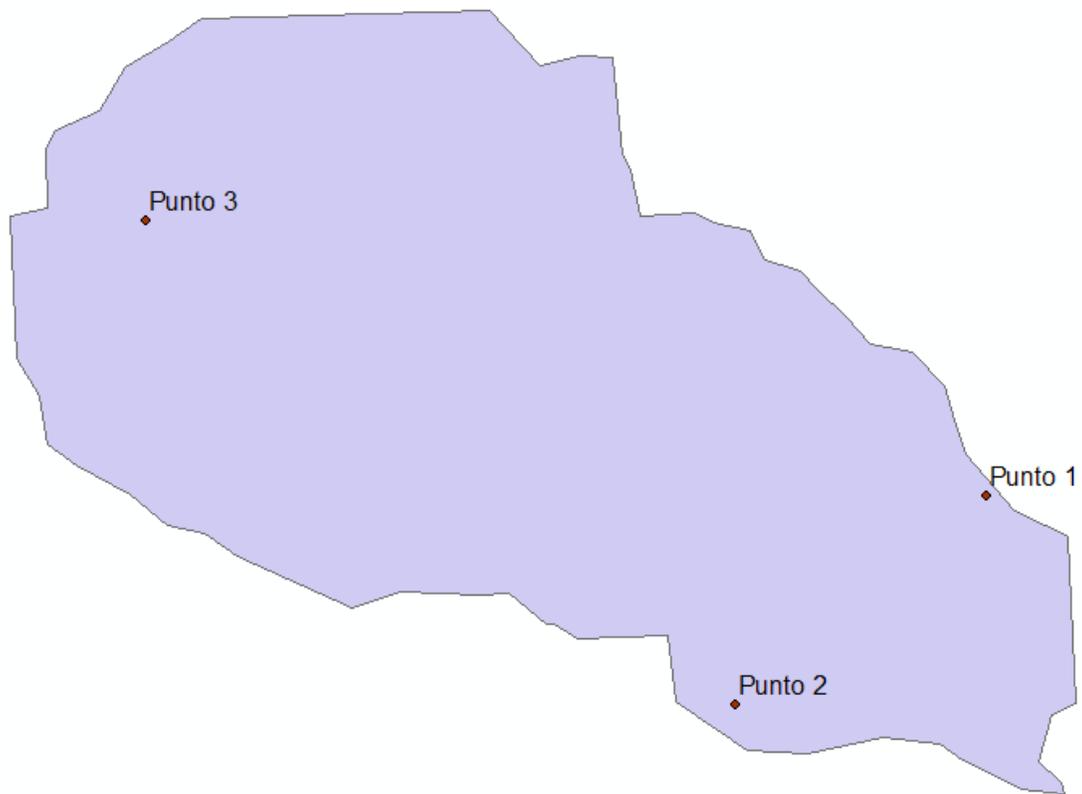


Figura 3.29 Ubicación de las muestras de suelo

Fuente: Elaboración propia (ArgGis)



Figura 3.30 Muestra 1

Fuente: Elaboración propia (ArgGis)



Figura 3.31 Muestra 2

Fuente: Elaboración propia (ArgGis)



Figura 3.32 Muestra 3

Fuente: Elaboración propia (ArgGis)

Las cuales fueron llevadas al laboratorio de suelos CONSUNION para su análisis, haciendo notar que solo se pudieron realizar análisis de granulometría puesto que el análisis de % de carbono orgánico de una muestra de suelo se realiza con el ensayo de hidrometría y no se consigue el hexametáfosfato de sodio desde hace más de un año en la ciudad de Tarija por lo que se usa el que entrega la FAO como constante para las 3 muestras.

Los resultados de las 3 muestras son los siguientes, tomando en cuenta el que % de grava y arena se suman.

Tabla 3.2 Resultados de las muestras

(ms) sand % topsoil	(msilt) silt % topsoil	(mc) clay % topsoil	(org C) OC % topsoil	K
15,9	79,35	4,75	0,97	0,039532191
74,57	23,99	1,44	0,97	0,023998278
27,4	68,5	4,1	0,97	0,027950383

Fuente: Elaboración propia (ArgGis)

Estos valores son llevados a Arc Map donde se interpolan como si fueran curvas de nivel con el método de distancia inversa.

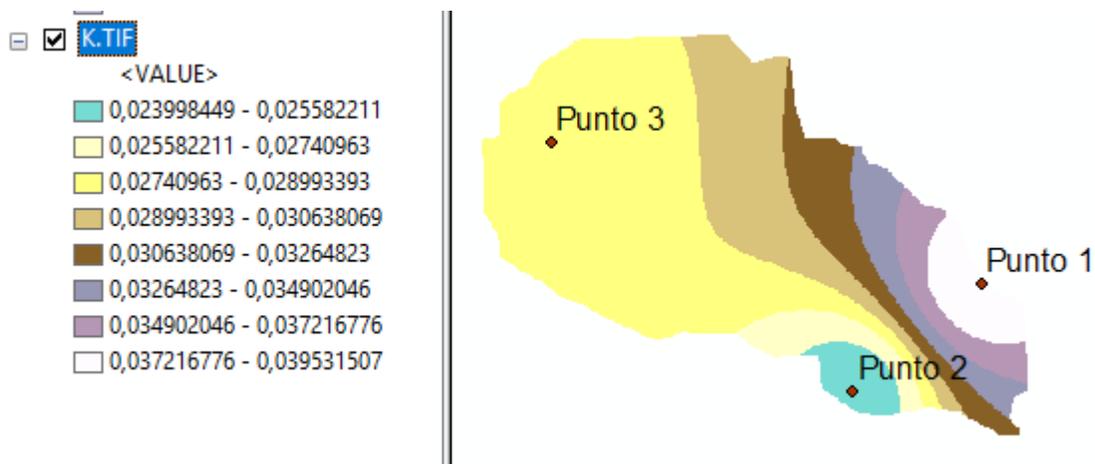


Figura 3.33 Factor K (Tn\*h/MJ\*mm)

Fuente: Elaboración propia (ArgGis)

### 3.3.2.3. Factor lluvia o índice de erosividad pluvial (R)

Para empezar a calcular este factor se deben realizar los pasos que se describen a continuación

### 3.3.2.4. Ubicación de estaciones cercanas

Se deberían ubicar las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca ya que estas tienen una mayor influencia, pero al no tener ninguna se ubicó las estaciones cercanas a la cuenca las cuales son: Sella Quebrada, Coimata, Tucumillas, Trancas, Campanario y Tomayapo.

Guardamos las ubicaciones de las estaciones en formato XLS (complemento de 97-2003) utilizando Excel para poder ser añadido al Arc Map, en las que se usa la sección display xy data para añadirlos.

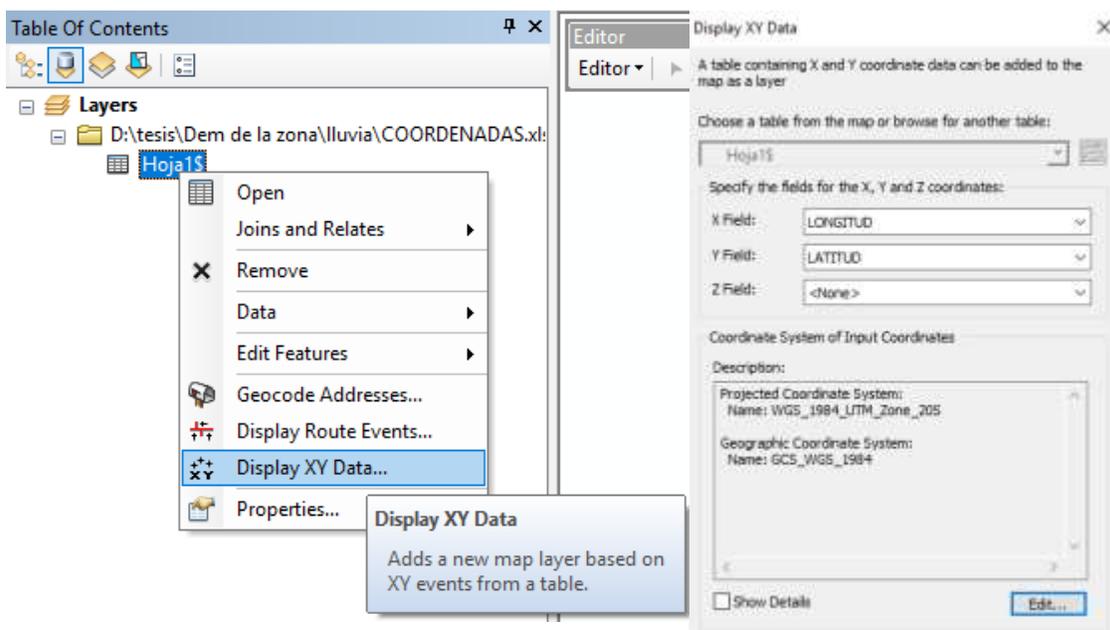


Figura 3.34 Insertar ubicación de estaciones pluviométricas en Arc Map

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Siendo x field la longitud de las coordenadas e y field latitud de las coordenadas además que se debe configurar para que este tenga un sistema de coordenadas geográficas.

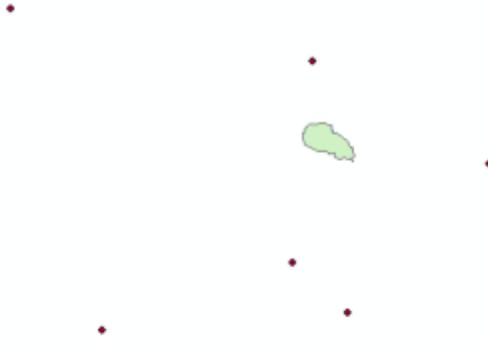


Figura 3.35 Ubicación de las estaciones  
Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Este archivo puede ser exportado como un archivo shp y con este archivo se trabajará en los cálculos posteriores.

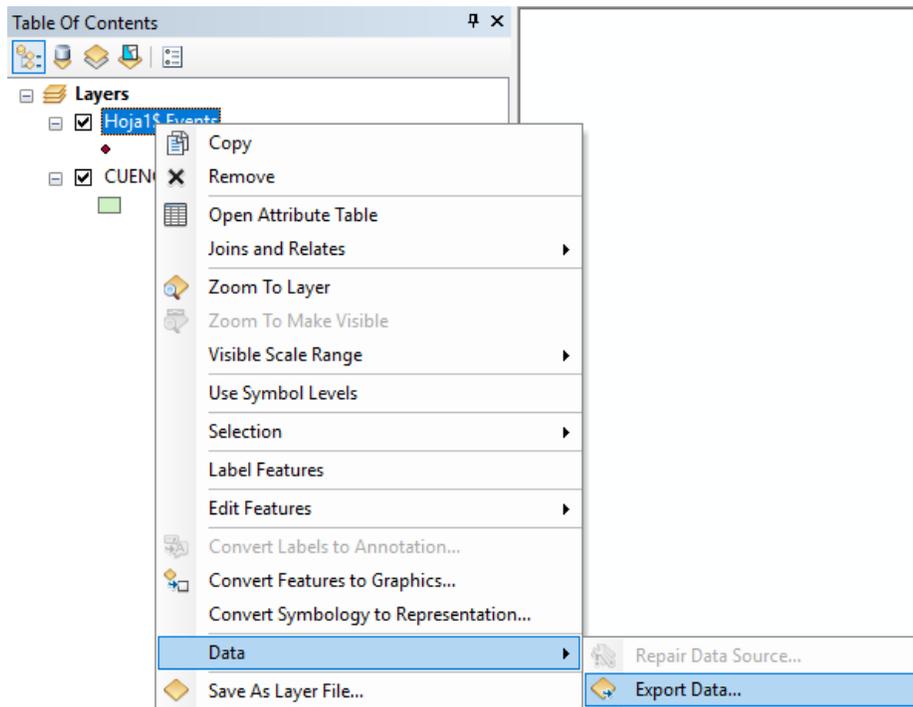


Figura 3.36 Conversión de archivos a formato SHP  
Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

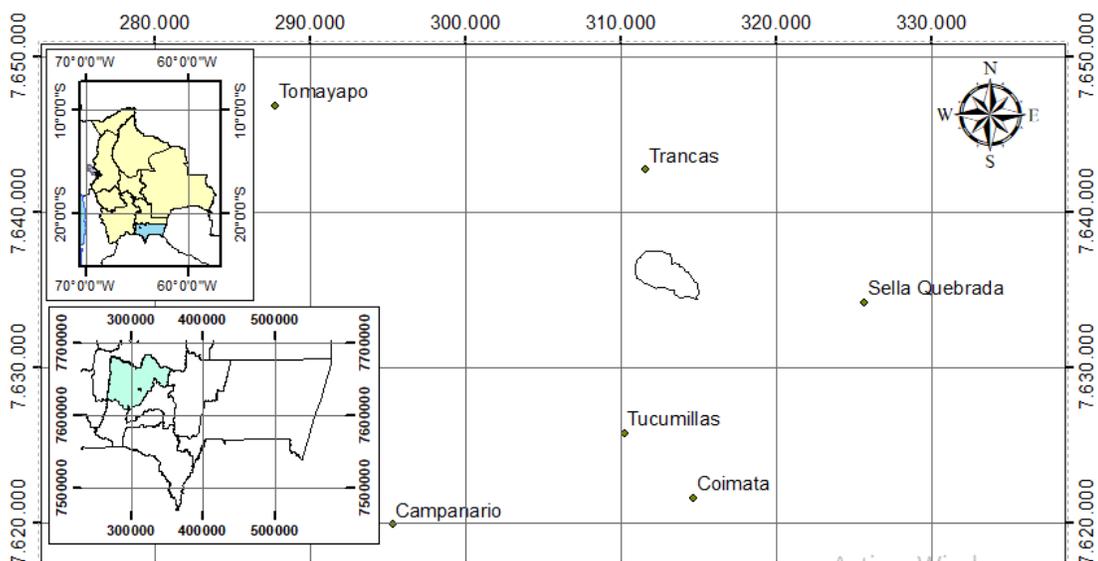


Figura 3.37 Ubicación de las estaciones en formato SHP

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2.5. Cálculo del IMF

Para el cálculo del IMF primeramente se elaboran las isoyetas mensuales del año en estudio y para esto usamos el programar Arc Map de la siguiente forma:

- Se juntan y ordenan las precipitaciones mensuales de las estaciones por año.

Tabla 3.3 Precipitación mensual año 2000 de las estaciones cercanas

<b>Datos de precipitación mensual año 2000</b>	
<b>Estación</b>	<b>ENE (mm)</b>
<b>Coimata</b>	211,40
<b>Tucumillas</b>	261,40
<b>Sella Quebrada</b>	258,40
<b>Trancas</b>	250,00
<b>Campanario</b>	164,70
<b>Tomayapo</b>	111,00

Fuente: Elaboración propia

- Guardando estos datos usando Excel en formato XLS y posteriormente se añaden a los datos de ubicación de estaciones de Arc Map “archivo SHP” con la herramienta join and relates.

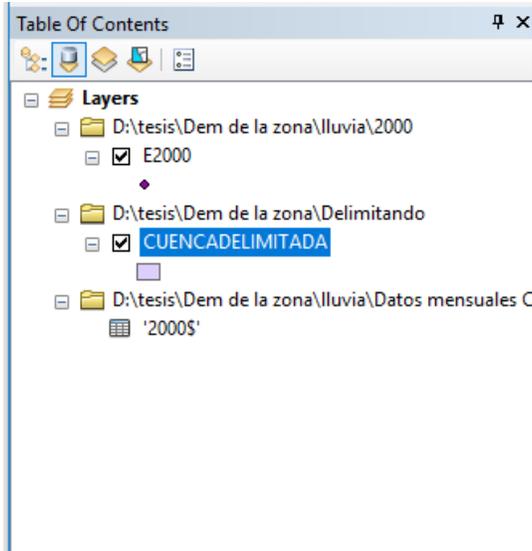


Figura 3.38 Tabla de contenidos Arc Map

Fuente: Elaboración propia

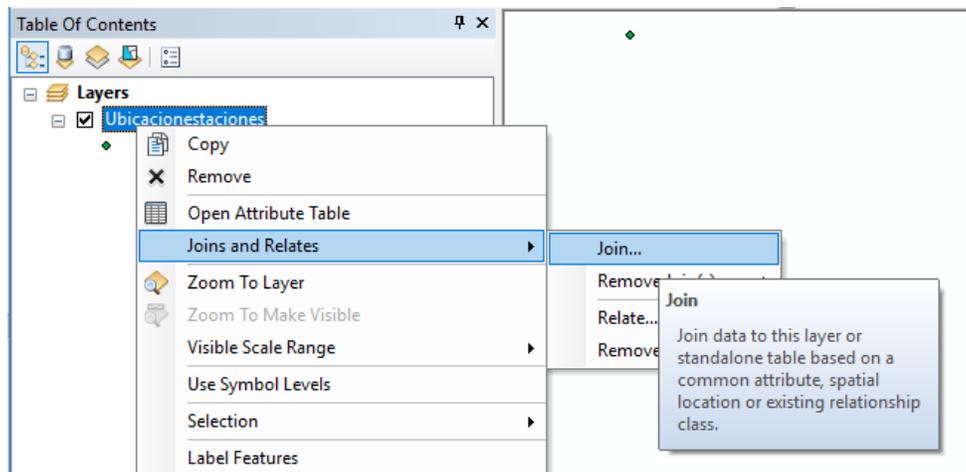


Figura 3.39 Herramienta Join Arc Map

Fuente: Elaboración propia

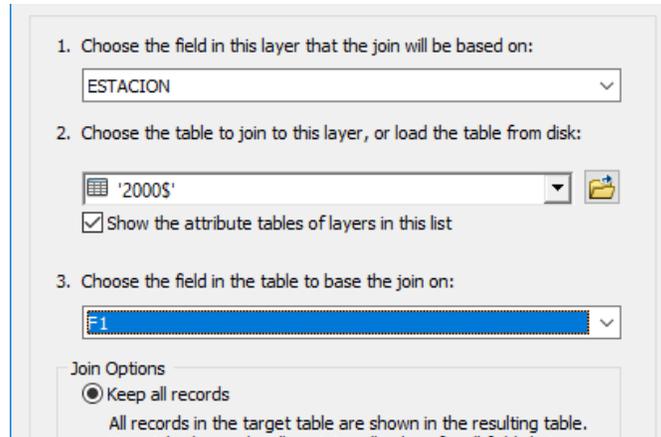


Figura 3.40 Opciones de la herramienta Join

Fuente: Elaboración propia

Donde:

1 Chose = Selección del archive SHP

2 Chose = Selección del archive XLS de excel

3 Chose = Selección de que atributos en común con los que se podrán unir los archivos

Quedando la tabla de atributos del nuevo archivo SHP de esta forma.

	FID	Shape *	ESTACION	LATITUD	LONGITUD
▶	0	Point	Coimata	-21,4992	-64,7889
	1	Point	Tucumillas	-21,4611	-64,8311
	2	Point	Sella Quebrada	-21,3864	-64,6811
	3	Point	Trancas	-21,3081	-64,8158
	4	Point	Campanario	-21,5125	-64,975555
	5	Point	Tomayapo	-21,2683	-65,045

Figura 3.41 Tabla de atributos formato SHP

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Para la creación de las isoyetas ahora solo se requiere el nuevo archivo SHP y la delimitación de la cuenca usando las herramientas IDW<sup>3</sup> que es un método de interpolación que se encuentra en el ArcToolbox de Arc Map.

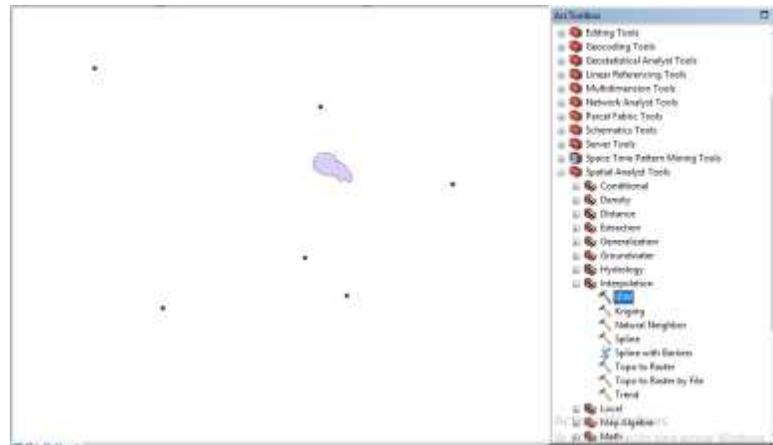


Figura 3.42 Ubicación de la herramienta IDW

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

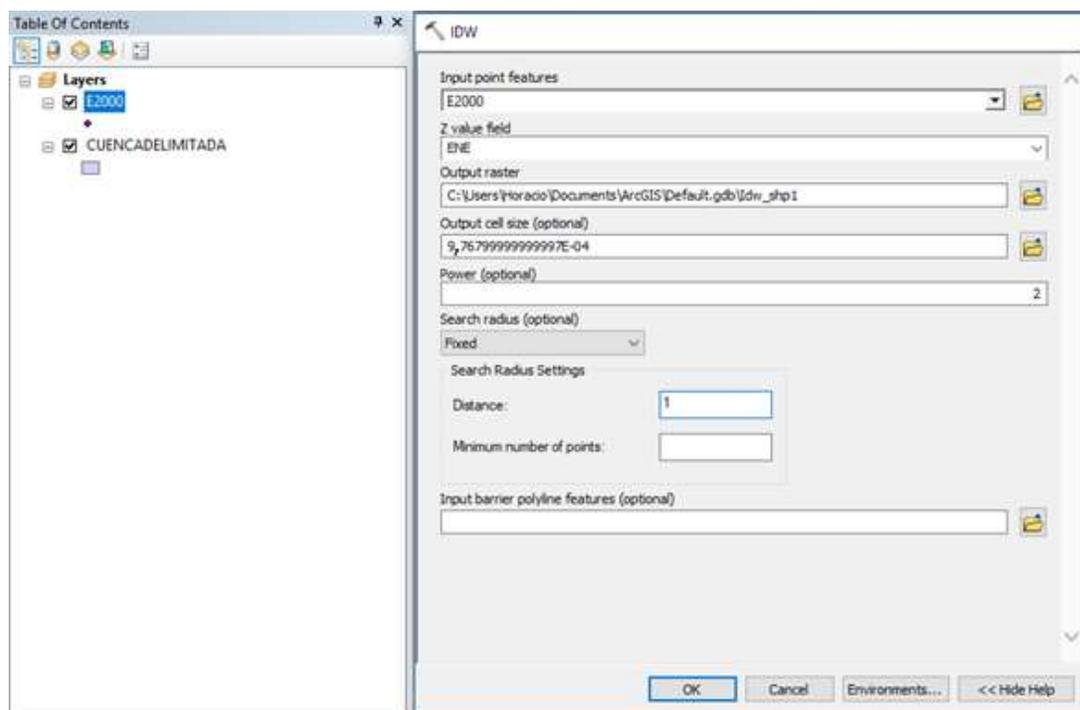


Figura 3.43 Llenado de datos de la herramienta IDW

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

<sup>3</sup> Interpola una superficie de ráster a partir de puntos utilizando una técnica de distancia inversa ponderada

Donde:

input point features = El nuevo archive SHP

Z value field = El mes que se desea interpolar que en este caso es el de enero.

