

**UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**INFLUENCIA DE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO PARA
LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO
SANTA EN EL PERIODO: 1981 – 2014.**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

Bach. TEODOR ALVARADO CIRO JOSÉ BELISARIO

Asesor:

DR. TINOCO MEYHUAY TITO MONER

Huaraz - Ancash - Perú

2022



DEDICATORIA

A Dios, por brindarme fortaleza y guiar mis pasos para afrontar las adversidades.

A mi madre Rodith Alvarado Guimaray, por estar siempre presente apoyándome en cada etapa de mi vida y a todos los que me apoyaron para cumplir esta meta.

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, en especial a la Facultad de Ciencias Agrarias, por brindarme valiosos conocimientos.

A mi asesor el Dr. Tinoco Meyhuay Tito Moner, por las facilidades otorgadas y a los miembros del jurado de la presente tesis, Dr. Fidel Gregorio Aparicio Roque (presidente), Mag. Javier Alberto Cotos Vera (secretario) y el Mag. Esteban Pedro Reyes Roque (vocal), por la revisión y aportes en la mejora de la tesis.

Al ing. Carlos Ramon Galvez Urrunaga responsable del Laboratorio de Sedimentos en el Proyecto Especial Chavimochic, por facilitarme información.

LISTA DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
LISTA DE CONTENIDO	iv
TABLA DE CONTENIDO	v
CONTENIDO DE TABLAS	vii
CONTENIDO DE FIGURAS	ix
CONTENIDO DE ECUACIONES	xii
CONTENIDO DE ANEXOS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv

TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento y Formulación del Problema.....	1
Descripción del Problema.....	1
Formulación del Problema.	5
1.2. Objetivos.....	5
Objetivo General.	5
Objetivos Específicos.....	5
1.3. Justificación de la Investigación.....	5
Justificación Teórica.....	5
Justificación Metodológica.....	6
Justificación Práctica.....	6
1.4. Delimitación.....	6
II. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Antecedentes de Investigación.....	8
Antecedentes Internacionales.....	8
Antecedentes Nacionales.....	10
2.2. Bases Teóricas.....	13
Cuenca Hidrográfica.....	13
Erosión Hídrica.....	13
Tipos de Erosión Hídrica.....	13
Factores que afectan a la Erosión Hídrica.....	14
Etapas de la erosión Hídrica.....	15
Metodología para cuantificar la Erosión Hídrica.....	16
Nivel de Erosión según RUSLE.....	24
Producción de Sedimento.....	25
Modelos Hidrológicos.....	25
Modelo Hidrológico Semi – distribuido SWAT – (Arnold et al., 1990).....	26
Sistema de Información Geográfica (SIG).....	34
Automatización.....	35

Automatización de procesos de SIG con ArcGIS, modelador (Model Builder) y RStudio.....	36
2.3. Definición de términos básicos.....	37
2.4. Hipótesis.....	37
2.5. Variables:.....	37
Variable Independiente.....	37
Variable Dependiente.....	37
III. METODOLOGÍA.....	38
3.1. Tipo de Investigación:.....	38
3.2. Diseño de la Investigación:.....	38
3.3. Población y Muestra.....	38
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	38
3.5. Plan de procesamiento y análisis estadístico de datos.....	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:	50
4.1. Presentación de Resultados.....	50
Primera Etapa.....	50
Segunda Etapa.....	74
Tercera Etapa.....	95
Cuarta Etapa.....	95
4.2. Prueba de Hipótesis.....	98
4.3. Discusión.....	98
V. CONCLUSIONES.....	102
VI. RECOMENDACIONES.....	104
VII.REFERENCIAS.....	105
VIII. ANEXOS.....	112