Output raster = Donde se desea guardar el archivo y con qué nombre (P1.TIF).

El resto de los valores se mantienen por defecto, pero se ingresa a environments para realizar las siguientes configuraciones.

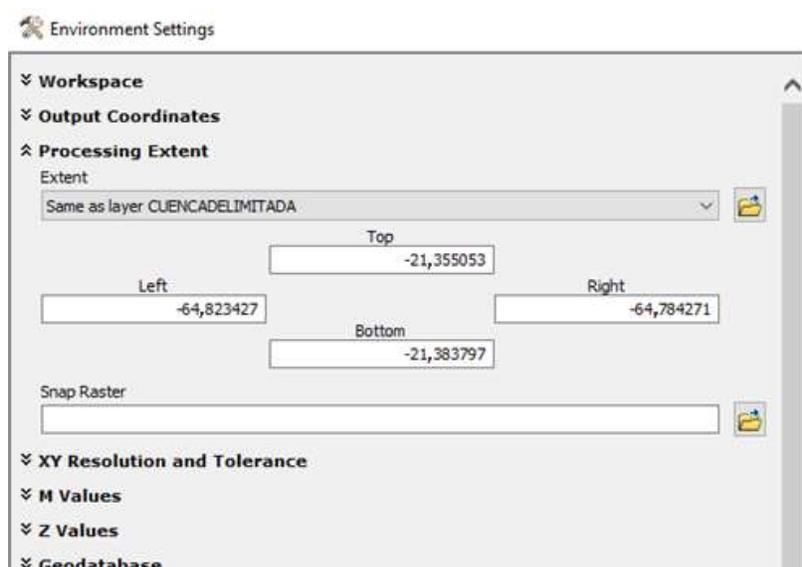


Figura 3.44 Herramienta de configuración de entorno

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

En processing extent se selecciona la cuenca esto con el fin de que el mapa isoyeta creado tenga las mismas coordenadas que tiene la cuenca.

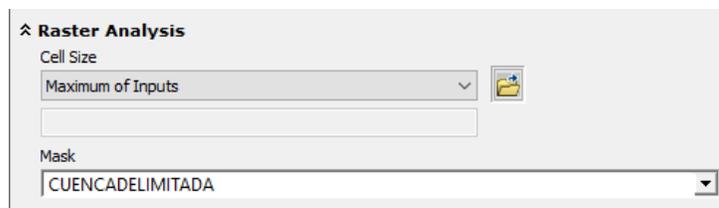


Figura 3.45 Herramienta de configuración de entorno

Fuente: Elaboración propia

Se selecciona como mask la cuenca delimitada para que las isoyetas creadas se tracen únicamente dentro de la cuenca.

Repitiendo este proceso para el resto de los meses del año trabajado se tiene lo siguiente:

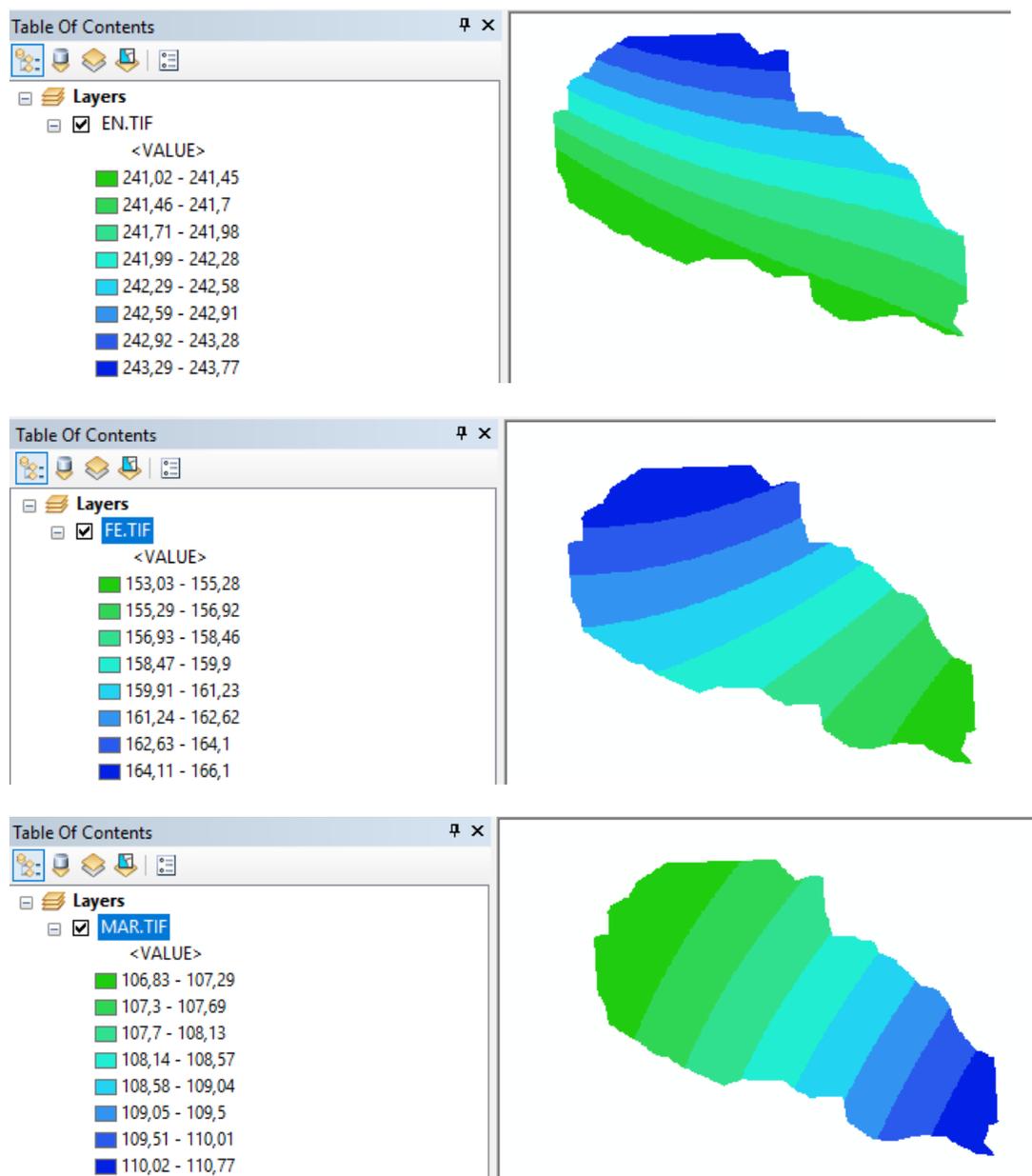


Figura 3.46 Isoyetas mensuales de Enero a Marzo (mm)

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

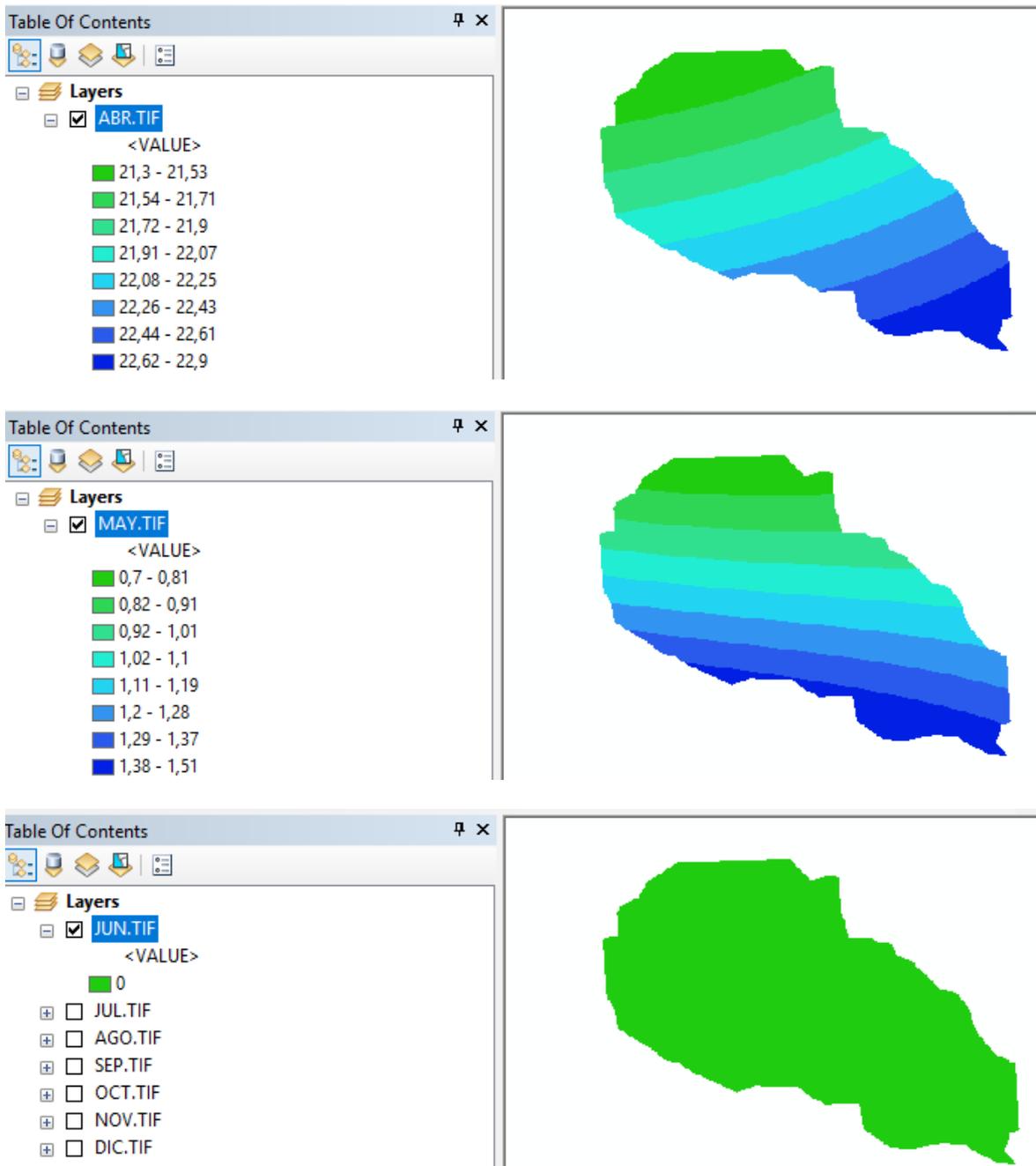


Figura 3.47 Isoyetas mensuales de Abril a Junio (mm)

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

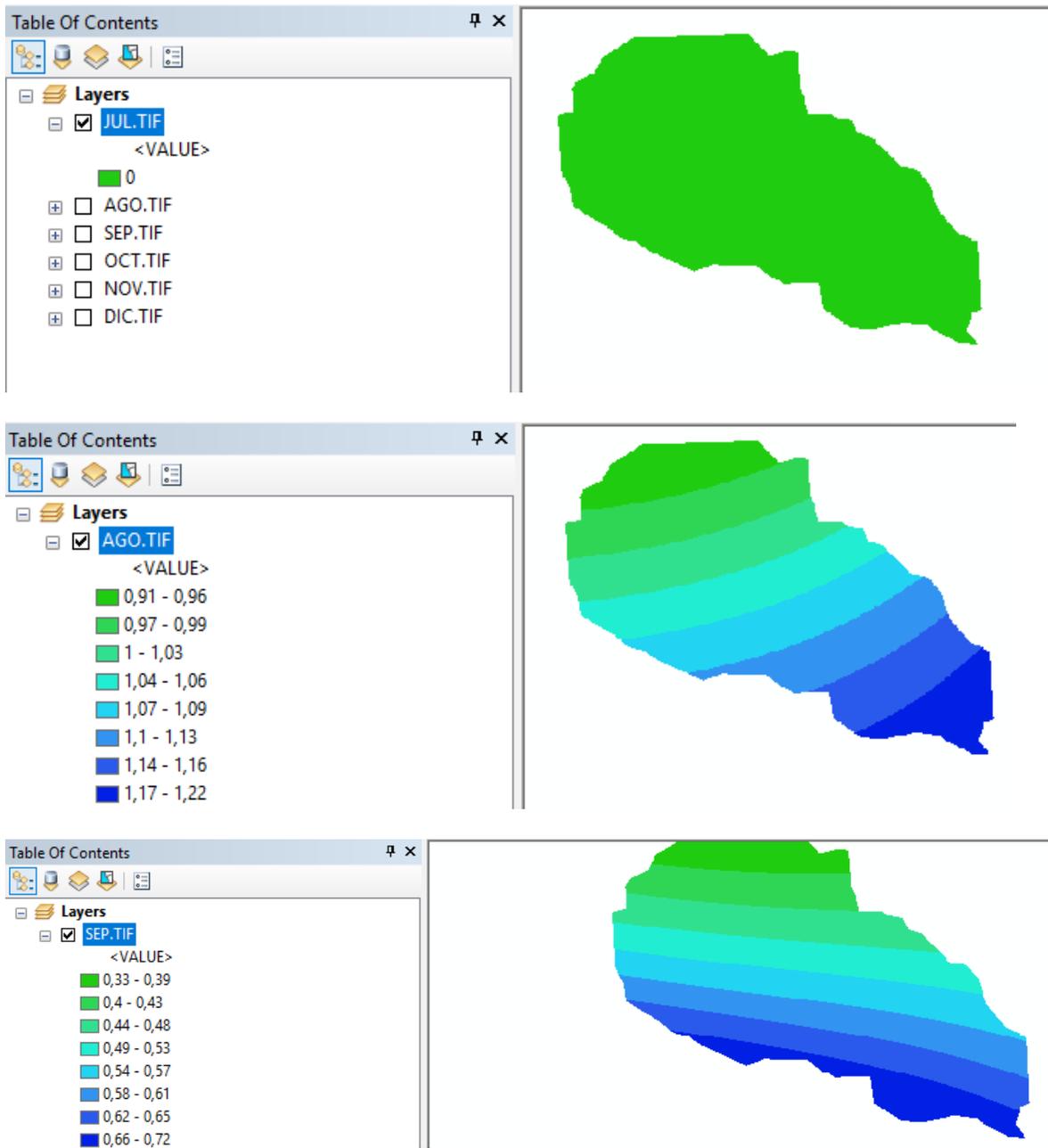


Figura 3.48 Isoyetas mensuales de Julio a Septiembre (mm)

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

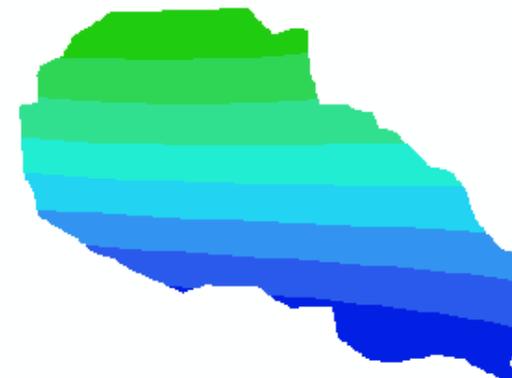
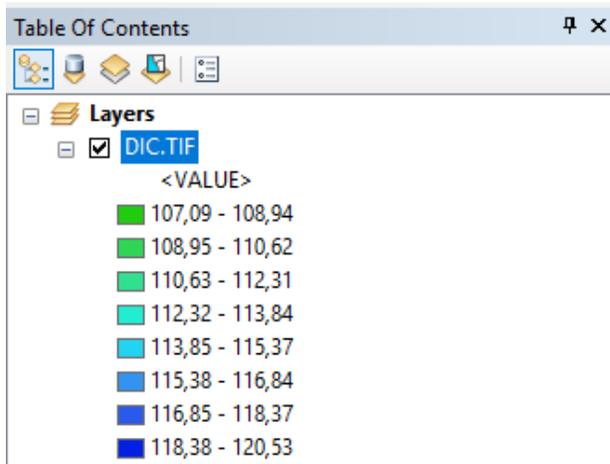
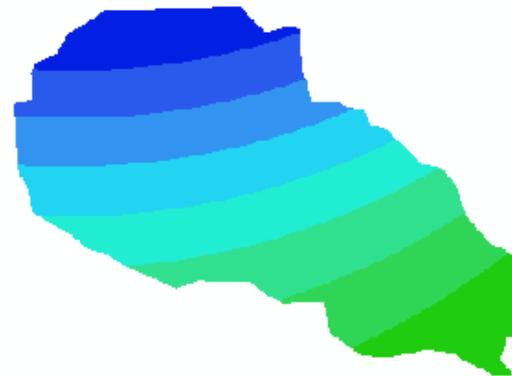
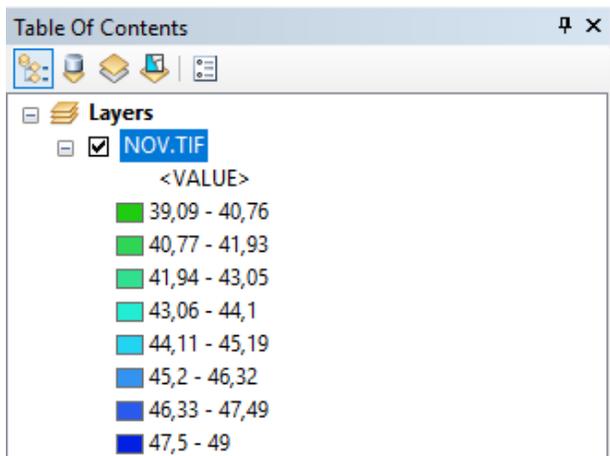
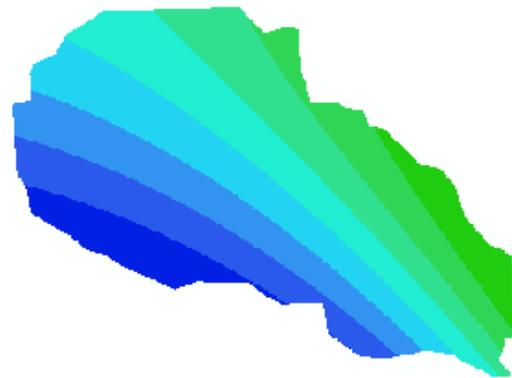
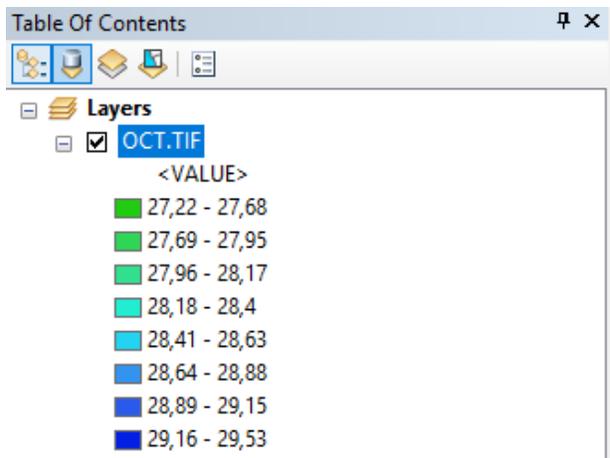


Figura 3.49 Isoyetas mensuales de Octubre a Diciembre (mm)

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Una vez calculado la isoyetas procedemos a calcular el IMF para luego calcular el factor R de lluvia, cabe recalcar que a partir de ahora solo se usará la herramienta de spatial analyst tools calculadora raster que se encuentra en el ArcToolbox:

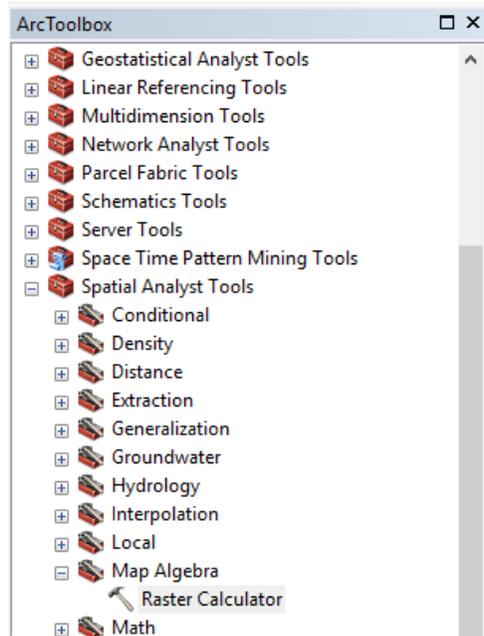


Figura 3.50 Ubicación de la calculadora raster

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

$$IMF = \frac{P_E^2 + P_F^2 + P_M^2 + P_A^2 + P_M^2 + P_J^2 + P_J^2 + P_A^2 + P_S^2 + P_O^2 + P_N^2 + P_D^2}{P_E + P_F + P_M + P_A + P_M + P_J + P_J + P_A + P_S + P_O + P_N + P_D}$$

Para una facilidad de cálculo puede calcularse el denominador por separado

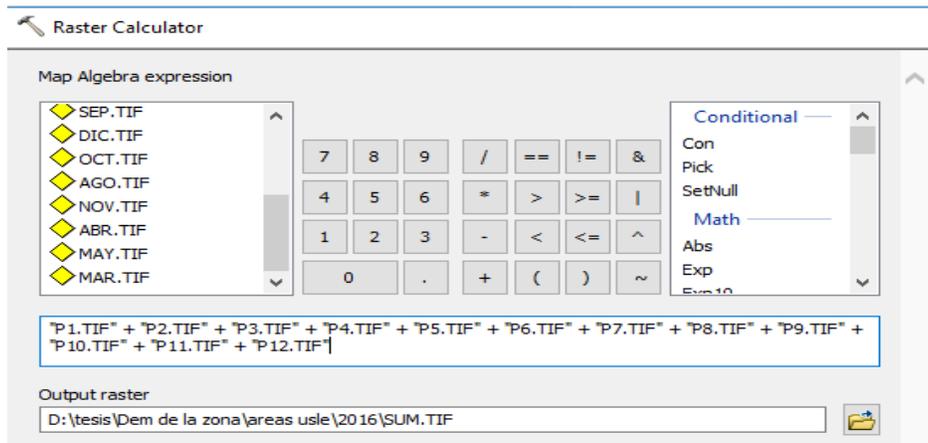


Figura 3.51 Fórmula insertada

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde:

Pn = Representación de los meses designando con números los meses del año.

Output raster = Donde se desea guardar el resultado y con qué nombre (SUM.TIF).



Figura 3.52 Suma de las isoyetas (mm)

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Teniendo el denominador, el IMF se calcula con la misma herramienta y de la misma forma variando únicamente la fórmula y la ecuación.