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1	Factores que afectan la erosión hídrica.....	14
Tabla 2	Clasificación del IMF.	18
Tabla 3	Rangos típicos del factor R.....	18
Tabla 4	Clasificación de erodabilidad con diferentes rangos del factor K.	19
Tabla 5	Factor LS según grupos de pendientes.	21
Tabla 6	Valores de cobertura vegetal (C).	23
Tabla 7	Valores del factor P.	24
Tabla 8	Niveles de Erosión.....	24
Tabla 9	Estadísticos recomendados para evaluar el desempeño del modelo hidrológico.	30
Tabla 10	Parámetros que regulan la respuesta del agua.	32
Tabla 11	Parámetros Fisiográficos de la Cuenca del Río Santa.	50
Tabla 12	Parámetros de Relieve de la Cuenca del Río Santa.	51
Tabla 13	Parámetros de la Red Hidrográfica de la Cuenca del Río Santa.	52
Tabla 14	Estaciones meteorológicas medidas en campo.....	53
Tabla 15	Precipitaciones estimadas en mm/año con datos grillados RAIN4PE, PISCO y observados en campo.....	54
Tabla 16	Precipitaciones en mm/año para las 31 estaciones virtuales de los datos RAIN4PE.	57
Tabla 17	Cantidad de arena, arcilla, limo y carbono según el HWSD.	62
Tabla 18	Cantidad de arena, arcilla, limo y carbono según SoilGrids.	64
Tabla 19	Promedio porcentual de arena, arcilla, limo y carbono.	69
Tabla 20	Factor de erodabilidad k.	69
Tabla 21	Precipitación promedio mensual en temporada húmeda y temporada seca.	69
Tabla 22	Comportamiento NDVI y media del Factor de Cobertura Vegetal (C).....	70
Tabla 23	Resultados de la Erosión Hídrica con datos de precipitación RAIN4PE.	74

Tabla 24 Equivalencias según el tipo de suelo y su descripción.	77
Tabla 25 Parámetros asignados en la primera simulación.	84
Tabla 26 Estadísticos del desempeño hidrológico de la simulación para caudal líquido. .	84
Tabla 27 Parámetros calibrados para la cuenca del río Santa.	90
Tabla 28 Estadísticos asociados a la simulación, calibrados.	91
Tabla 29 Estadísticos asociados a la simulación, validados.	91
Tabla 30 Parámetros que influyen en el caudal sólido.	92
Tabla 31 Estadísticos del desempeño hidrológico de la simulación calibrada para caudal sólido.	93
Tabla 32 Estadísticos del desempeño hidrológico de la simulación validada para caudal sólido.	93
Tabla 33 Cantidad promedio anual de sedimentos que produce la cuenca del río Santa, simulado con el modelo SWAT.	94
Tabla 34 Provincias potencialmente más críticas por la Erosión Hídrica del Suelo y por ende la mayor Producción de Sedimentos.	96

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de ubicación del área de estudio.	7
Figura 2	Esquema de una ladera con lluvia y sus demás componentes.	13
Figura 3	Esquema de un Sistema Hidrológico, mostrando entradas y salidas.	26
Figura 4	Representación del Ciclo Hidrológico en SWAT.	27
Figura 5	Procesos de Corriente modelados por SWAT.	28
Figura 6	Parámetros para calibrar modelos de 64 distintas cuencas de estudios pasados.	31
Figura 7	Componentes de un Sistemas de Teledetección.	35
Figura 8	Generación de un modelo en Model Builder.	36
Figura 9	Recolección de datos para el Objetivo Específico 1.	39
Figura 10	Recolección de datos para el Objetivo Específico 2.	39
Figura 11	Recolección de datos para el Objetivo Específico 3.	41
Figura 12	Recolección de datos para el Objetivo Específico 4.	42
Figura 13	Recolección de datos para el Objetivo Específico 5.	43
Figura 14	Recolección de datos para el Objetivo General.	43
Figura 15	Modelo automatizado, delimitación de una cuenca y sus parámetros geomorfológicos – Model Builder.	44
Figura 16	Flujograma para estimar la Erosión Hídrica del Suelo con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo RUSLE.	45
Figura 17	Flujograma para estimar la Producción de Sedimentos con la herramienta SWAT (Soil and Water Assessment Tool).	46
Figura 18	Flujograma para Calibrar y Validar la estimación de la Producción de Sedimentos.	47
Figura 19	Flujograma para Determinar las zonas potencialmente críticas de la Erosión Hídrica del Suelo y Producción de Sedimentos.	48
Figura 20	Flujograma para determinar la influencia de la Erosión Hídrica del Suelo con la Producción de Sedimentos.	49