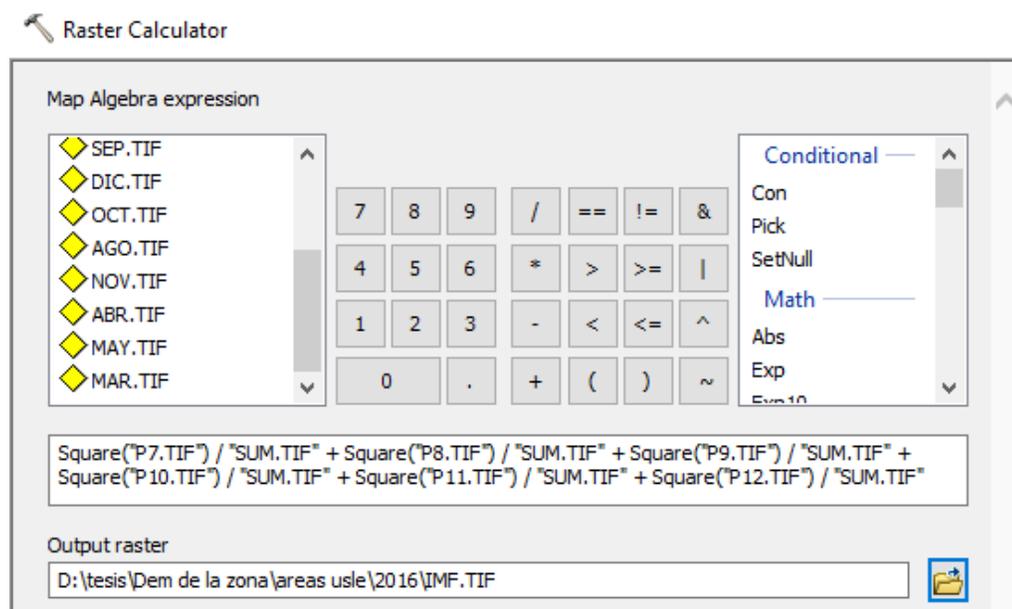


Figura 3.53 Ecuación del IMF en la calculadora raster

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

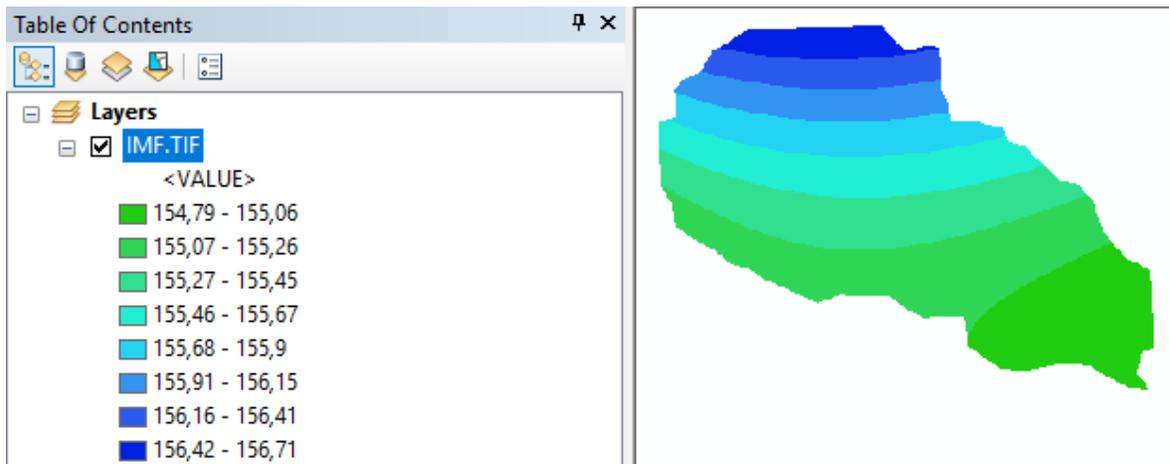


Figura 3.54 IMF resultante del año 2000 (mm)

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.2.6. Cálculo del R ecuación 1

Se usa la primera ecuación propuesta por Arnoldus en función al IMF.

$$R = 95,77 - 6,081\text{IMFI} + 0,4770\text{IMFI}^2$$

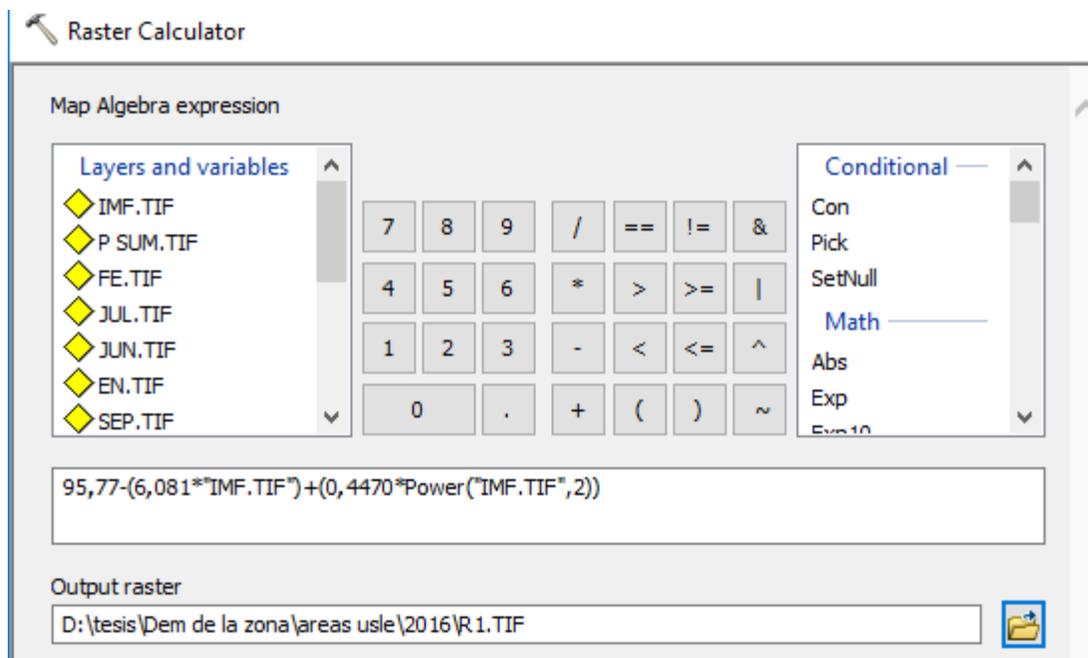


Figura 3.55 Ecuación de coeficiente R1 en la calculadora raster

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

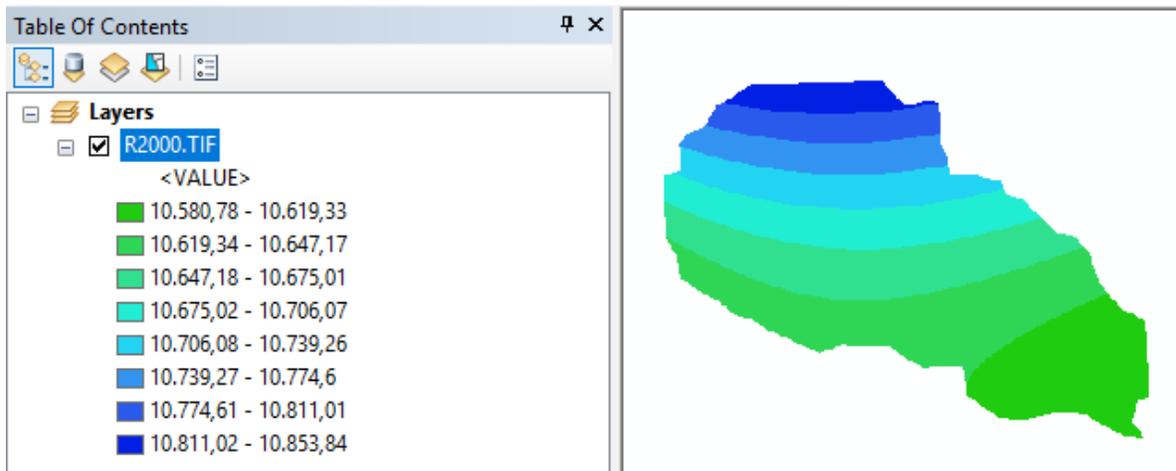


Figura 3.56 Raster con la ecuación R1 (MJ\*mm/ha\*h) año 2000

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.2.7. Cálculo del R ecuación 2

Se usa la segunda ecuación propuesta por Arnoldus en función al IMF.

$$R = 0,07397 * MF I^2$$

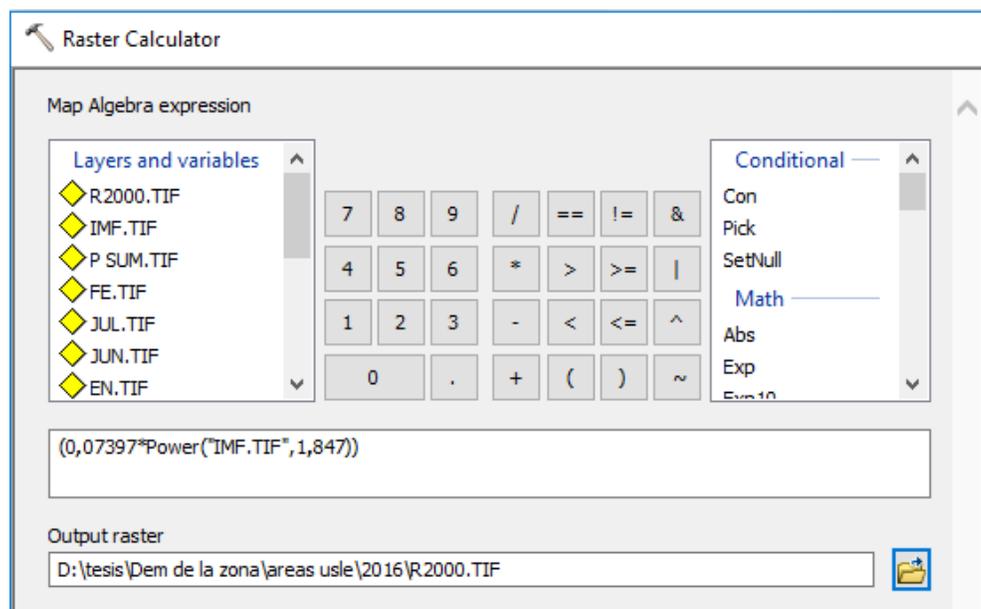


Figura 3.57 Ecuación de coeficiente R2 en la calculadora raster

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

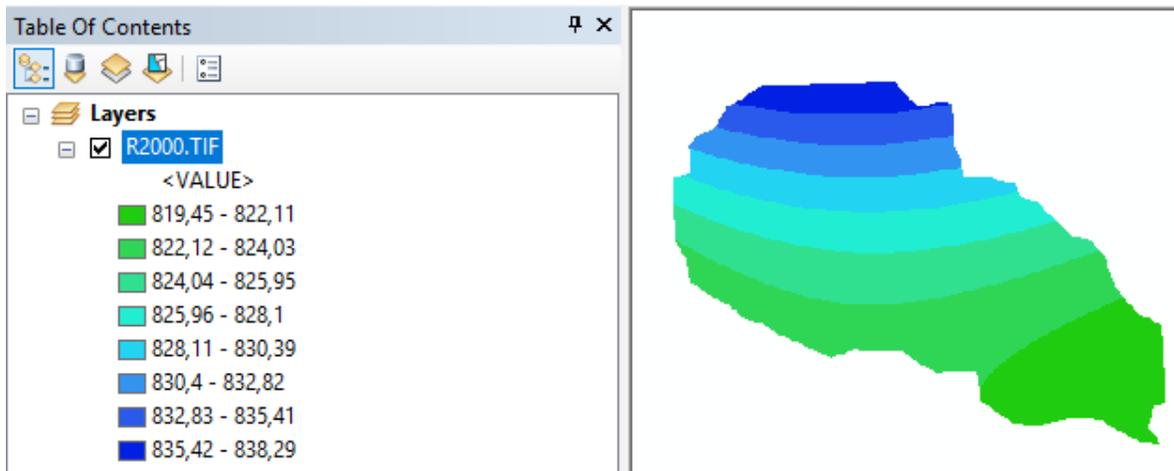


Figura 3.58 Raster con la ecuación R2 (MJ\*mm/ha\*h) año 2000

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.2.8. Cálculo del R ecuación 3

Se usa la tercera ecuación propuesta por Arnoldus en función al IMF.

$$R = 0,66 * MFI - 3$$

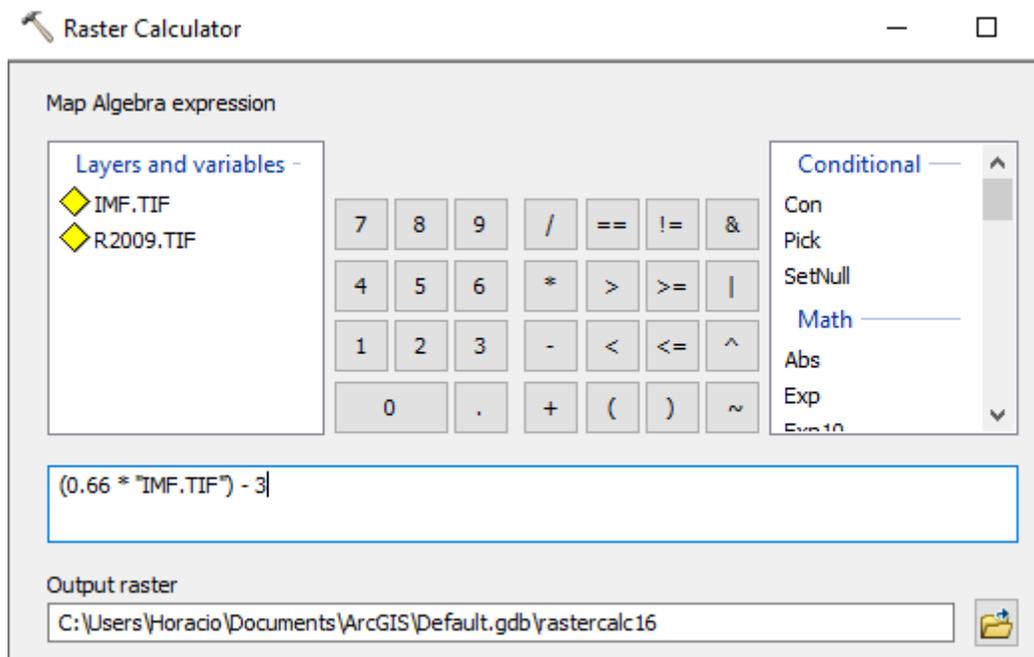


Figura 3.59 Ecuación de coeficiente R3 en la calculadora raster

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

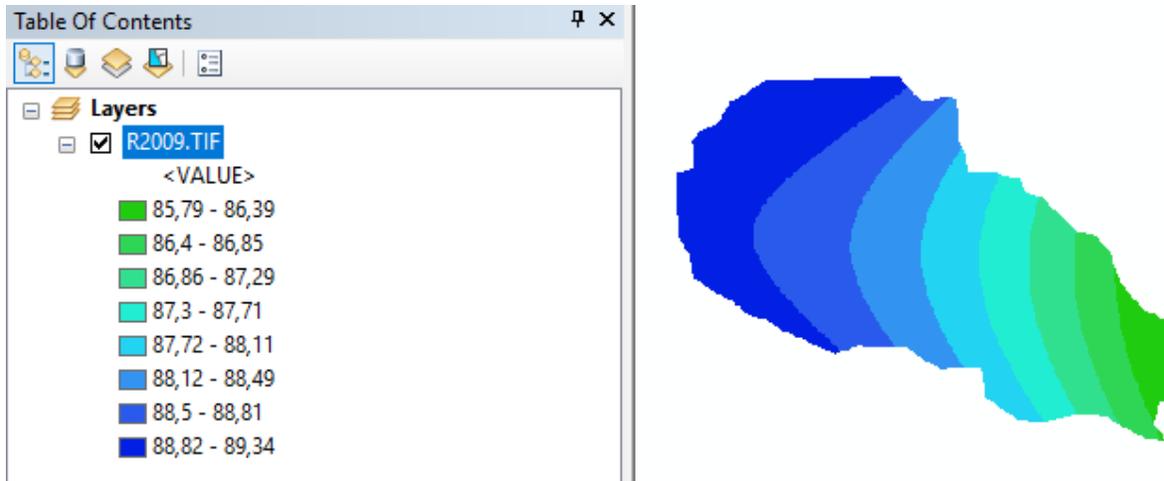


Figura 3.60 Raster con la ecuación R3 (MJ\*mm/ha\*h) año 2009

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.3. Factor de cobertura vegetal C

#### 3.3.3.1. Descarga de imágenes satelitales

Lo que se usó para el cálculo de este factor serán imágenes satelitales del LandSat 7 que se descargó de la página de earth explorer.

Para descargar las imágenes primero ubicamos la zona de estudio encerrándola en un polígono.



Figura 3.61 Ubicación de la zona de estudio en la página USGS

Fuente: Elaboración propia (USGS)

Luego de eso nos dirigimos a data sets donde seleccionaremos el satélite con el que trabajaremos

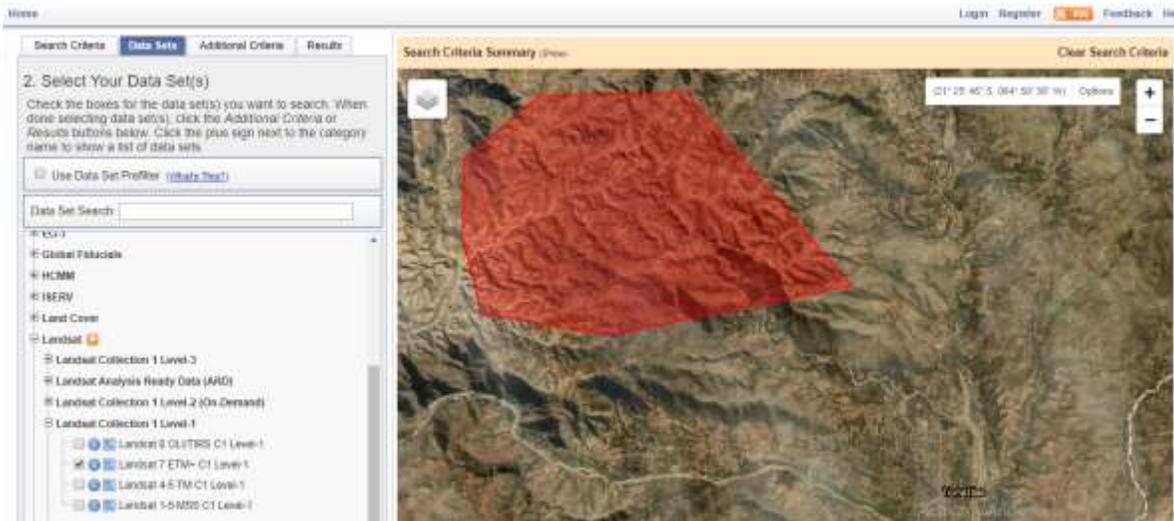


Figura 3.62 Selección del LandSat 7

Fuente: Elaboración propia (USGS)

En la sección de Additional Criteria escogemos el grado de nubosidad

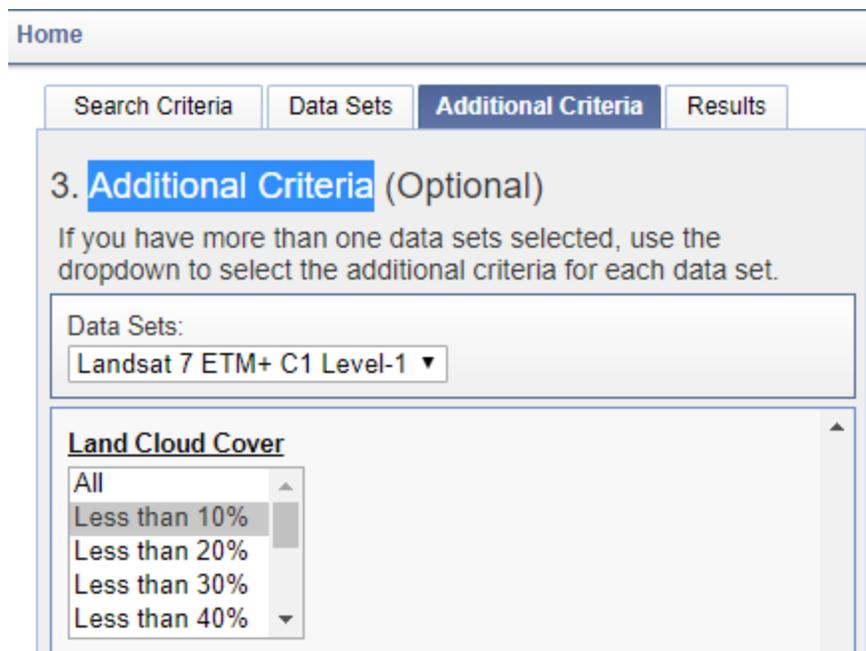


Figura 3.63 Nubosidad de las imagenes satelitales

Fuente: Elaboración propia (USGS)

Y el horario en el que fue tomada la foto, en nuestro caso seleccionamos que nos muestre solo las imágenes tomadas durante el día ya que las correcciones que se realizaran más adelante están en función a la luz solar.

**3. Additional Criteria (Optional)**

If you have more than one data sets selected, use the dropdown to select the additional criteria for each data set.

Data Sets:  
Landsat 7 ETM+ C1 Level-1 ▼

Level TGI  
Level 1GS ▼

**Scan Line Corrector**  
All ▲  
SLC-on (1999-2003)  
SLC-off (2003-present) ▼

**Day/Night Indicator**  
All ▲  
Day  
Night ▼

**Sun Elevation**  
[ ] to [ ]

Figura 3.64 Selección del indicador “Día”

Fuente: Elaboración propia (USGS)

Luego de realizar las respectivas configuraciones nos dirigimos a la sección de results donde podremos observar que cada imagen tiene una fecha que es el momento en el que fue tomada, de las que descargaremos una imagen por año bajo el criterio que la fecha sea cercana a la máxima lluvia mensual anual calculada, esto es porque esa lluvia es la que produce una mayor erosividad y la vegetación que se encontraba en esos meses es la que tuvo que soportar tal fenómeno.

Search Criteria   Data Sets   Additional Criteria   **Results**

### 4. Search Results

If you selected more than one data set to search, use the dropdown to see the search results for each specific data set.

**Note:** You must be logged in to download and order scenes

Show Result Controls ▾

Data Set [Click here to export your results »](#)

Landsat 7 ETM+ C1 Level-1 ▾

« First < Previous 1 ▾ Next > Last »

Displaying 1 - 10 of 129 ⓘ

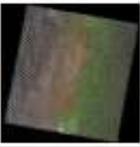
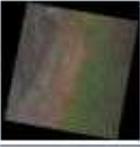
1		<p>ID:LE07_L1TP_231075_20191101_20191127_01_T1            Acquisition Date:01-NOV-19            Path:231            Row:75</p> 
2		<p>ID:LE07_L1TP_231075_20190930_20191026_01_T1            Acquisition Date:30-SEP-19            Path:231            Row:75</p> 

Figura 3.65 Imágenes localizadas y que pueden descargarse

Fuente: Elaboración propia (USGS)

### 3.3.3.2. Corrección de las bandas

El archivo en el que se descargan las 8 bandas espectrales es winrar el cual contiene un archivo MTL que nos da información sobre el día juliano, elevación del sol, etc.

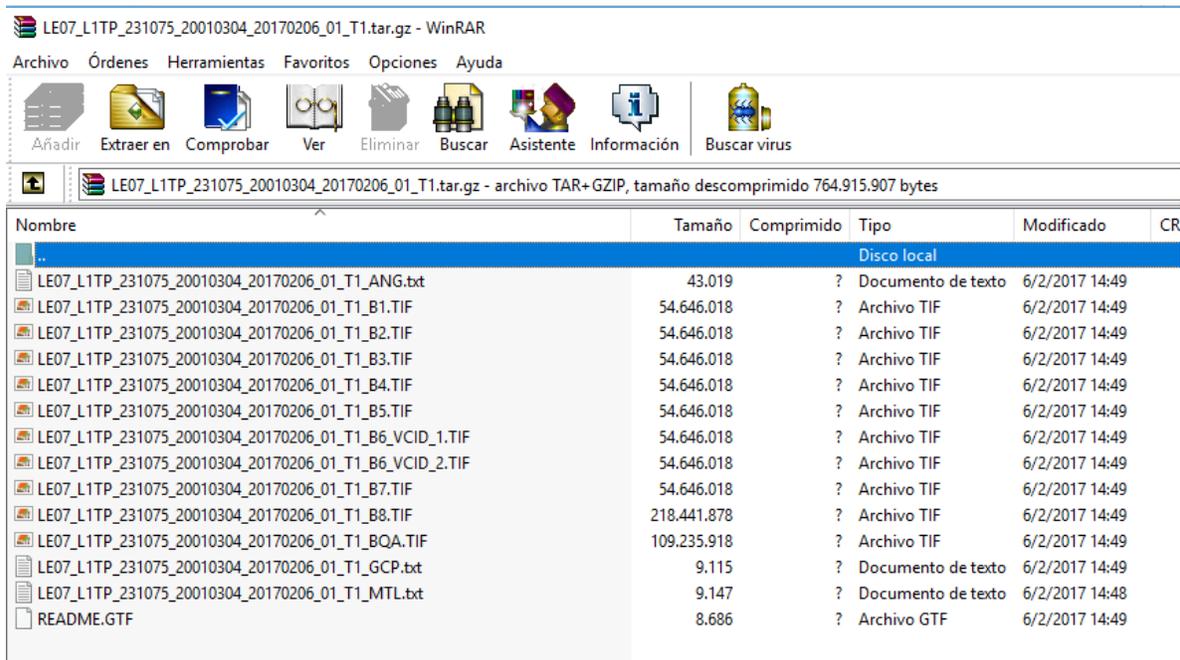


Figura 3.66 Archivo WinRAR

Fuente: Elaboración propia

Las bandas descargadas a partir del año 2003 se encuentran dañadas, esto es debido a un error mecánico del satélite LandSat 7 que a pesar de los esfuerzos de la NASA por solucionarlo fue imposible, lo que provocó un error en las bandas espectrales como el de la ausencia de números digitales o valores nulos.

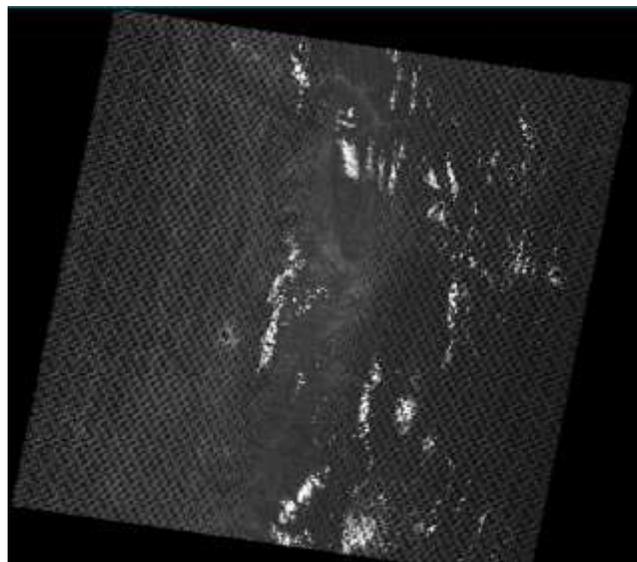


Figura 3.67 Banda con errores de valor nulo

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Ya que el error mecánico no pudo ser solucionado, la NASA desarrollo diversos programas o extensiones para los programas más utilizados en el área ingenieril como son Arc Map o Envi, que pueden ser obtenidos de la siguiente página (Nasa, n.d.).

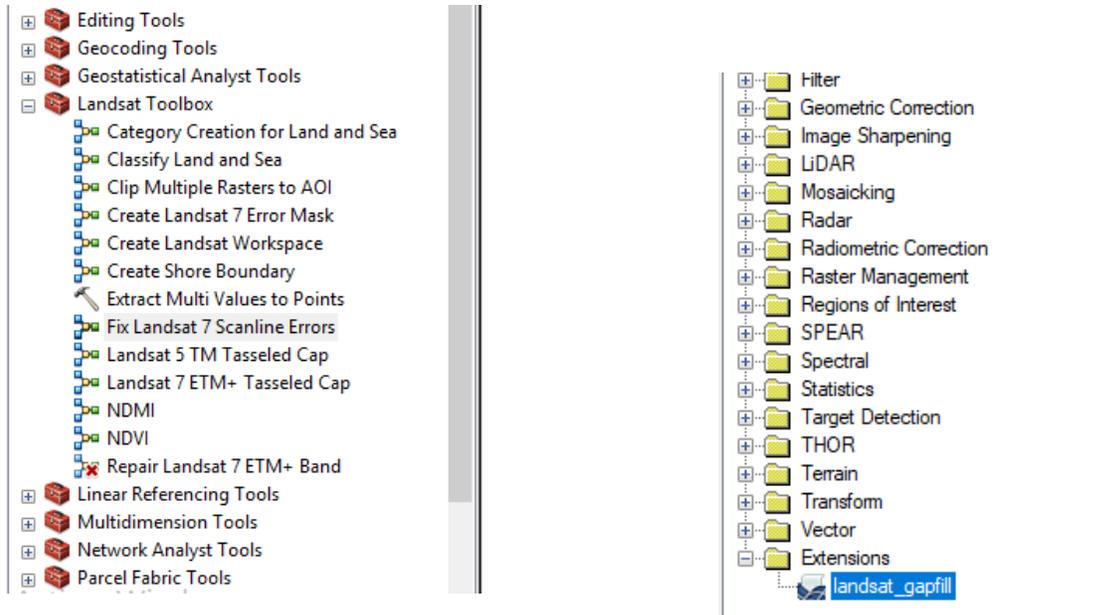


Figura 3.68 Extensiones Arc Map y ENVI

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.3.3. Por una facilidad de manejo se usa el programa ENVI

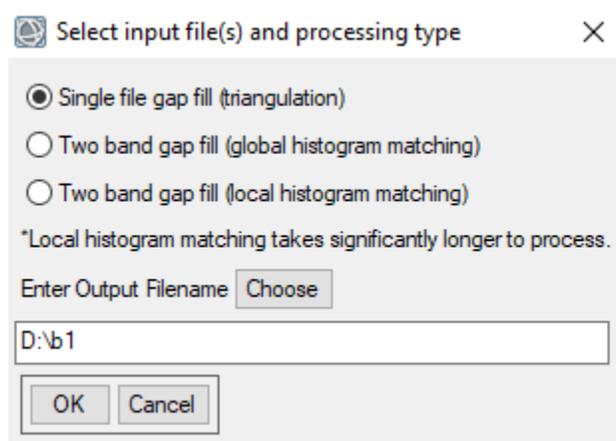


Figura 3.69 Manejo en ENVI

Fuente: Elaboración propia (ENVI)

Donde:

Las primeras 3 opciones son el método con el que se quiere rellenar los datos faltantes usando el método de interpolación por triangulación.

Choose = El lugar y el nombre con el que se guardara el archivo corregido.

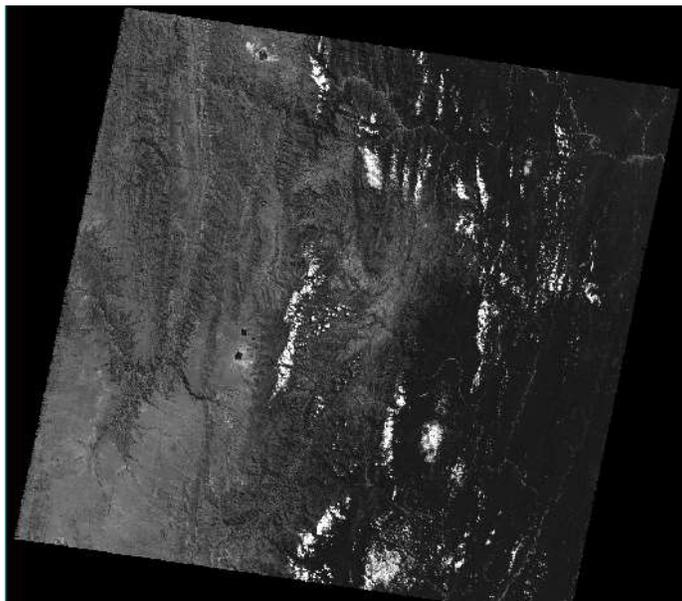


Figura 3.70 Banda corregida con ENVI

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

La facilidad de este programa tiene una interfaz que permite enviar el archivo corregido Arc Map.

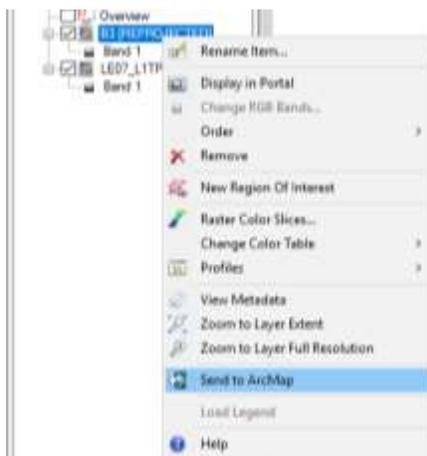


Figura 3.71 Exportar archivo de ENVI a Arc Map

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

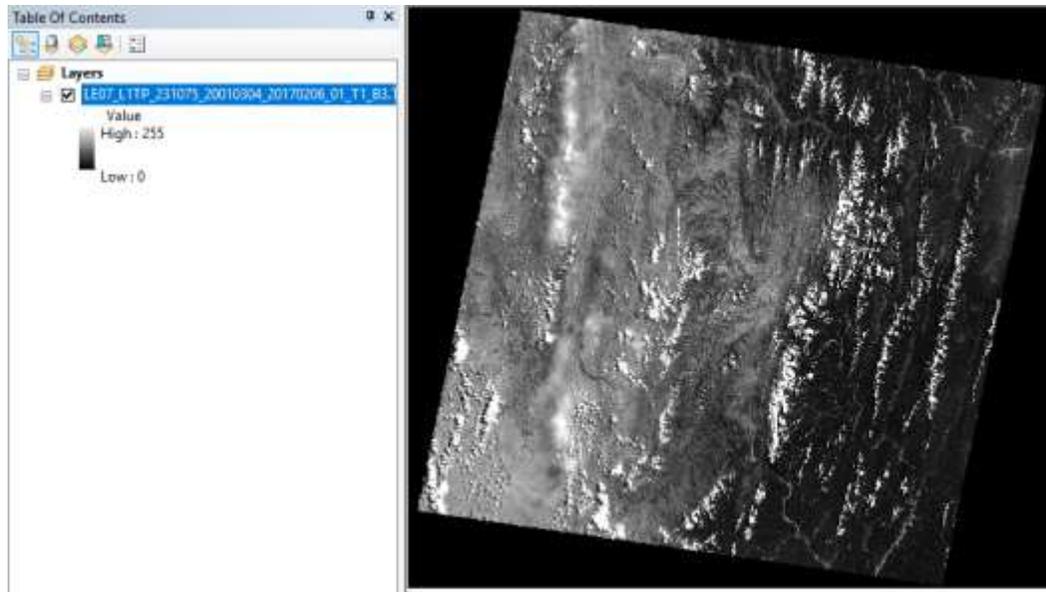


Figura 3.72 Banda exportada a Arc Map

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

A partir de este punto los procedimientos de corrección y cálculo de las bandas descargadas del LandSat 7 son iguales a antes de su desperfecto tomando en cuenta que solo se corregirán y trabajarán las bandas 3 y 4.

También debido a que los cálculos y métodos que se realizarán posteriormente serían muy complicados y/o morosos para facilitarlos un poco se crearan diversos model builder que juntan dos o más herramientas en Arc Map cuya forma de creación se explicaran de modo superficial, ya que ese no es el objetivo de la presente tesis.

#### **3.3.3.4. Recorte y proyección**

Para evitar que se trabaje con toda la banda descargada se recorta solamente el área de la zona en estudio con ayuda del archivo SHP de la delimitación de la cuenca y ese se re proyecta a la zona 20 sur ya que la proyección de la banda es de 20 norte.

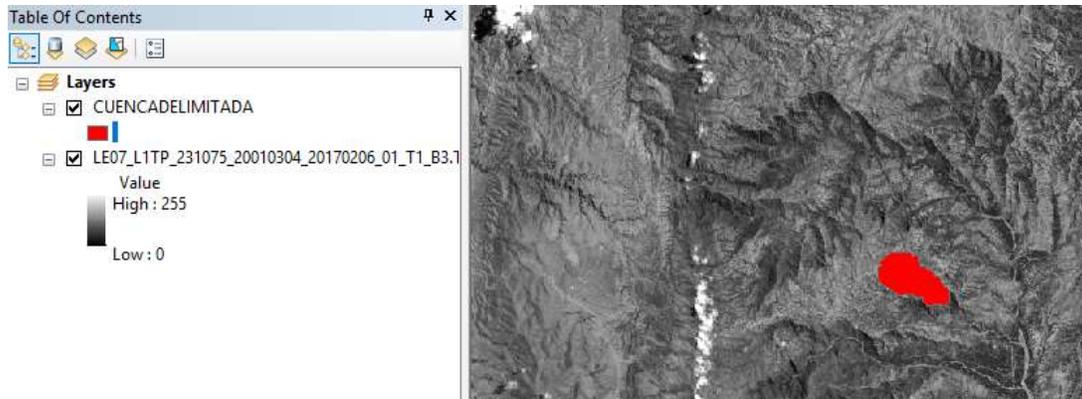


Figura 3.73 Ubicación de la cuenca en la banda

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Para esto se utilizará el siguiente model builder.

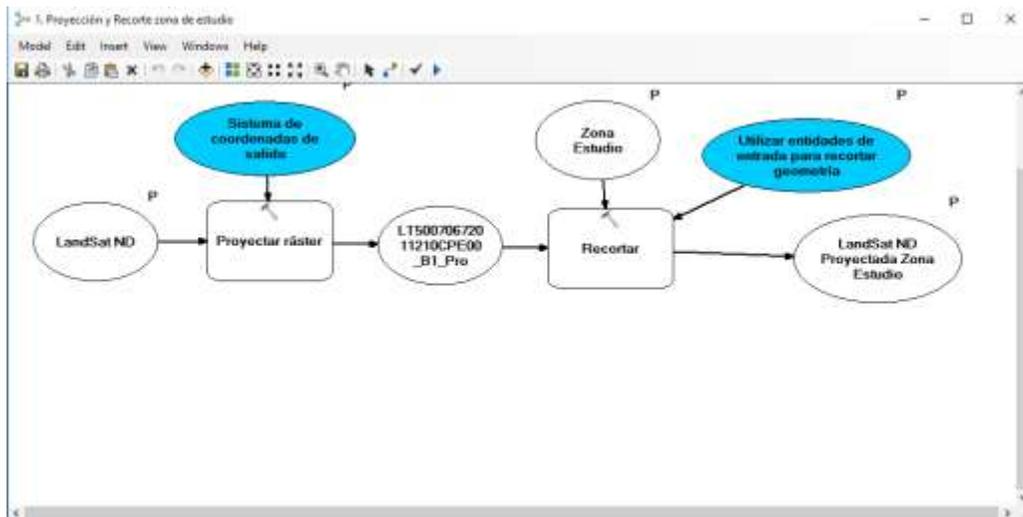


Figura 3.74 Model builder para recorte y proyección

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Siendo proyectar ráster y recortar herramientas de Arc Map y los otros parámetros configuraciones que se realizan a dichas herramientas.

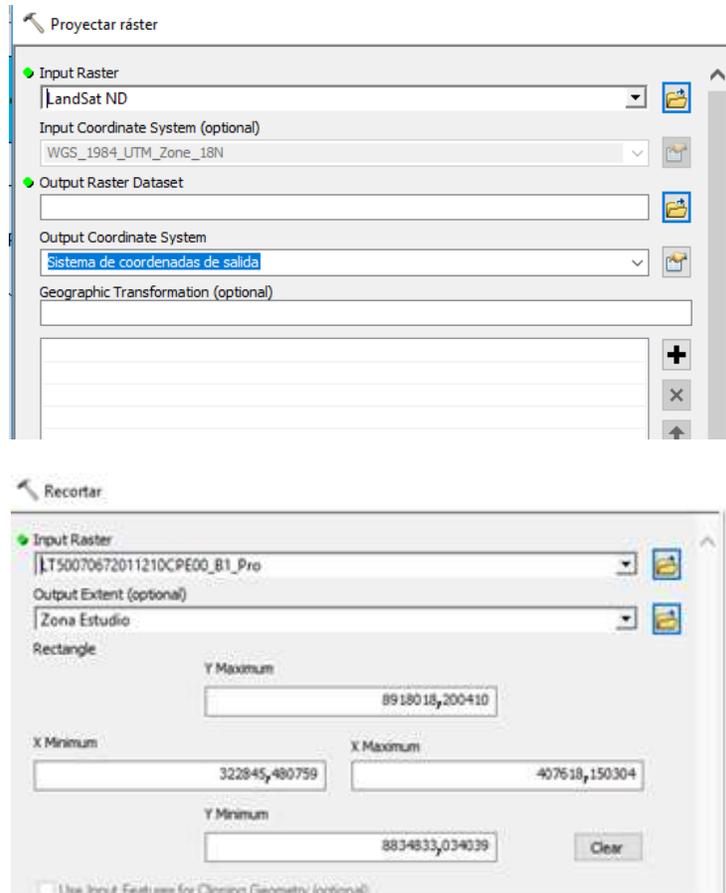


Figura 3.75 Herramientas que contendrá el model builder

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Obteniendo la nueva herramienta recorte y proyección de la zona de estudio.

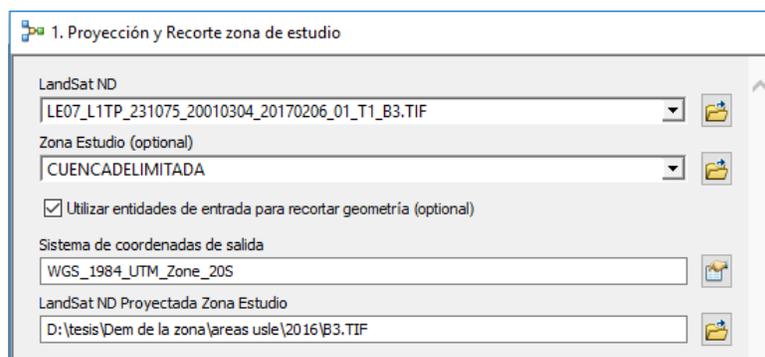


Figura 3.76 Herramienta creada con el model builder para proyectar

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde:

LandSat ND = Banda descargada sin errores en números digitales.

Zona Estudio = Cuenca delimitada en formato SHP.

Al utilizar entidades de entrada se escoge una opción que permite que al realizar el proceso este se recorte en función al perímetro de la cuenca y no de sus coordenadas extremas.

Sistema de coordenadas de salida = Coordenadas con las que se trabajaran.

LandSat ND Proyectada Zona de Estudio = Ubicación y nombre del archivo que se recortara y proyectara (B<sub>n</sub>.TIF).

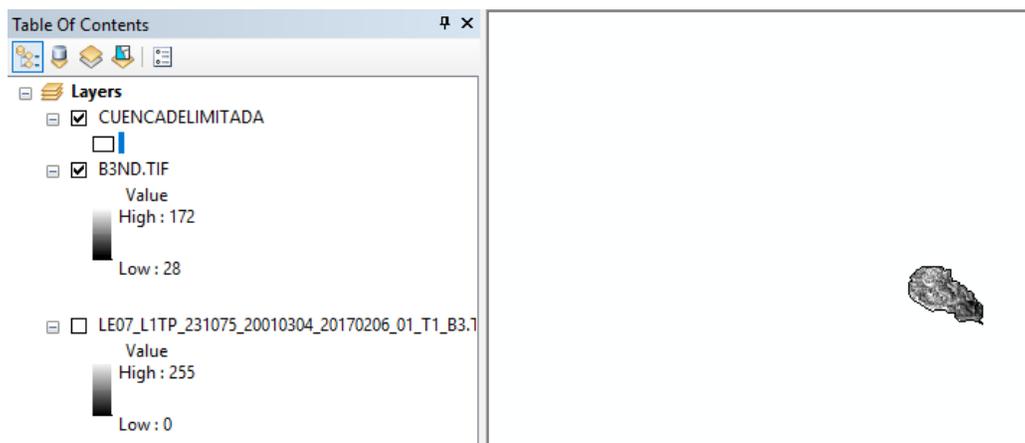


Figura 3.77 Raster recortado

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.3.5. Conversión de números digitales a radiancia

$$L_{\lambda} = \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Qcalmax - Qcalmin} \right) (Qcal - Qcalmin) + LMIN_{\lambda}$$

$$L_{\lambda} = \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{254} \right) (DN - 1) + LMIN_{\lambda}$$

El model buider creado será:

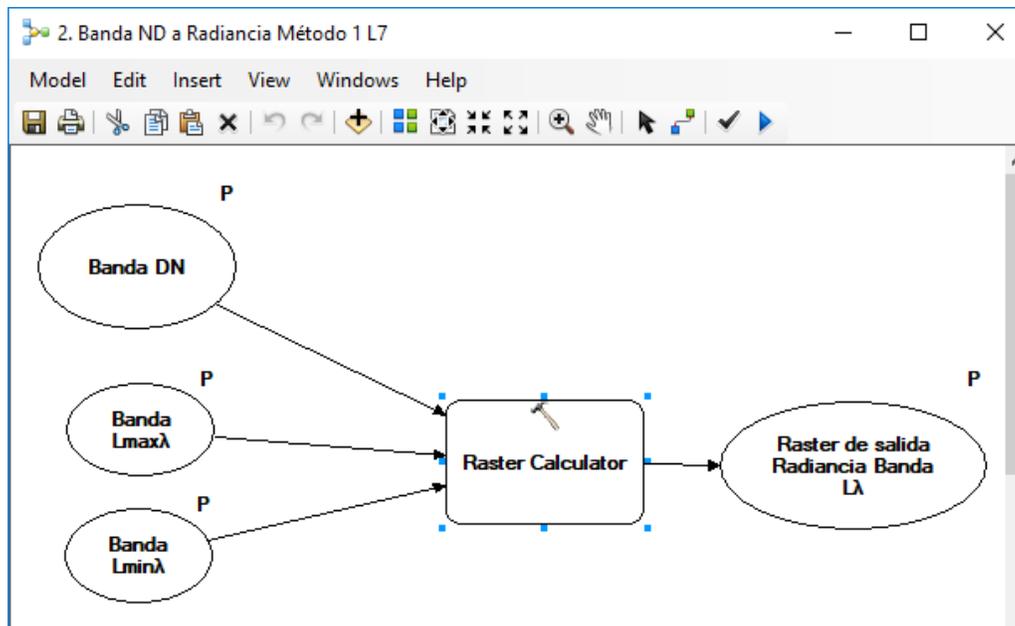


Figura 3.78 Model builder para convertir ND a radiancia

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Siendo raster calculator donde se insertará la ecuación planteada y el resto los parámetros que se necesitan insertar.