Figura 21	Mapa de subdivisión en 31 subcuencas a la cuenca del río Santa.	55
Figura 22	Mapa de 31 estaciones virtuales dentro de la cuenca del río Santa.	56
Figura 23	Script en RStudio para automatizar procesos y obtener datos.	57
Figura 24	Mapa de Erosividad del suelo (R) con datos de precipitación RAIN4PE.	59
Figura 25	Mapa de Factor Topográfico (LS).	61
Figura 26	Mapa de HSWD, información del suelo dentro de la cuenca del río Santa.	63
Figura 27	Mapa de SoilGrids, información de arena en g/kg dentro de la cuenca del río Santa.	65
Figura 28	Mapa de SoilGrids, información de arcilla en g/kg dentro de la cuenca del río Santa.	66
Figura 29	Mapa de SoilGrids, información de limo en g/kg dentro de la cuenca del río Santa.	67
Figura 30	Mapa de SoilGrids, información de carbono orgánico en g/kg dentro de la cuenca del río Santa.	68
Figura 31	Mapa de Cobertura Vegetal (C).	71
Figura 32	Mapa de Prácticas de apoyo de manejo de suelos (P).	72
Figura 33	Mapa de Pérdida de suelo con precipitaciones RAIN4PE.	73
Figura 34	Ventana de ArcSWAT con la clasificación de la pendiente.	75
Figura 35	Mapa de clasificación de pendientes para el procesamiento de la modelación de Producción de Sedimentos.	76
Figura 36	Ventana de ArcSWAT con la clasificación del uso de cobertura.	79
Figura 37	Mapa de clasificación de uso de cobertura para el procesamiento de la modelación de Producción de Sedimentos.	80
Figura 38	Ventana de ArcSWAT con la clasificación del tipo de suelo.	81
Figura 39	Mapa de clasificación de tipo de suelo para el procesamiento de la modelación de Producción de Sedimentos.	82
Figura 40	Caudal líquido observado vs caudal líquido simulado.	85

Figura 41 Ajuste del parámetro CN2, Caudal líquido observado vs caudal líquido simulado.	86
Figura 42 Calibración del parámetro GWQMN.....	87
Figura 43 Calibración del parámetro GW_DELAY.....	88
Figura 44 Calibración del parámetro GW_REVAP y el parámetro RCHRG_DP.	89
Figura 45 Caudal líquido observado vs caudal líquido validado.	92
Figura 46 Caudal sólido observado vs caudal sólido calibrado.	93
Figura 47 Mapa de las Provincias potencialmente más críticas por la Erosión Hídrica del Suelo.	97

CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación RUSLE – (Renard et al., 1991).....	16
Ecuación 2. Ecuación de Renard & Freimund (1994).....	17
Ecuación 3. Índice Modificado de Fourier (1960).....	17
Ecuación 4. Fórmula de Williams (1975).....	19
Ecuación 5. Factor de Longitud de pendiente Desmet & Gober (1996).	20
Ecuación 6. Coeficiente m por Desmet & Gober (1996).....	20
Ecuación 7. Grado de Pendiente (S) (McCools et al., 1987).....	21
Ecuación 8. Factor topográfico (LS) Desmet y Gober (1996) y McCools (1987).	21
Ecuación 9. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado - Rouse (1974).....	22
Ecuación 10. Factor de la cobertura vegetal - Lin (2002).	22
Ecuación 11. Ecuación del Equilibrio Hidrológico – (Arnold et al., 1990).	28
Ecuación 12. Coeficiente de Nash Sutcliffe (1970).....	29
Ecuación 13. Persistencia de la eficiencia del modelo (PBIAS) - Moriasi et al. (2007)....	29
Ecuación 14. Relación de Desviación de Observaciones RSR - Moriasi et al. (2007).	30