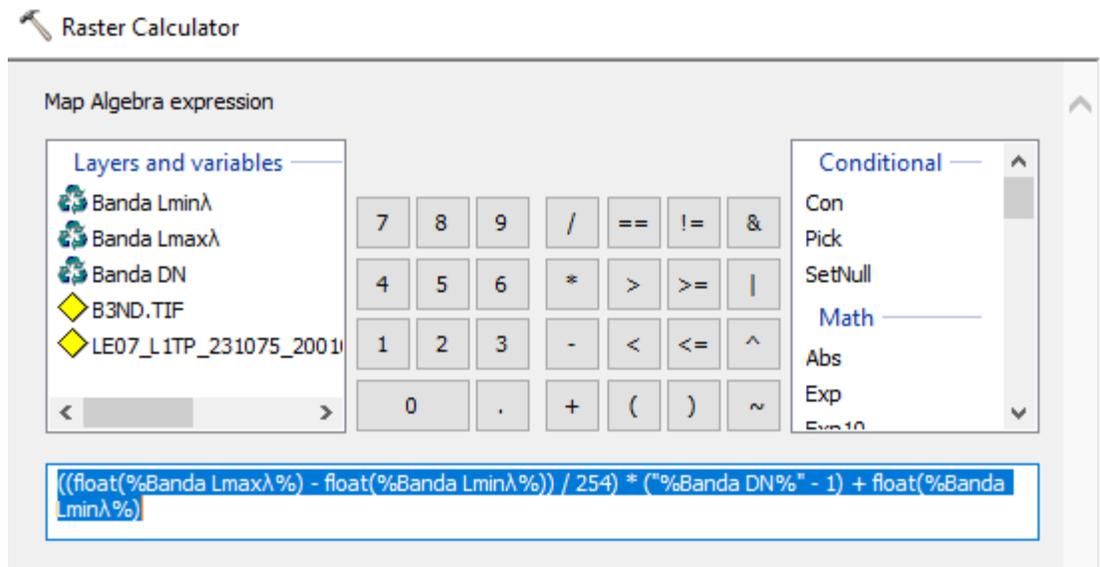


Figura 3.79 Herramientas usadas para el Model Buillder

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Quedando la nueva herramienta:

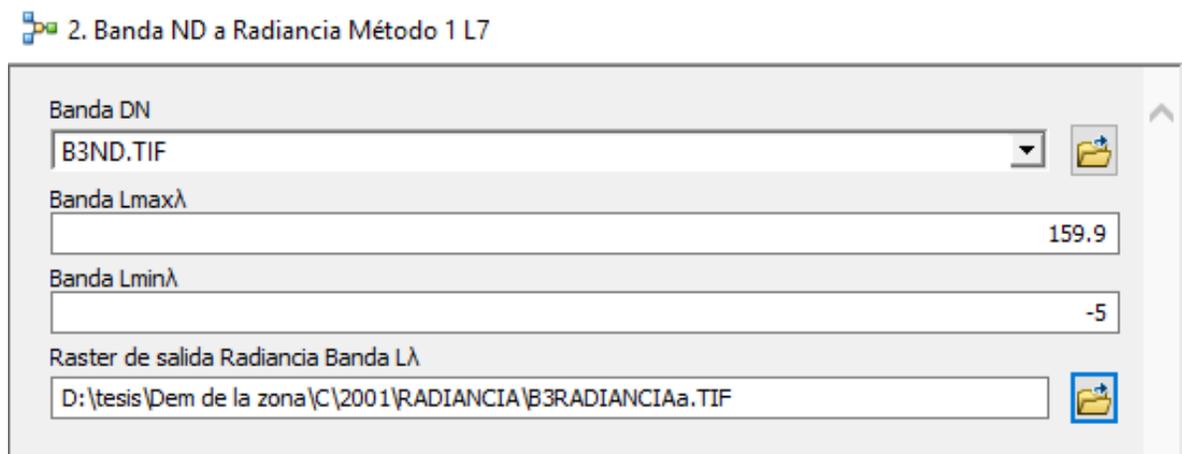


Figura 3.80 Herramienta model builder para convertir ND a radiancia

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde:

Banda DN = Banda recortada en ND.

Banda LMAX $\lambda$  = Radiancia espectral correspondiente a Qcalmax.

Banda LMIN $\lambda$  = Radiancia espectral correspondiente a Qcalmin.

Estos últimos dos parámetros vienen en el archivo MTL descargado junto con las bandas, este puede ser abierto con WordPad o con el programa LandSat Tools V1.0.34 que es proporcionado en el curso de geomática ambiental de teledetección de imágenes satelitales.

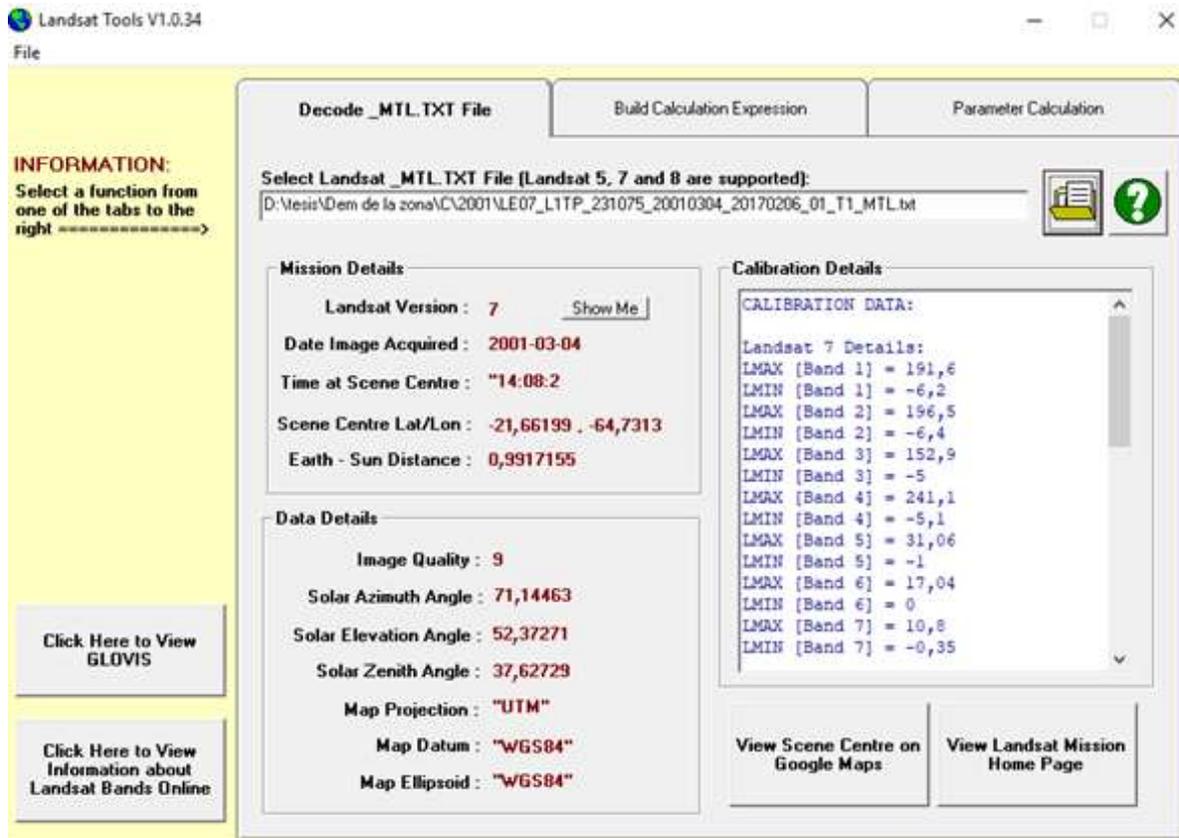


Figura 3.81 MTL leídos con la herramienta Landsat Tools

Fuente: Elaboración propia (Landsat Tools)

Obteniendo así la radiancia solar de la banda trabajada.

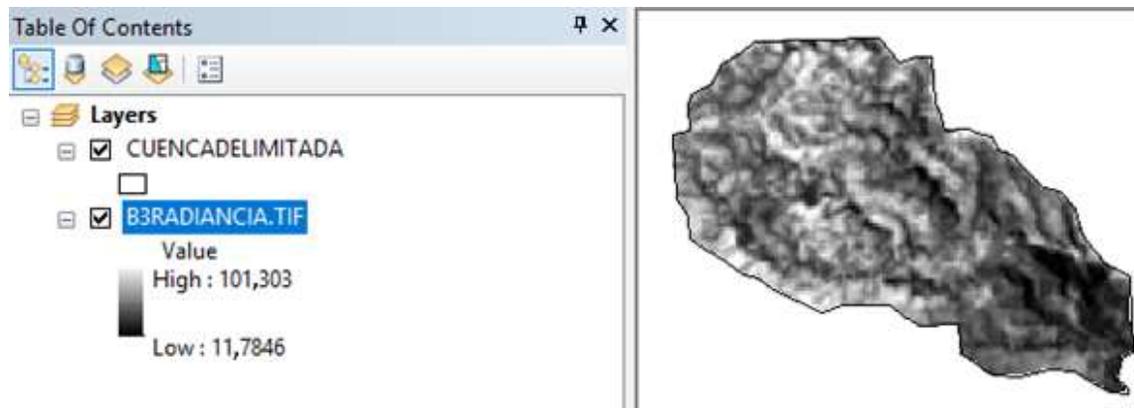


Figura 3.82 Radiancia de la banda

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.3.6. Cálculo de la bruma

Este es un cálculo que se realiza previo al de la conversión de radiancia a reflectancia ya que este es utilizado en dicha fórmula, para lo cual se creó su model builder, por tanto, se establecen los parámetros que se necesitan para crear dicha herramienta.

$$\text{Efecto bruma} = \text{ML} * \text{ND}_{\min} + \text{AL} - 0,01 * \frac{\text{ESUN}_{\lambda} * \text{SEN}_{(\theta\text{SE})}}{\pi * d^2}$$

Donde:

ML: Factor Multiplicativo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de banda)

AL: Factor Aditivo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de banda).

```
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 7,7874E-01
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 7,9882E-01
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 6,2165E-01
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9,6929E-01
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 1,2622E-01
RADIANCE_MULT_BAND_6_VCID_1 = 6,7087E-02
RADIANCE_MULT_BAND_6_VCID_2 = 3,7205E-02
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 4,3898E-02
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 9,7559E-01
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -6,97874
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -7,19882
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -5,62165
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -6,06929
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -1,12622
RADIANCE_ADD_BAND_6_VCID_1 = -0,06709
RADIANCE_ADD_BAND_6_VCID_2 = 3,16280
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -0,39390
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -5,67559
```

Figura 3.83 MTL leídos con WordPad

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

ESUN<sub>λ</sub>: Irradiancia Media Solar exo-atmosférica (Tablas).

θSE: Ángulo local de elevación del sol. El ángulo de elevación del centro del escenario en grados se proporciona en los metadatos (SUN\_ELEVATION).

d: Distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresada en Unidades Astronómicas (Calculado según una fórmula en función del día juliano).

El día juliano es proporcionado directamente en los metadatos que para obtenerlo de una forma más fácil es mejor abrirlo con wordpad siendo el día juliano el número que se encuentra entre el año de las bandas descargadas y la palabra CUB.

```
GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
  ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
  REQUEST_ID = "0501702052266_09635"
  LANDSAT_SCENE_ID = "LE72310752001063CUB00"
  LANDSAT_PRODUCT_ID = "LE07_L1TP_231075_20010304_20170206_01
  ..
```

Figura 3.84 Ubicación del día juliano en el MTL

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde la distancia tierra-sol queda como:

$$d = 1 + 0,0167 * \text{SEN}((2 * \pi * ((63 - 93,5))) / 365) = 0,991629262$$

ND<sub>min</sub>: Valor digital mínimo para la cual se crea un raster constante con el valor mínimo de la banda recortada, utilizando la herramienta raster creation del Arc Map.

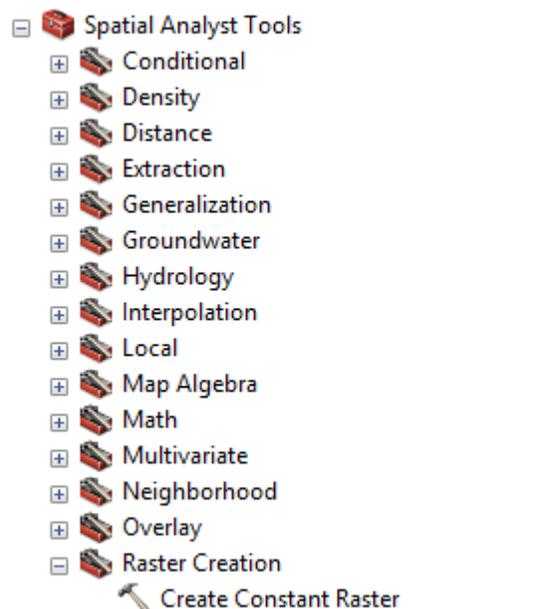


Figura 3.85 Ubicación de la herramienta de raster constante

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

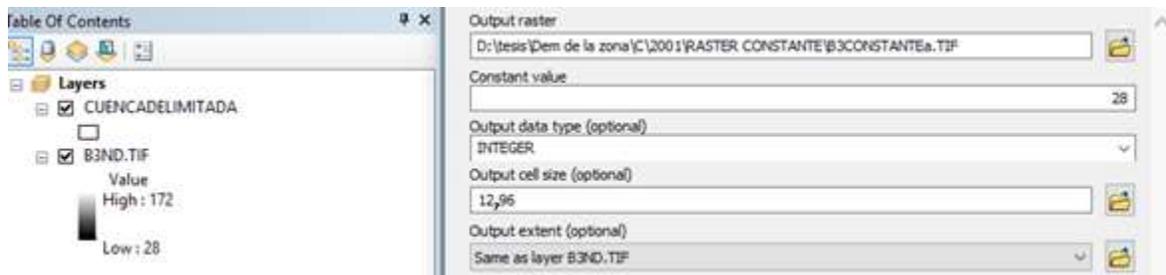


Figura 3.86 Uso de la herramienta de raster constante

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde:

Output raster = Donde y el nombre con el que se guardará el archivo (x.TIF).

Constante value = Valor mínimo de los ND del raster recortado.

En este procedimiento también se realiza el proceso extendido al usar las coordenadas de la banda proyectada al igual que una máscara en función a la delimitación de la cuenca, pero como ya fue explicado ese procedimiento se obviará esa explicación.

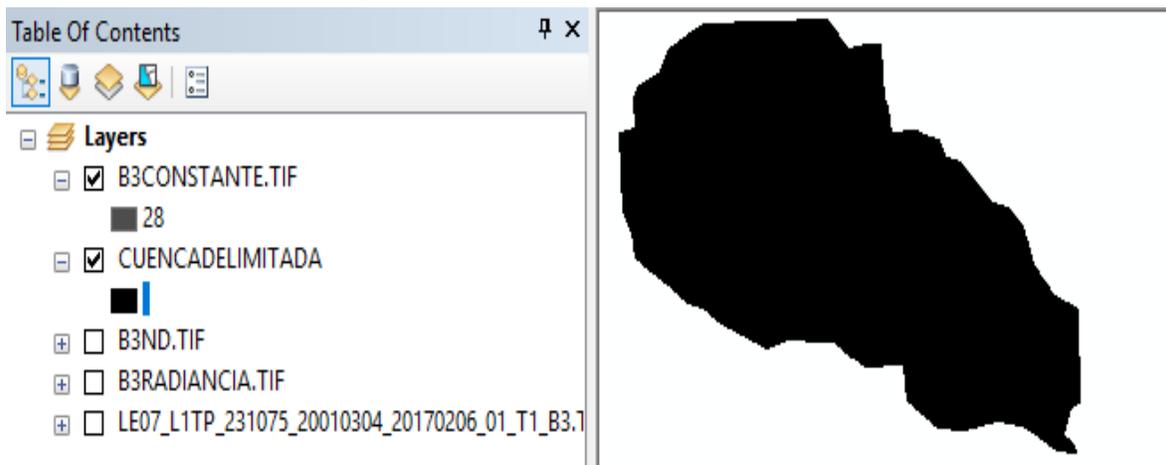


Figura 3.87 Raster constante creado

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Model builder creado.

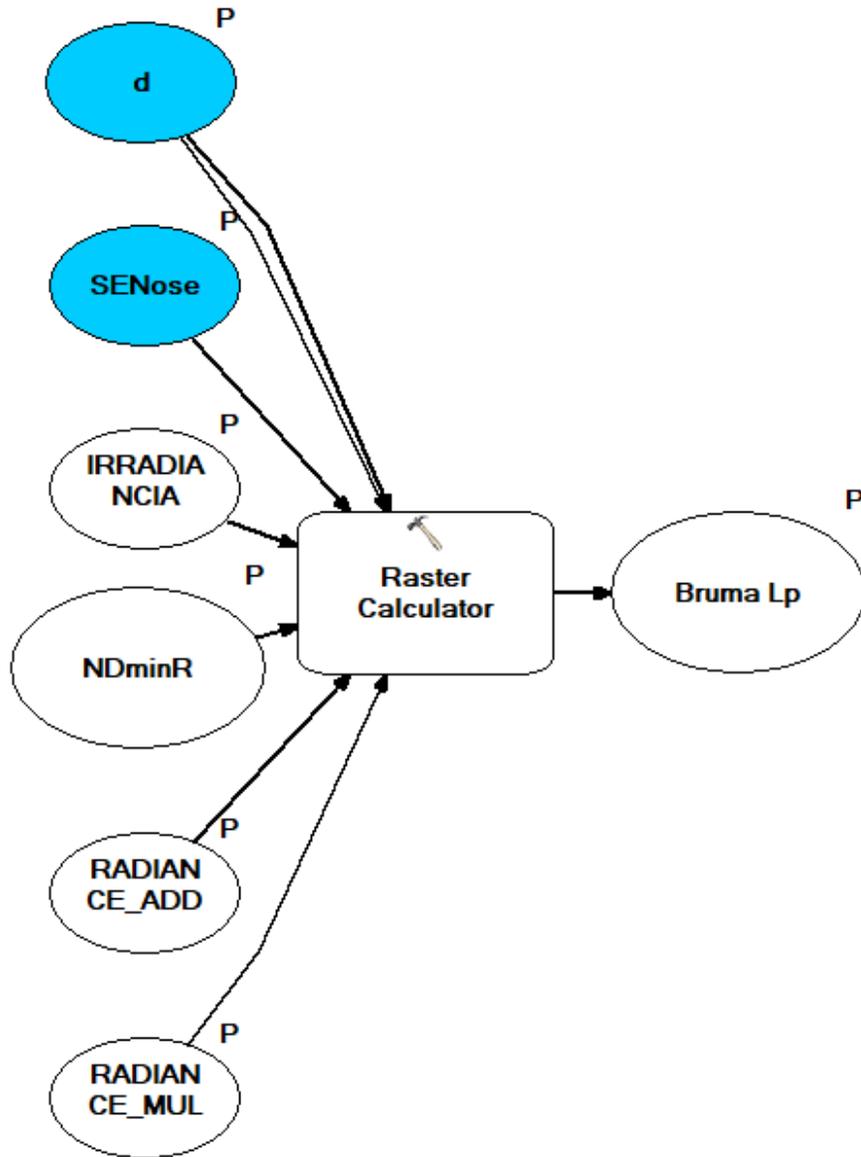


Figura 3.88 Model builder para el efecto bruma

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde en raster calculator se inserta la ecuación de la bruma.

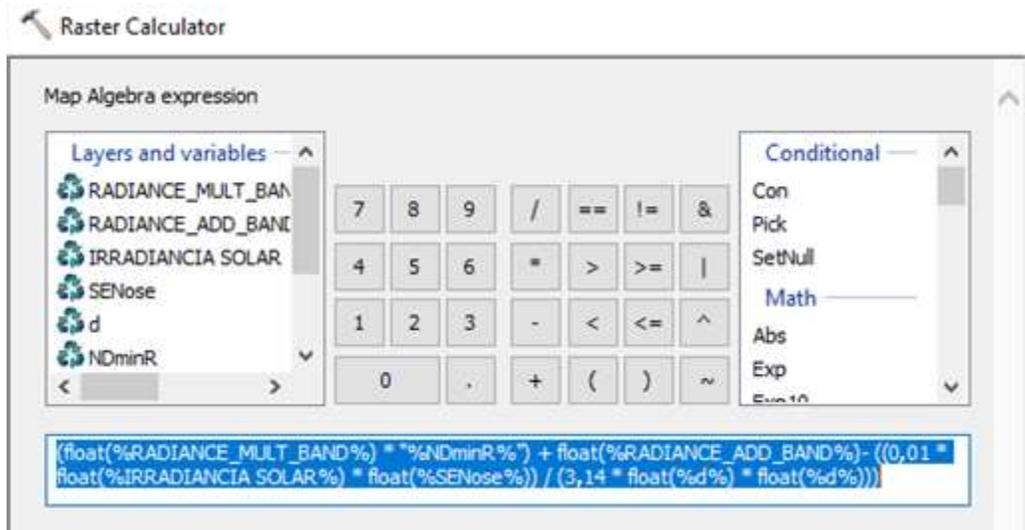


Figura 3.89 Herramientas usadas para el model builder

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Quedando la nueva herramienta creada de la siguiente forma:

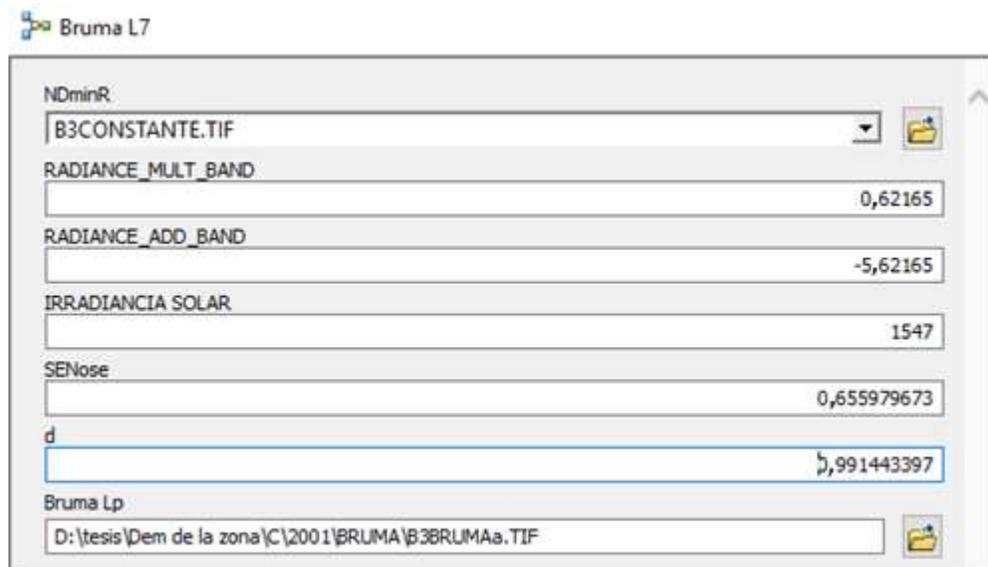


Figura 3.90 Model builder para el cálculo del efecto bruma

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

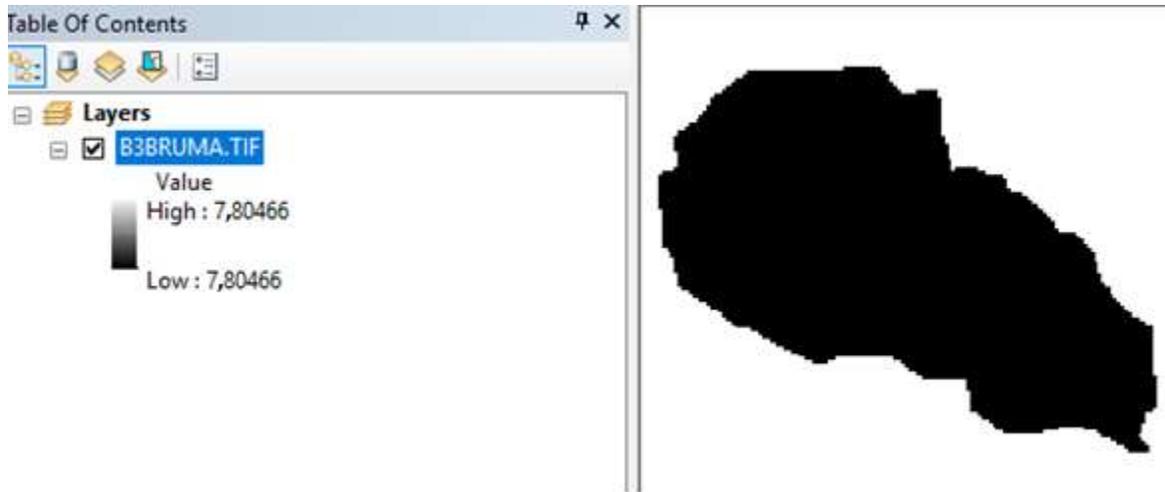


Figura 3.91 Efecto bruma calculado

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3.7. Cálculo de radiancia a reflectancia con corrección atmosférica

$$P_s = \frac{\pi * (L_\lambda - L_p) * d^2}{T_v * [(ESUN_\lambda * SEN_{(\theta SE)} * T_z) + E_{down}]}$$

Donde:

$L_p$ : Es el efecto bruma, en inglés Path radiance.

$L_\lambda$ : Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).

$d$ : Distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresada en Unidades Astronómicas (Calculado según una fórmula en función del día juliano).

$ESUN_\lambda$ : Irradiancia Media Solar exo-atmosférica.

$E_{down}$ : Es la irradiancia difusa descendiente, se considera igual a cero.

$T_v$ : Es la transmitancia de la atmósfera en la dirección de visión.

$T_z$ : Es la transmitancia atmosférica en la dirección de iluminación.

$\theta SE$ : Ángulo local de elevación del sol. El ángulo de elevación del centro del escenario en grados se proporciona en los metadatos (SUN\_ELEVATION).

Para determinar la transmisividad “ $T_v$ ” y “ $T_z$ ”, se va calcular con el espesor óptico para dispersión de Rayleigh propuesto por Kaufman en 1989.

$$\tau_r = 0,00856\lambda^{-4}(1 + 0,0113\lambda^{-2} + 0,00013\lambda^{-4})$$

$$T_v = \exp\left(\frac{\tau_r}{\cos(\theta_v)}\right)$$

$$T_z = \exp\left(\frac{\tau_r}{\sin(\theta_z)}\right)$$

Donde:

$\lambda$ : Valor promedio del rango espectral de la banda.

$\tau_r$ : Espesor óptico para dispersión de Rayleigh.

$\theta_z$ : Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a:  $90^\circ - \theta_{SE}$

$\theta_v$ : El ángulo de observación del sensor, entonces el ángulo es  $0^\circ$  y  $\cos(0^\circ) = 1$

<b>DAY</b>		63							
<b>SUN_ELEVATION</b>		52,37271227							
<hr/>									
<b>EARTH_SUN_DISTANCE (d)</b>	0,991629262	0,9914							
<b>SEN(θE)</b>	0,791998965								
<hr/>									
<b>CALCULO DE TRANSMISIVIDAD</b>									
Banda	Sensor	Rango espectral		$\lambda$ (μm)	$T_{\lambda r}$	$T_{\lambda v}$	$T_{\lambda z}$	$T_{\lambda v} T_{\lambda z}$	
		Min	Max						
1	Blue	TM - ETM+	0,45	0,52	0,485	0,162672146	0,84986978	0,81432609	0,69207113
2	Green	TM - ETM+	0,52	0,61	0,565	0,087172305	0,91651916	0,895774846	0,82099481
3	Red	TM - ETM+	0,63	0,69	0,66	0,046362496	0,95469583	0,943141852	0,90041359
4	Near Infrared (NIR)	TM - ETM+	0,76	0,9	0,83	0,018356958	0,9818105	0,977088539	0,95931579
5	SWIR 1	TM - ETM+	1,55	1,75	1,65	0,001160916	0,99883976	0,998535269	0,99737673

Figura 3.92 Cálculo de la transmisividad

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Por tanto, el model builder quedará así:

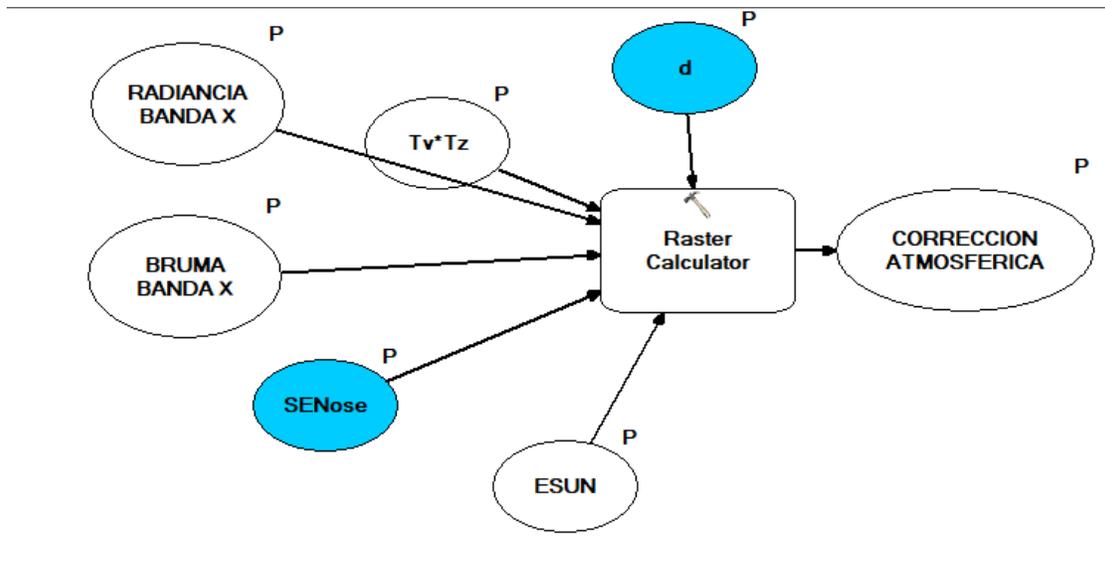


Figura 3.93 Model Builder para el cálculo de radiancia a reflectancia

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde en raster calculator se insertará la ecuación ya planteada tomando en cuenta los parámetros necesarios.

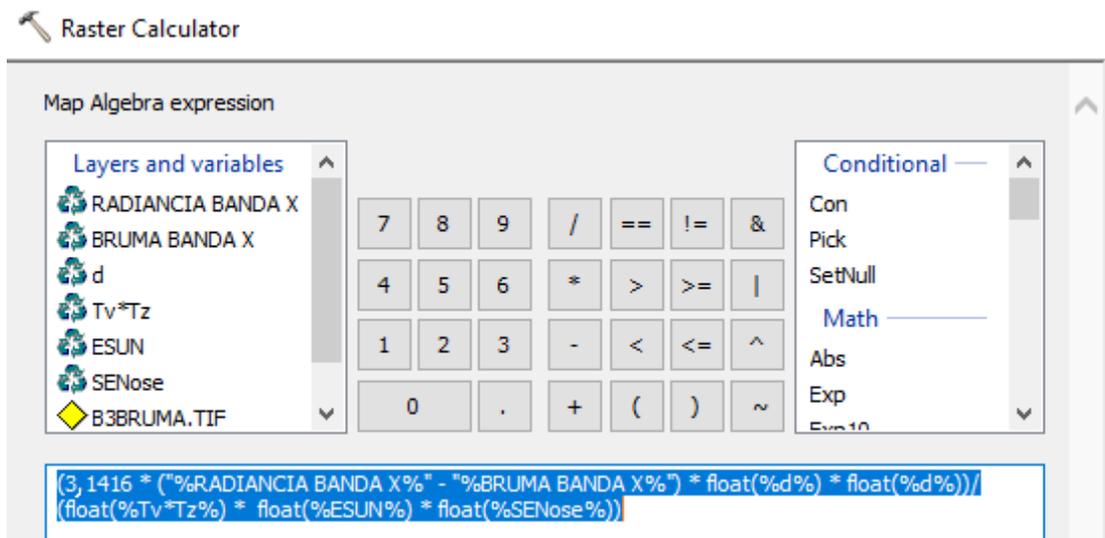


Figura 3.94 Model builder para el cálculo del efecto bruma

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Obteniendo la nueva herramienta de trabajo:

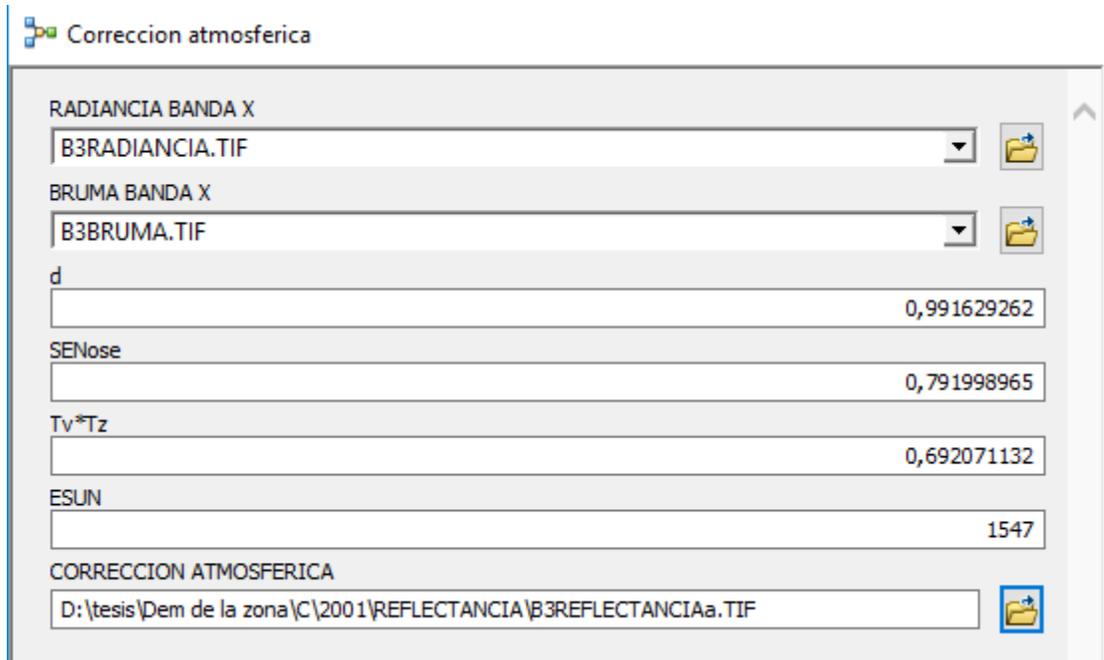


Figura 3.95 Herramienta creada para el cálculo de e radiancia a reflectancia

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.3.8. Cálculo del NDVI

Usado para proporcionar una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas.

Para LandSat 5,7

$$NDVI = \frac{(pS_{B4} - pS_{B3})}{(pS_{B4} + pS_{B3})}$$

Todo el procedimiento anterior se repite y se obtiene la reflectancia de la banda 4 ya que esta fórmula está diseñada para reflectancias.

Para este cálculo también se realiza un model builder.

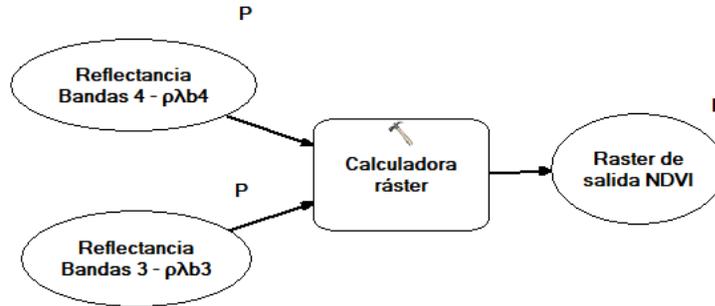


Figura 3.96 Model builder para el cálculo del NDVI

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Insertando en Calculadora ráster la ecuación requerida.

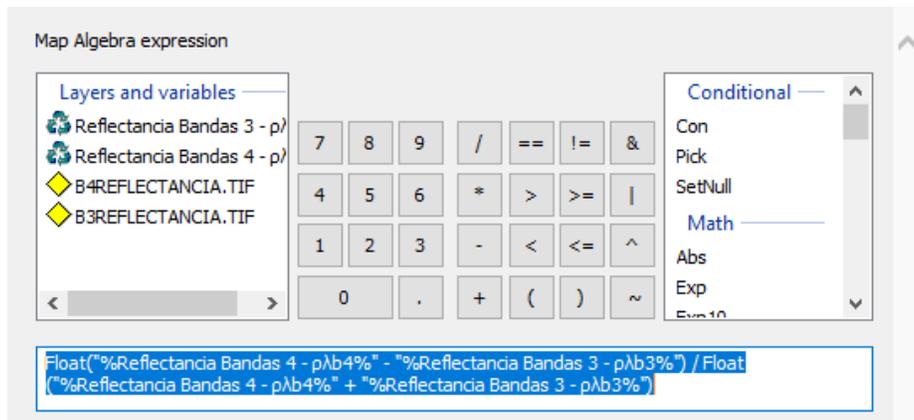


Figura 3.97 Herramienta usada en el model builder para el cálculo del NDVI

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Obteniendo así nuestra herramienta:

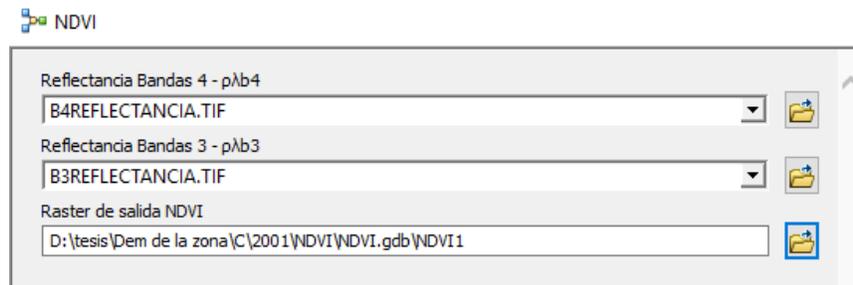


Figura 3.98 Herramienta creada para el cálculo del NDVI

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Obteniendo así las zonas cobertura vegetal y zonas descubiertas.

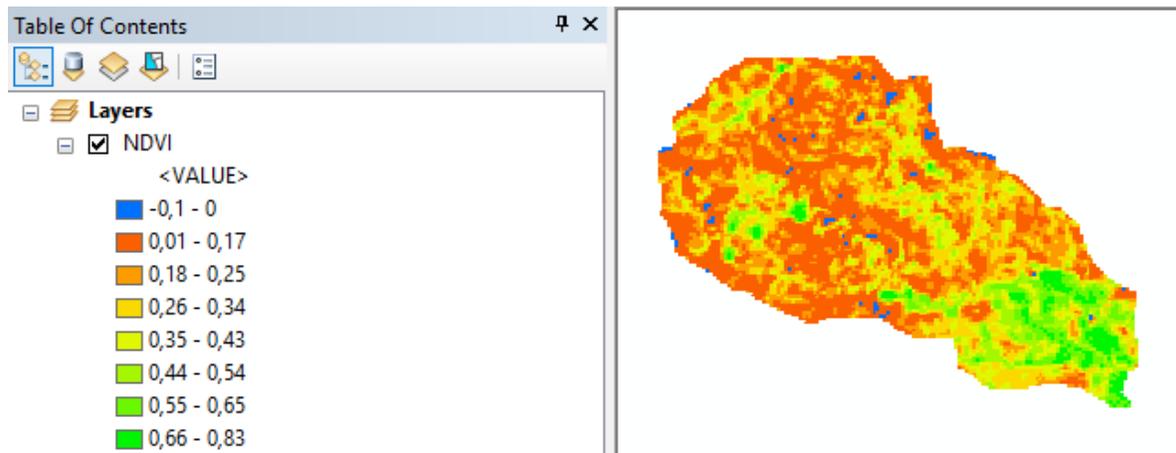


Figura 3.99 NDVI “Índice de vegetación” calculado (adimensional)

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.3.9. Cálculo del factor de cobertura vegetal C

El factor c es un factor de minoración es decir que donde exista una mayor cobertura vegetal habrá una menor erosividad y viceversa por tanto el factor c podrá asumirse que es igual a 1 menos el NDVI tomando en cuenta que los ríos o formaciones de agua tienen un valor negativo hasta cero y por tanto debe de uniformizarse ese valor lo que puede hacerse usando la calculadora raster, usando la siguiente condición: De todos los valores mayores a cero sean los mismos pero los valores negativos sean iguales a cero.

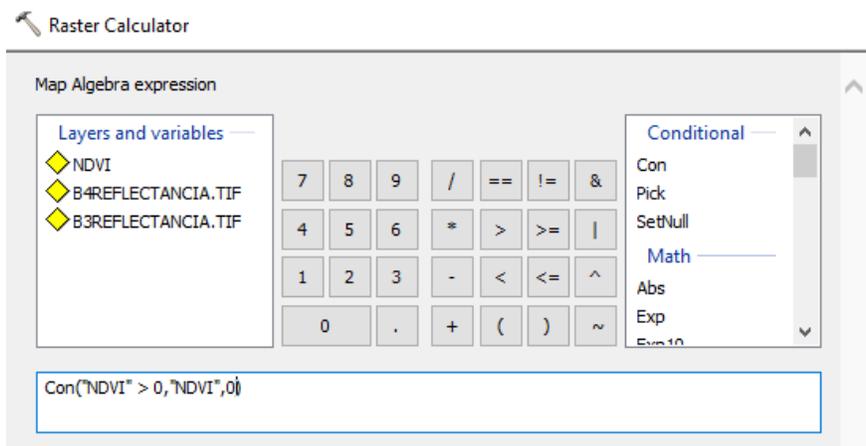


Figura 3.100 Uniformizando el valor de las fuentes de agua

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

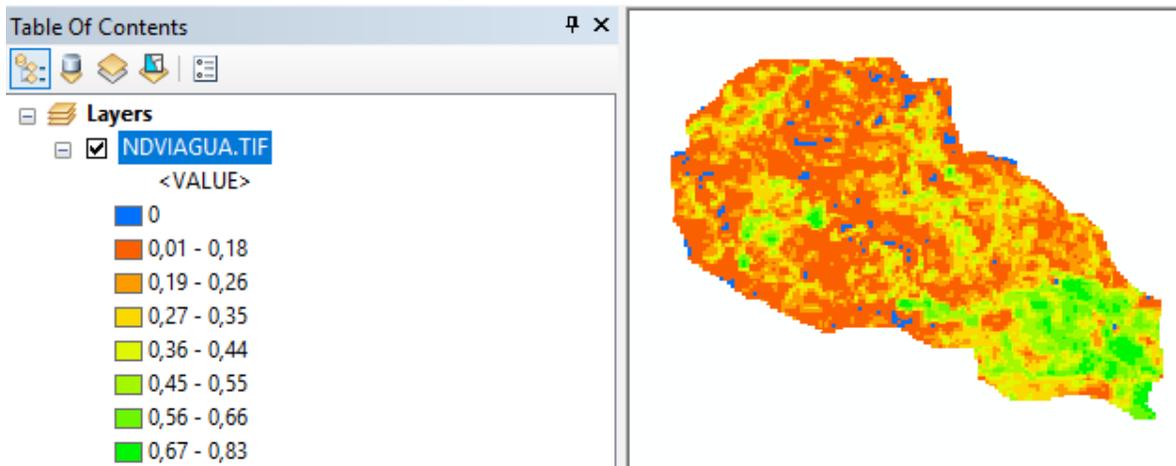


Figura 3.101 Fuentes de agua con valor único

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Una vez teniendo el valor de los ríos uniformizado se procede al cálculo del coeficiente  $c$  bajo la siguiente condición: Todos los valores menos 1 excluyendo a los valores del río.

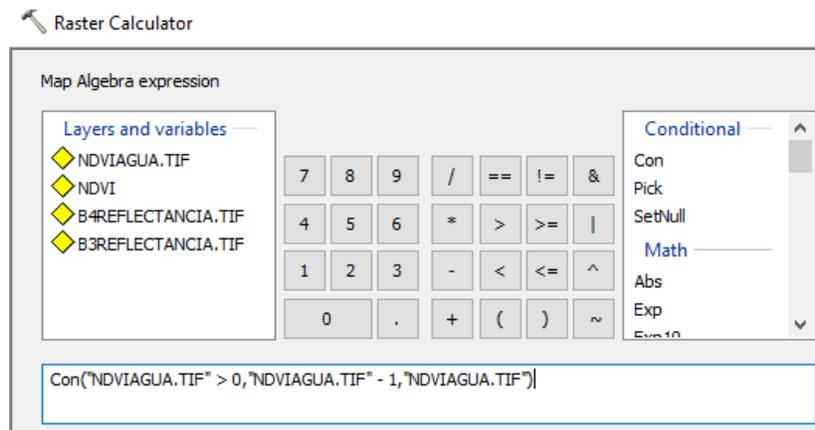


Figura 3.102 Cálculo del coeficiente C

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

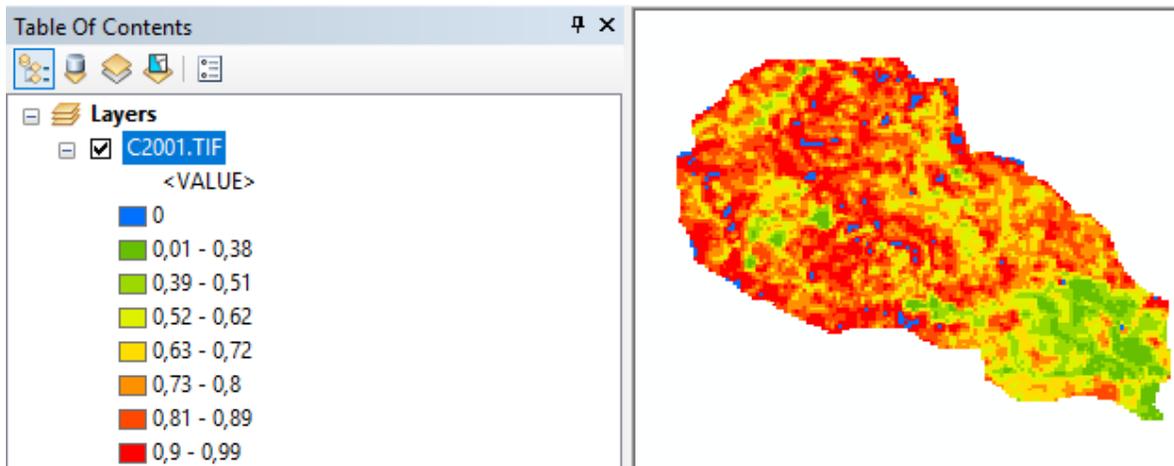


Figura 3.103 Coeficiente C calculado (Adimensional)

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.4. Cálculo del factor de prácticas de conservación P

Al no existir un registro de proyectos de reforestación o movimientos de suelo de la zona que reduzcan la erosión este factor puede asumirse como 1.

### 3.3.5. Cálculo de la erosividad anual USLE

Usando la calculadora raster se superponen los factores calculados.

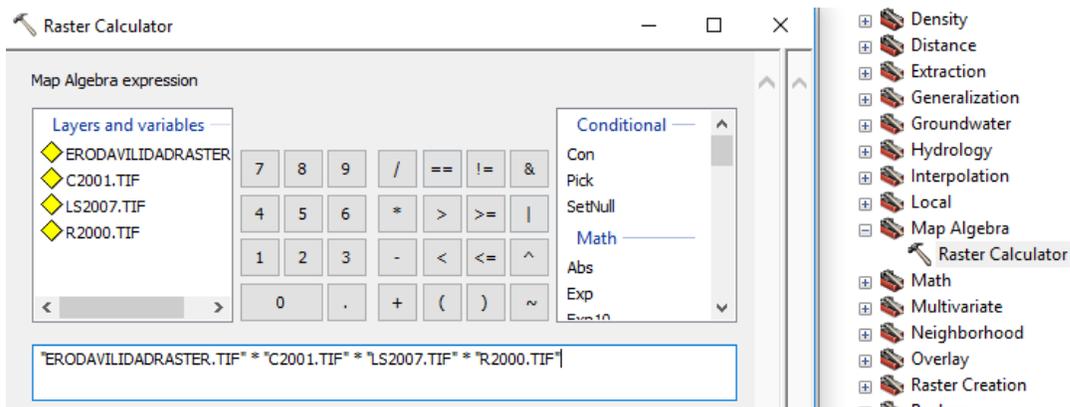


Figura 3.104 Cálculo del USLE

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Obteniendo así el raster USLE:

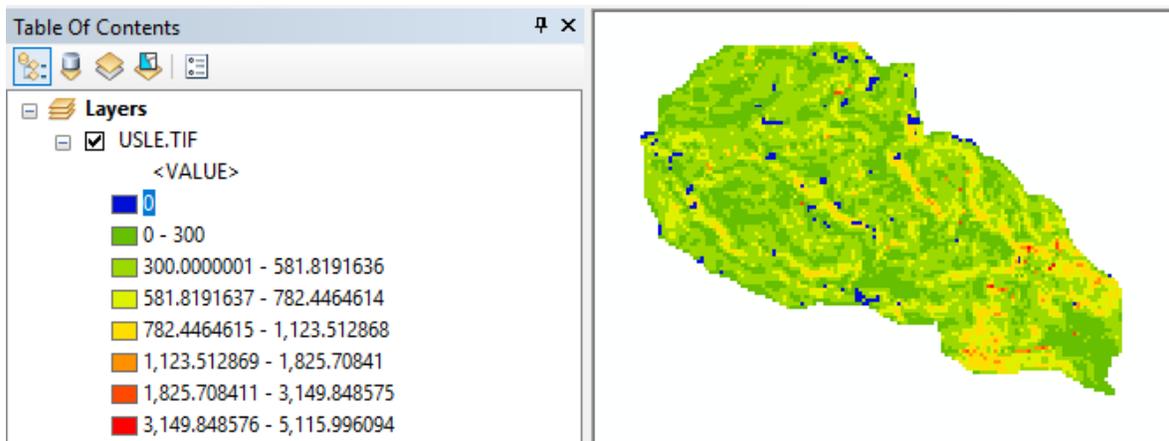


Figura 3.105 USLE método 1 (Tn/ha\*año) año 2000

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Cabe notar que como se tienen 3 coeficientes de lluvia R se calcularán 3 USLE y se realizará una comparación entre ellas, para identificar cual se adapta mejor a nuestros requerimientos de cálculo.

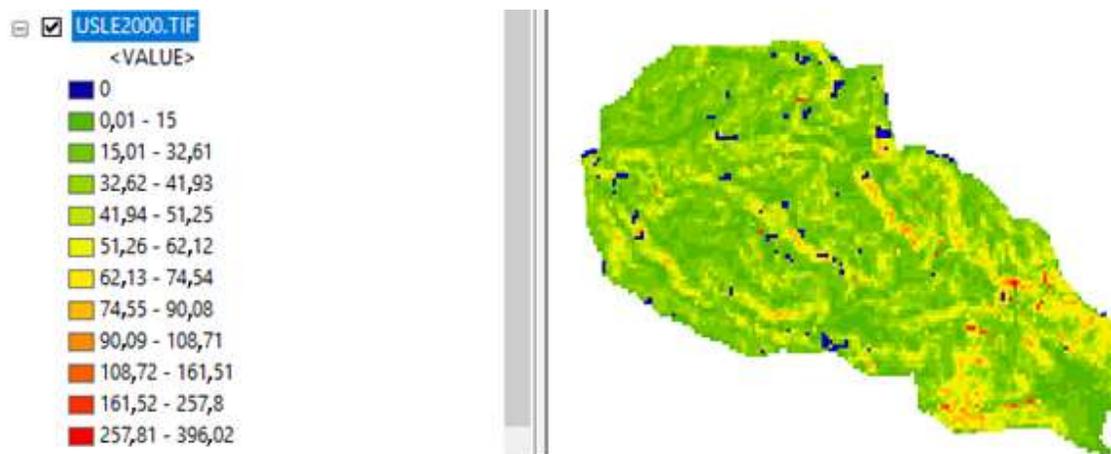


Figura 3.106 USLE método 2 (Tn/ha\*año) año 2000

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

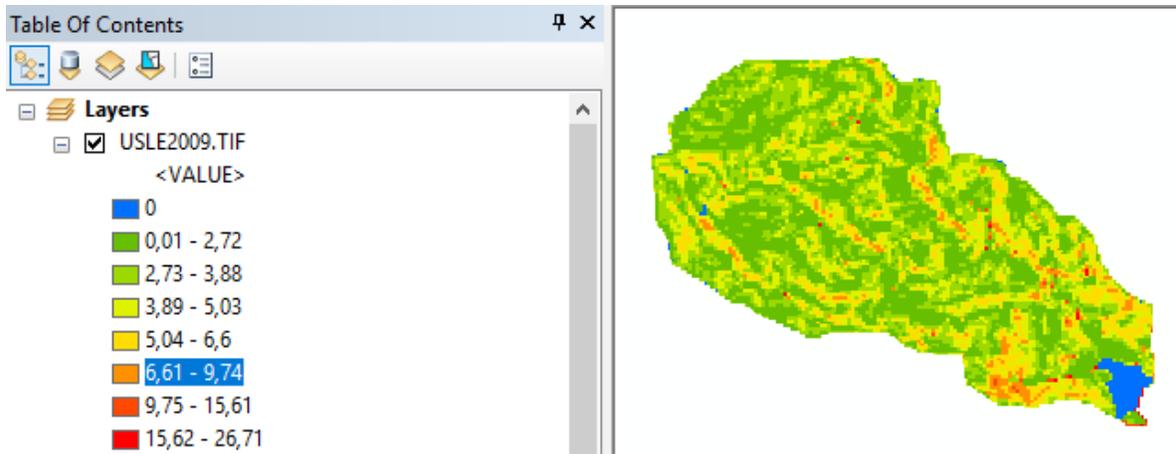


Figura 3.107 USLE método 3 (Tn/ha\*año) año 2009

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

### 3.3.6. Cálculo de las áreas

Para el cálculo de esto se realizó la creación de un model builder.

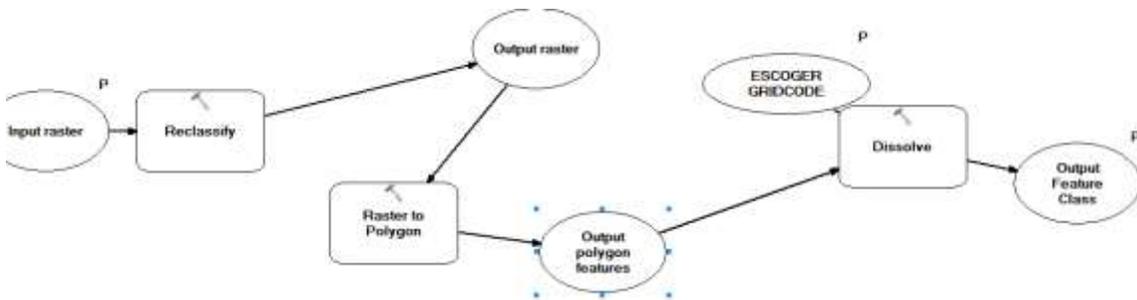


Figura 3.108 Model builder creado para el cálculo de las áreas de los raster

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

En la que se usan las herramientas reclassify, raster to polygon y dissolve para la conversión de las zonas que poseen un mismo valor a polígonos.

Quedando la nueva herramienta de la siguiente forma:



Figura 3.109 Model builder para el cálculo de las áreas

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde:

Input raster = Raster USLE.

Output Feature Class = Nombre de salida y ubicación de archivo.

Escoger Gridcode = seleccionar el gridcode por defecto del Arc Map.

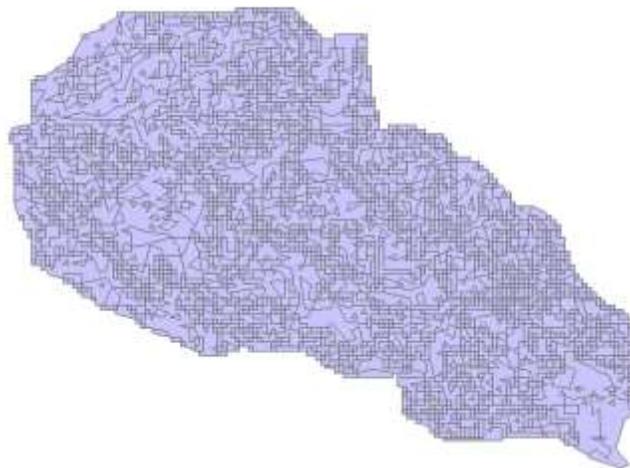


Figura 3.110 Archivo SHP que contiene las áreas

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

En la tabla de atributos se obtienen los valores de área.

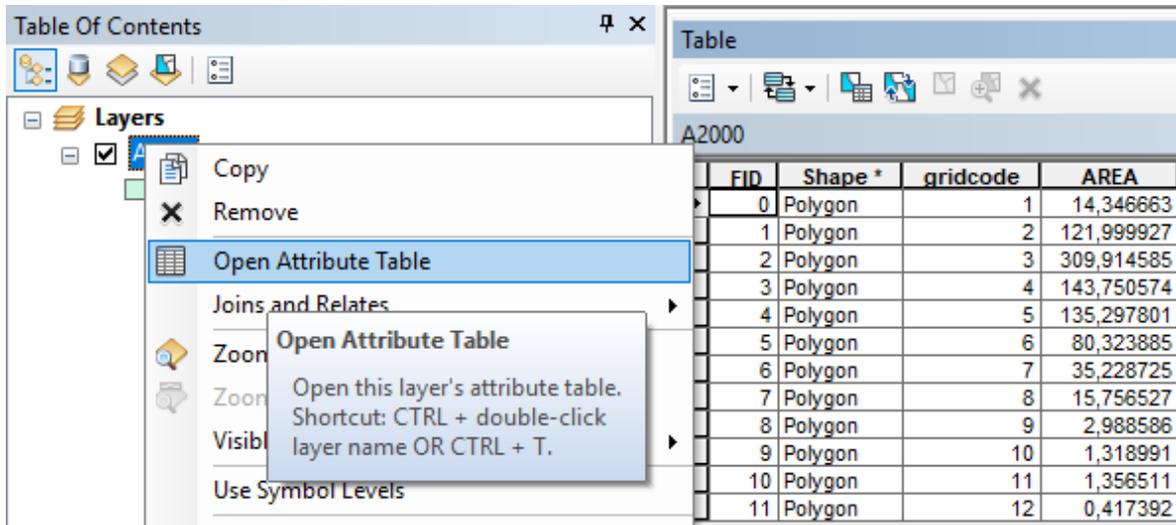


Figura 3.111 Tabla de atributos del SHP creado

Fuente: Elaboración propia (ArcGis)

Donde consideramos los valores de gridcode como las posiciones señaladas anteriormente.

### 3.3.7. Cálculo del volumen de suelo erosionado

Volumen de sedimentos = Peso en toneladas / Peso específico del suelo

Tabla 3.4 Volumen de suelo erosionado

Año	2000	Peso en toneladas del suelo erosionado durante el año 2000	Peso específico	Volumen Sedimentos
USLE (Tn/ha/año)	Área (ha)		(Tn/m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )
0,00	14,32	0,00	1,1	0,00
15,00	114,97	1724,55	1,1	1567,78
32,61	317,69	10360,81	1,1	9418,92
41,93	169,57	7110,19	1,1	6463,80
51,25	126,12	6463,65	1,1	5876,05
62,12	69,94	4344,90	1,1	3949,91
74,54	31,92	2379,72	1,1	2163,38
90,08	12,21	1099,70	1,1	999,73
108,71	2,89	314,05	1,1	285,50
161,51	1,32	213,04	1,1	193,67
257,80	1,46	376,61	1,1	342,37
396,02	0,31	123,97	1,1	112,70
<b>Total</b>	<b>862,72</b>	<b>34511,19</b>	<b>1,1</b>	<b>31373,81</b>

Fuente: Elaboración propia

El peso específico es obtenido del proyecto de grado de “Análisis Técnico y Económico de Levantamientos Batimétricos por los Métodos Ecosonda y Perfilador Acústico Doppler de Corriente Aplicación Práctica: Presa la Hondura - Provincia Méndez - Departamento de Tarija” de la estudiante Wilma Verónica Carrazana Gallardo con la que se comparara el valor total de los volúmenes de sedimentos obtenidos por el método USLE con la medición directa de volumen muerto de que posee el embalse de la hasta inicios del 2019.

Tabla 3.5 Volúmenes actuales del embalse la Hondura

<b>Superficie obtenida con plano de referencia del año 2009</b>	
Volumen de almacenamiento:	1211758,32 m <sup>3</sup> = 1,212 Hm <sup>3</sup>
<b>Superficie obtenida con Q-Boat</b>	
Volumen de almacenamiento:	1179152,87 m <sup>3</sup> = 1,179 Hm <sup>3</sup>
Volumen de sedimentación:	20333,51 m <sup>3</sup> = 0,0203 Hm <sup>3</sup>
<b>Superficie obtenida con Z-Boat</b>	
Volumen de almacenamiento:	1205158,51 m <sup>3</sup> = 1,205 Hm <sup>3</sup>
Volumen de sedimentación:	20067,54 m <sup>3</sup> = 0,02007 Hm <sup>3</sup>

Fuente: Análisis técnico y económico de levantamientos batimétricos por los métodos ecosonda y perfilador acústico doppler de corriente aplicación práctica: presa la hondura

### 3.3.8. Cálculo de la erosividad anual con Erosión 6.0 (USLE modificado)

Para el uso de este programa se necesitó trabajar con los valores medios anuales de cada factor exceptuando el factor LS.

Para el cálculo del factor LS solo necesita la longitud del curso principal en metros y la pendiente promedio del río principal en %.

Longitud del curso principal = 6180 m

Pendiente promedio del rio principal = 9,74 %

Tabla 3.6 Valores medios de los factores R, K y C

2009					
R	Área	K	Área	C	Área
MJ*mm/ha*h	ha	Tn*h/MJ*mm	ha	Adimensional	ha
86,09	30,334	0,024790845	26,60	0	12,320
86,625	53,866	0,026496368	33,93	0,19	28,033
87,075	62,657	0,028201891	370,18	0,44	58,043
87,505	77,353	0,029846503	137,30	0,555	88,793
87,915	92,966	0,031704306	66,61	0,65	142,008
88,305	112,532	0,033836210	46,06	0,735	155,244
88,655	145,314	0,036120393	36,28	0,82	156,874
89,08	182,472	0,038404576	38,48	0,93	110,911
<b>R medio</b>		<b>K medio</b>		<b>C medio</b>	
88,119	<b>MJ*mm/ha*h</b>	0,02985645	<b>Tn*h/MJ*mm</b>	0,689	<b>Adim.</b>

Fuente: Elaboración propia

Resultado:  $A = R(88,119) \times K(0,030) \times L(18,063) \times S(1,129) \times P(1,000) \times C(0,689) = 37,0 \text{ Mg/ha.}$

**Factor R: Erosividad de la Lluvia**  
 Localidad: Ingresar el Factor Manualmente   
 Mercedes (Cor)   
 Factor R: **88,119**

**Factor K: Erodabilidad del Suelo**  
 Unidad / Suelo - CRSU76 1: 1.000.000 Ingresar el Factor Manualmente   
 Serie / Suelo - CRSU16 1: 40.000   
 Factor K: **.02985645**

**Factor LS: Longitud y Gradiente de la Pendiente**  
 Gradiente:   
 Longitud (Mts.)   
 Relación de erosión: **Mixto**  
 Factor L: **18,063**    Factor S: **1,129**    Factor LS: **20,393**

**Factor P: Práctica Mecánica de Apoyo**  
 Aplica práctica mecánica de apoyo?     Factor P: **1**  
 Indique la práctica mecánica de apoyo:     % cubierto por pastura:

**Factor C: Uso y Manejo**  
 Ingreso del Factor: Factor C:   
 Manual     Componentes     Pre Calculado

Selección de Factor C Pre Calculado:  
 Tipo de Sistema:   
 Sistema:

Nota: si se construyen terrazas, la longitud de la pendiente es la distancia entre terrazas

Si el valor de P se mantiene en 1 luego de ingresar los datos necesarios, es porque la longitud de su pendiente supera el máximo que dispone el modelo para la inclinación de pendiente con la que ud. está trabajando.

Figura 3.112 Ingreso de factores a Erosión 6.0

Fuente: Elaboración propia

## 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. USLE MÉTODO 1 CON R1 Y K1

Tabla 4.1 USLE anuales método 1

<b>Año</b>	<b>Volumen de sedimentos (m<sup>3</sup>)</b>
2000	403779,7
2001	479218,92
2002	309912,45
2003	338209,1
2004	167382,33
2005	382987,4
2006	242169,03
2007	313499,12
2008	691750,7
2009	271528,92
2010	319367,81
2011	376007,26
2012	269899,86
2013	157752,02
2014	92104,9
2015	232109,04
2016	94823,61

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2 Volúmenes actuales del embalse la Hondura

<b>Superficie obtenida con Q-Boat</b>	
Volumen de sedimentación:	20333,51 m <sup>3</sup> = 0,0203 Hm <sup>3</sup>
<b>Superficie obtenida con Z-Boat</b>	
Volumen de sedimentación:	20067,54 m <sup>3</sup> = 0,02007 Hm <sup>3</sup>

Fuente: Análisis técnico y económico de levantamientos batimétricos por los métodos ecosonda y perfilador acústico doppler de corriente aplicación práctica: presa la hondura

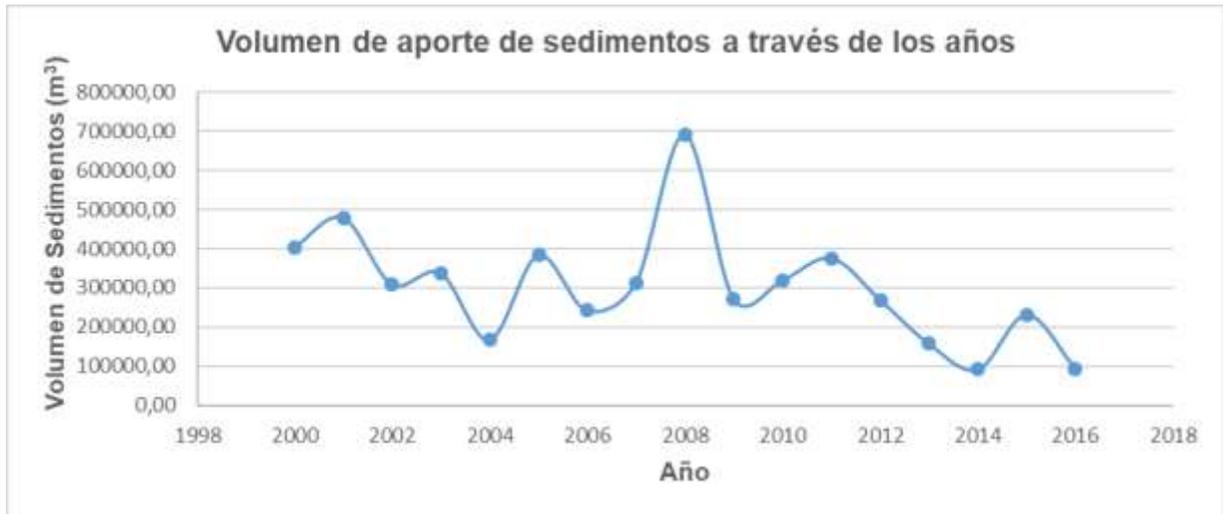


Figura 4.1 Volumen de suelo erosionado método 1

Fuente: Elaboración propia

Volumen total del 2009-2016 = 1813593,43 m<sup>3</sup>

Este método fue realizado con la primera ecuación propuesta por Arnoulds y con datos proporcionados por la FAO, pero al llegar a compararlo con el volumen del embalse de la queda totalmente descartado ya que el volumen de sedimento sobrepasa excesivamente el volumen de almacenamiento del embalse.

Solo se sumaron los resultados a partir del 2009 porque fue el año que empezó a funcionar el embalse y no se realizó el análisis con el K obtenido con muestras de suelo de la zona en la combinación con el R1, porque su valor es mucho mayor al de la FAO por tanto los datos se aumentarían siendo una combinación innecesaria y descartable para nuestros objetivos, además de no verse necesario realizar el análisis hasta el 2018 por su gran separación con el resultado real.

## 4.2. USLE MÉTODO 2 CON R2 Y K1

Tabla 4.3 USLE anuales método 2

<b>Año</b>	<b>Volumen de sedimentos (m<sup>3</sup>)</b>
2000	31373,81
2001	38247,15
2002	50214,88
2003	27585,64
2004	15105,47
2005	32219,95
2006	20850,43
2007	26907,6
2008	54947,02
2009	23247,86
2010	27183,52
2011	30721,17
2012	23944,36
2013	14068,04
2014	9025,46
2015	19737,26
2016	8976,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4 Volúmenes actuales del embalse la Hondura

<b>Superficie obtenida con Q-Boat</b>	
Volumen de sedimentación:	20333,51 m <sup>3</sup> = 0,0203 Hm <sup>3</sup>
<b>Superficie obtenida con Z-Boat</b>	
Volumen de sedimentación:	20067,54 m <sup>3</sup> = 0,02007 Hm <sup>3</sup>

Fuente: Análisis técnico y económico de levantamientos batimétricos por los métodos ecosonda y perfilador acústico doppler de corriente aplicación práctica: presa la hondura

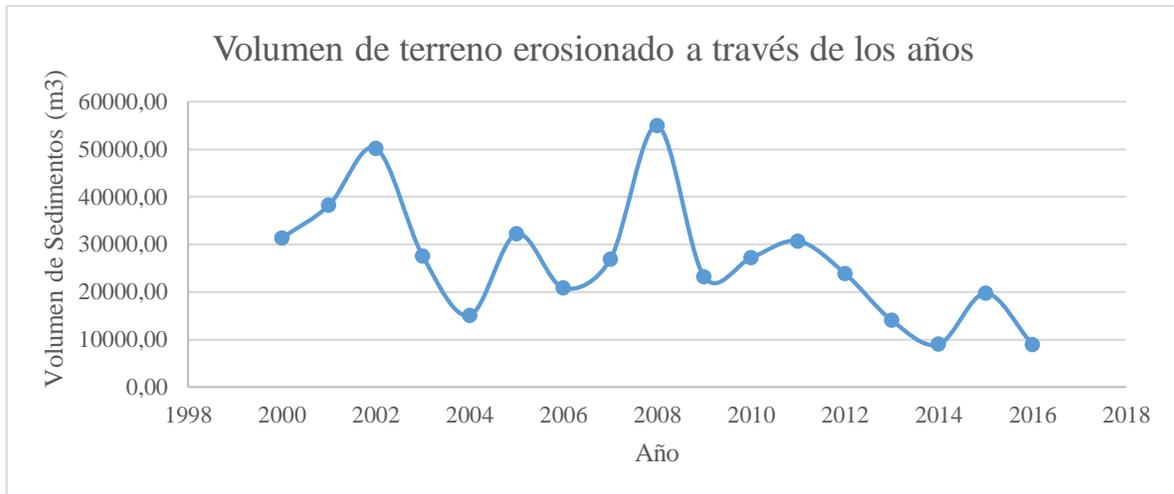


Figura 4.2 Volumen de suelo erosionado método 2

Fuente: Elaboración propia

Volumen total del 2009-2016 = 156903,8 m<sup>3</sup>

Este método fue realizado con la segunda ecuación propuesta por Arnoduls y con datos proporcionados por la FAO, es un valor más aceptable considerando que volumen de sedimentos calculado es la décima parte del volumen de almacenamiento, pero aun así es descartado ya que dista mucho del volumen de sedimentos medidos directamente.

Solo se sumaron los resultados a partir del 2009 porque fue el año que empezó a funcionar el embalse y no se realizó el análisis con el K obtenido con muestras de suelo de la zona en la combinación con el R2, porque su valor es mucho mayor al de la FAO por tanto los datos se aumentarían siendo una combinación innecesaria y descartable para nuestros objetivos, además de no verse necesario realizar el análisis hasta el 2018 por su gran separación con el resultado real.

### 4.3. USLE MÉTODO 3 CON R3 Y K2

Tabla 4.5 USLE anuales método 3

<b>Año</b>	<b>Volumen de sedimentos (m<sup>3</sup>)</b>
2009	3567,36
2010	4049,99
2011	4253,45
2012	3896,4
2013	2559,39
2014	2024,29
2015	3119,32
2016	2025,47
2017	3261,3
2018	5241,67

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6 Volúmenes actuales del embalse la Hondura

<b>Superficie obtenida con plano de referencia del año 2009</b>	
Volumen de almacenamiento:	1211758,32 m <sup>3</sup> = 1,212 Hm <sup>3</sup>
<b>Superficie obtenida con Q-Boat</b>	
Volumen de almacenamiento:	1179152,87 m <sup>3</sup> = 1,179 Hm <sup>3</sup>
Volumen de sedimentación:	20333,51 m <sup>3</sup> = 0,0203 Hm <sup>3</sup>
<b>Superficie obtenida con Z-Boat</b>	
Volumen de almacenamiento:	1205158,51 m <sup>3</sup> = 1,205 Hm <sup>3</sup>
Volumen de sedimentación:	20067,54 m <sup>3</sup> = 0,02007 Hm <sup>3</sup>

Fuente: Análisis técnico y económico de levantamientos batimétricos por los métodos ecosonda y perfilador acústico doppler de corriente aplicación práctica: presa la hondura

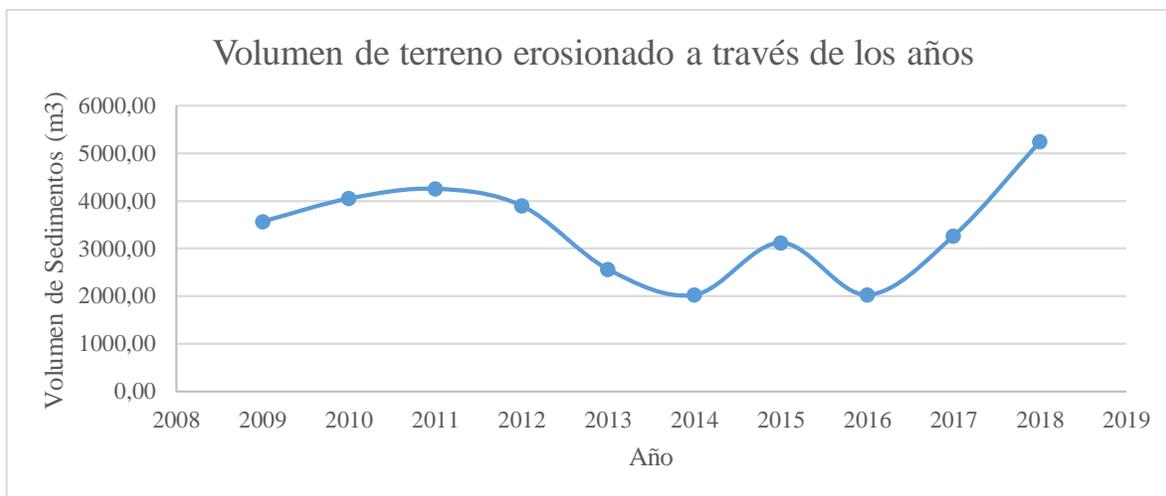


Figura 4.3 Volumen de suelo erosionado método 3

Fuente: Elaboración propia

Volumen total del 2009-2018 = 33998,63 m<sup>3</sup>

Este método fue realizado con la tercera ecuación propuesta por Arnoduls y un factor de erodabilidad obtenido de las muestras de suelo de la zona (K2), teniendo un mejor acercamiento que las anteriores dos usadas al volumen de sedimentos real acumulado en el embalse, por tanto, es posible dar un estimativo del volumen de sedimento anual a través de un promedio de los volúmenes anuales.

Tabla 4.7 Volumen de sedimentos anual

<b>Año</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
2009	3567,36
2010	4049,99
2011	4253,45
2012	3896,40
2013	2559,39
2014	2024,29
2015	3119,32
2016	2025,47
2017	3261,30
2018	5241,67
<b>Promedio</b>	<b>3399,863028</b>

Fuente: Elaboración propia

#### **4.3.1. Tiempo de vida útil del embalse**

En base al valor promedio de volumen anual de sedimentos en el embalse es posible dar un aproximado de en cuantos años se colmata el mismo.

Volumen de almacenamiento = 1211758,32 m<sup>3</sup>

Vida útil = 1211758,32 / 3399,863 = 356,41 ≈ 357 años.

#### 4.4. USLE MÉTODO 4 CON R3 Y K2 CON EROSIÓN 6.0 (MODIFICADO)

##### 4.4.1. Coeficientes de erosividad (R3) medios anuales

Tabla 4.8 R medio de cada año

Año	R medio
	MJ*mm/ha*h
2009	88,119
2010	91,004
2011	98,255
2012	78,99
2013	73,524
2014	48,682
2015	89,23
2016	56,848
2017	85,283
2018	139,569

Fuente: Elaboración propia

##### 4.4.2. Coeficientes de cobertura (C) medios anuales

Tabla 4.9 Coeficiente C de cada año

Año	C medio
	adimensional
2009	0,689
2010	0,736
2011	0,714
2012	0,815
2013	0,583
2014	0,713
2015	0,593
2016	0,602
2017	0,652
2018	0,626

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.3. Coeficiente de erodabilidad (K2) medio anual

Tabla 4.10 Coeficiente K de cada año

Año	K2
	Tn*h/MJ*mm
2009 - 2018	0,02985645

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.4. Volumen anual de sedimentos

Tabla 4.11 USLE método 4 Erosión 6.0

Año	USLE	Área	Peso del suelo erosionado	Peso específico	Volumen de sedimentos anual
	Tn/ha/año	ha	Tn	Tn/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
2009	37	757,492359	28027,21729	1,1	25479,2884
2010	40,8	757,210713	30894,19708	1,1	28085,6337
2011	42,7	757,294003	32336,45392	1,1	29396,7763
2012	39,2	757,377164	29689,18484	1,1	26990,168
2013	26,1	757,429548	19768,91121	1,1	17971,7375
2014	21,1	757,393384	15981,0004	1,1	14528,1822
2015	32,2	757,30808	24385,32017	1,1	22168,4729
2016	20,8	757,381733	15753,54005	1,1	14321,4
2017	33,9	757,318912	25673,11112	1,1	23339,1919
2018	53,2	757,367623	40291,95756	1,1	36629,0523

Fuente: Elaboración propia

Esta combinación fue realizada con la tercera ecuación propuesta por Arnoduls y un factor de erodabilidad obtenido de las muestras de suelo de la zona (K2), pero con los valores promedio anuales de cada factor, por ello su gran variación con el anterior modelo usado, además de no tomar en cuenta la topografía del terreno por ello es llamado USLE modificado porque solo toma en cuenta la longitud y pendiente del río principal de la cuenca, quedando descartado por su diferencia con el valor de sedimentación real en el embalse.

## 4.5. USLE MÉTODO 5 CON R3 Y K1

Tabla 4.12 USLE anuales método 5

Año	Volumen de sedimentos (m <sup>3</sup> )
2009	2625,95
2010	3478,94
2011	3279,06
2012	3372,9
2013	1897,8
2014	1826,5
2015	2263,25
2016	1699,8
2017	2022,74
2018	3232,1

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.4 Volumen de suelo erosionado método 5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.13 Volúmenes actuales del embalse La Hondura

<b>Superficie obtenida con Q-Boat</b>	
Volumen de sedimentación:	20333,51 m <sup>3</sup> = 0,0203 Hm <sup>3</sup>
<b>Superficie obtenida con Z-Boat</b>	
Volumen de sedimentación:	20067,54 m <sup>3</sup> = 0,02007 Hm <sup>3</sup>

Fuente: Análisis técnico y económico de levantamientos batimétricos por los métodos ecosonda y perfilador acústico doppler de corriente aplicación práctica: presa la hondura

Volumen total del 2009-2018 = 25699,04 m<sup>3</sup>

Este método fue realizado con la tercera ecuación propuesta por Arnoduls y el cálculo del coeficiente K fue realizado con los datos proporcionados por la FAO teniendo un mejor acercamiento que los anteriores 4 modelos.

Tabla 4.14 Volumen anual de sedimentos método 5

<b>Año</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
2009	2625,95
2010	3478,94
2011	3279,06
2012	3372,90
2013	1897,80
2014	1826,50
2015	2263,25
2016	1699,80
2017	2022,74
2018	3232,10
<b>Promedio</b>	<b>2569,904249</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.1. Tiempo de vida útil del embalse

En base al valor promedio de volumen anual de sedimentos en el embalse fue posible dar un aproximado de en cuantos años se colmata el mismo.

Volumen de almacenamiento = 1211758,32 m<sup>3</sup>

Vida útil = 1211758,32 / 2569,90 = 471,52 ≈ 472 años.

#### 4.5.2. Ecuación USLE recalculada

De los 5 modelos trabajados al ser este el más cercano al real fue posible calcular un factor de relación entre el valor real y el valor estimado para 10 años, para que pueda ser usado en la USLE y que esta entregue un valor más cercano al real, aclarando este factor solo puede ser usada para esa cuenca.

Factor de relación = 20333,51 / (2569,904249\*10) = 0.79122

Quedando una ecuación USLE modificada =  $0.79122 * R * K * LS * C$

#### 4.5.3. Tiempo de vida útil del embalse (valor recalculada)

Con valor promedio de volumen anual de sedimentos por el coeficiente de relación en el embalse fue posible dar un aproximado de en cuantos años se colmata el mismo.

Vida útil modificado =  $1211758.32 / (0.79122 * 2569.904249) = 595.94 \approx 596$  años.

Tabla 4.15 Zonas que presentaron una mayor erosión en 2018

<b>Año</b>	<b>2018</b>	<b>Peso en toneladas del suelo erosionado durante el año 2018</b>	<b>Peso específico</b>	<b>Volumen Sedimentos</b>
<b>USLE (Tn/ha/año)</b>	<b>Área (ha)</b>		<b>(Tn/m<sup>3</sup>)</b>	<b>(m<sup>3</sup>)</b>
0,00	6,60	0,00	1,1	0,00
1,72	206,34	353,88	1,1	321,71
4,11	166,67	685,03	1,1	622,76
5,37	141,69	760,18	1,1	691,08
6,62	122,69	812,22	1,1	738,38
7,99	59,23	473,27	1,1	430,24
9,59	27,76	266,10	1,1	241,91
11,87	9,61	114,03	1,1	103,67
15,29	1,59	24,27	1,1	22,06
19,39	1,09	21,08	1,1	19,16
25,44	0,54	13,73	1,1	12,49
43,79	0,72	31,53	1,1	28,66
<b>Total</b>	<b>744,54</b>	<b>3555,31</b>	<b>1,1</b>	<b>3232,10</b>

Fuente: Elaboración propia

Solo se analizó el último año ya que se produjo una seria deforestación a causa de los incendios en la zona el año anterior, encontrando así que un tercio del área total de la cuenca produce más de la mitad del aporte del sedimento total.

## 4.6. CUADRO COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES MÉTODOS

Tabla 4.16 Resumen de los resultados de cada método

	1ra combinación (USLE)	2da combinación (USLE)	3ra combinación (USLE)	4ta combinación (USLE modificado)	5ta combinación (USLE)
Año	Volumen de sedimentos (m <sup>3</sup> )				
2009	271528,92	23247,86	3567,36	25479,2884	2625,95
2010	319367,81	27183,52	4049,99	28085,6337	3478,94
2011	376007,26	30721,17	4253,45	29396,7763	3279,06
2012	269899,86	23944,36	3896,4	26990,168	3372,9
2013	157752,02	14068,04	2559,39	17971,7375	1897,8
2014	92104,9	9025,46	2024,29	14528,1822	1826,5
2015	232109,04	19737,26	3119,32	22168,4729	2263,25
2016	94823,61	8976,12	2025,47	14321,4	1699,8
2017			3261,3	23339,1919	2022,74
2018			5241,67	36629,0523	3232,1
Suma	1813593,42	156903,79	33998,64	238909,903	25699,04
<b>Superficie obtenida con Q-Boat</b>					
Volumen de sedimentación a finales del 2018 :				20333,51 m <sup>3</sup>	
<b>Superficie obtenida con Z-Boat</b>					
Volumen de sedimentación a finales del 2018:				20067,54 m <sup>3</sup>	

Fuente: Elaboración propia

Al comparar cada método se logró evidenciar que el mejor era la quinta combinación por muchas razones entre ellas era la más cercana al resultado de la batimetría ya realizada y otra que era la combinación (método) que presentó menos dificultades para estimar sedimentos.

Los factores que provocan que la quinta combinación sea la más efectiva son los de erosividad (R) y erodabilidad (K) esto debido a que los otros factores son calculados de una única forma manteniéndose constante en su resultado, exceptuando el modelo modificado 4 donde además varió el factor topográfico (LS). Por ello al multiplicar los factores constantes de un año cualquiera por ejemplo el 2009 se tuvo un factor L\*S\*C entre 0 a 14,87 adimensional, que al ser multiplicado por un factor R1 que oscilaba entre 7994 a 7368 MJ\*mm/ha\*h y un K1 de 0,0184 Tn\*h/MJ\*mm se obtuvo un volumen de sedimentos de

271528,92 m<sup>3</sup> muy por encima de los valores deseados, y a partir de ese valor se fueron combinando los factores contantes con factores que dieran resultados muchos menores a los de R1, es por esto que los factores R3 y K1 funcionan mejor que los otros ya que sus valores son mucho menores frente a los otros.

## CONCLUSIONES

- La mejor combinación de ecuaciones para llegar a resultados cercanos al estudio batimétrico del embalse La Honduras son a través las propuestas por: Arnoldus (R) su tercera ecuación, Williams (K), Velásquez (L), McCools (S) y Morales (C). Dando como resultados un volumen de sedimentos hasta el 2018 de 33998,63 m<sup>3</sup> con el modelo 3 (calculando K con muestras de suelo de la zona) y 25699,04 m<sup>3</sup> con el modelo 5 (calculando K con los datos de la FAO), estas permitirán tener un mejor control de sedimentación en el embalse, que en caso de colmatarse produciría un serio problema a las comunidades que usan al mismo para pesca y riego.
- El mejor programa para el uso de la USLE es el Arc Map, ya que este permitió realizar cálculos más avanzados, a través de la superposición de los raster de cada factor, mientras que el programa Erosión 6.0 trabaja con los valores medios de cada factor además de calcular el factor LS sin tomar en cuenta la topografía de la cuenca, solo la del río principal, siendo el mejor modelo el calculado con Arc Map a partir de los datos de suelo proporcionados por la FAO y de la tercer ecuación de Arnoldus ya que sus resultados tuvieron un mejor acercamiento al valor real de la batimetría del embalse La Honduras.
- El tiempo de vida útil calculado del embalse de La Honduras en función al aporte de sedimentos anual observados sería de aproximadamente 596 años aclarando que este fue calculado con el modelo de la USLE 5 recalculado, propio para el embalse.
- El área que tiene un mayor aporte de sedimentos en el 2018 son de 323,61 (ha), produciendo un volumen de 1859,7 m<sup>3</sup> ya que analizando el gráfico de aportes por el modelo 5 se identifica una disminución de sedimentos a partir del año 2013, porque en el 2012 la comunidad ejecutó un programa de reforestación de la zona y una elevación de aportes en el año 2018 que coincide con el año de los incendios en las áreas rurales del lado oeste de la ciudad de Tarija, eliminando una buena porción de la cobertura vegetal además de lluvias de gran magnitud, siendo esta el área a reforestar con la finalidad de reducir el aporte de sedimentos al embalse de La Honduras.
- La variación entre el cálculo del factor K entre las muestras de suelo y los datos por la FAO se debe a que las muestras fueron extraídas de las zonas con mayor riesgo erosivo mientras

que de la FAO toma muestras de zonas de mayor concentración de un mismo tipo de suelo de la cuenca de Pajchani, afectando esto a la combinación de ecuaciones porque con realizar la primera nos encontramos que los datos se disparan, siendo innecesaria la aplicación del factor K con muestras de suelo porque arrojarían resultados mayores a los ya obtenidos aplicando los datos de la FAO.

- Las limitaciones para el uso de la USLE son muy diversas, pero la mayor es la determinación del coeficiente de erosividad de lluvia, ya que teóricamente este se consigue a partir de lluvias horarias o en el peor de los casos desagregando la lluvia diaria en horaria, pero esto es muy complicado de lograr debido a la falta de datos de pluviógrafos en países latinoamericanos, por tanto se aplica la fórmula más usada, siendo la fórmula exponencial propuesta por Arnouldus, haciendo notar que otros países adaptaron o modificaron las fórmulas en base a una serie de datos que ellos tomaron con lo cual Bolivia no cuenta además que la USLE depende en gran medida de dicho factor, siendo esta otra razón por la cual varían los resultados con cada procedimiento ya que se usaron fórmulas empíricas procedentes de estudios de otros países y cada una se desarrolla bajo ciertas condiciones climáticas y topográficas.

- La USLE calculada por cualquier método de erosividad de lluvia, presentó un elevado pico de aporte de sedimentos justo en el año 2008 pero luego de ese año se presentó un descenso notable del volumen de erosión del suelo, porque disminuye tanto la cantidad de lluvia que caía sobre la cuenca, como la cobertura vegetal de la misma. Esto podría atribuirse al calentamiento global, pero sería demasiada coincidencia que este afectara justo luego de empezar a funcionar el embalse. Podría existir la posibilidad que el mismo embalse modifique las propiedades de la cuenca creando un efecto de Eutrofización que podría ser ocasionado por un excesivo enriquecimiento de nutrientes tales como fósforo y nitrógeno que podrían provenir del suelo erosionado hacia el embalse, provocando un crecimiento rápido de las algas que terminan muriendo por su excesivo tamaño, siendo estas consumidas por bacterias que terminan consumiendo todo el oxígeno del agua del embalse, esta a su vez es dañina para la vegetación alrededor del embalse y según la teoría de la bomba biótica sugiere que las precipitaciones se posibilitan gracias a la cobertura forestal, a mayor cobertura vegetal mayor precipitación.

- El programa Erosión 6.0 no da buenos resultados, pero esto se debe a que era usado en Uruguay y posteriormente por Argentina añadiendo una base de datos propias de sus respectivas cuencas, sobre todo en el cálculo del factor LS que es el que varía mucho con el calculado en Arc Map pasando de 7,69 a 20,39, por lo que a futuro Bolivia podría sumarse a la base de datos del programa teniendo los valores previamente calculados de las cuencas, teniendo el del embalse La Hondura ya calculado.

## **RECOMENDACIONES**

- Usar el programa ENVI en lugar del Arc Map para la corrección del error nulo en las bandas ya que este programa fue desarrollado esencialmente para el manejo de bandas espectrales y por tanto el tiempo de corrección es de minutos mientras que con la extensión de Arc Map es de horas.
- Como no se poseen datos anuales de los DEM y de algunas de las bandas espectrales, pueden usarse los datos de las bandas anteriores o posteriores tomando en cuenta que esto tendría un cierto grado de error.
- Se debe realizar programas de reforestación de la cuenca esto con la finalidad de disminuir la cantidad de sedimentos que llegan al embalse ya que este es el único factor modificable otra alternativa para la disminución de la producción de sedimentos es la construcción de terrazas en el terreno que permite que este sea cultivable.
- Se debe hacer un análisis del resto de los embalses en Tarija esto para poder tener ecuaciones que faciliten el cálculo de los sedimentos de las mismas.