CONTENIDO DE ANEXOS

Anexo A. Datos utilizados para estimar la Erosión Hídrica y Producción de Sedimentos de la cuenca del río Santa.....	112
Anexo B. Datos de registros Históricos Observados de caudal líquido y caudal sólido.....	116
Anexo C. Análisis estadísticos de los datos Observados.....	118
Anexo D. Datos de precipitación mensual utilizadas de los datos grillados PISCO, RAIN4PE y datos observados.....	124
Anexo E. Pruebas estadísticas para determinar la semejanza de los datos grillados PISCO y RAIN4PE con los datos Observados las mediadas de bondad de ajuste de los datos de precipitación.....	132
Anexo F. Producción de Sedimentos mensuales.....	136

RESUMEN

Los ríos en su gran mayoría traen consigo partículas sólidas conocidas como sedimentos, que son productos de la degradación del suelo por la erosión hídrica, afectando a las estructuras hidráulicas que están construidas sobre el lecho del río ocasionando diversos costes económicos en el mantenimiento de estas estructuras. El objetivo fue determinar cómo influye la erosión hídrica del suelo para la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa en el período 1981-2014. El método que se empleó fue la ecuación universal de pérdida de suelo modificada RUSLE y la herramienta SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Los resultados fueron: La erosión hídrica estimada dentro de la cuenca con un valor de 19.342 M*T/año, la calibración del caudal líquido desde los años 2000 hasta 2009 con estadísticos igual a NSE (Nash Sutcliffe)= 0.6, PBIAS (Persistencia de la eficiencia del modelo)=17.2 y RSR (Relación de Desviación de Observaciones)=0.673, la validación del caudal líquido desde los años 2010 hasta 2014 con estadísticos igual a NSE= 0.5, PBIAS= 6.4 y RSR=0.739, encontrándose dentro del rango satisfactorio tanto en la calibración como en la validación, la calibración de caudal sólido (sedimentos) desde los años 2001 hasta 2009 con estadísticos igual a NSE=0.4, PBIAS=-4.23 y RSR=0.788, la validación del caudal sólido desde los años 2010 hasta 2014 con estadísticos igual a NSE= 0.55, PBIAS= 30.17 y RSR=0.671, encontrándose dentro del rango satisfactorio en la validación y el Promedio de Producción de sedimentos estimada con un valor de 14.833 M*T/año. También cabe mencionar que, dentro de las zonas potencialmente críticas tenemos a la provincia de Huaylas, la que produce mayor cantidad de sedimentos con un total de 3.767 M*T/año. Se concluyó que la erosión hídrica influye 0.3040 veces más en la producción de sedimentos.

Palabras Clave: Erosión Hídrica del Suelo, Producción de sedimentos, RUSLE., SWAT.

ABSTRACT

Most rivers bring with them solid particles known as sediments, which are products of soil degradation due to water erosion, affecting the hydraulic structures that are built on the riverbed, causing various economic costs in the maintenance of these structures. The objective was to determine how soil water erosion influences sediment production in the Santa river basin in the period 1981-2014. The method used was the modified universal soil loss equation RUSLE and the SWAT tool (Soil and Water Assessment Tool). The results were: estimated water erosion within the basin with a value of 19,342 M*T/year, liquid flow calibration from the years 2000 to 2009 with statistics equal to NSE (Nash Sutcliffe)= 0.6, PBIAS (Persistence of Model Efficiency)=17.2 and RSR (Ratio of Observations Deviation)=0.673, the validation of the liquid flow from the years 2010 to 2014 with statistics equal to NSE= 0.5, PBIAS= 6.4 and RSR=0.739, being within the satisfactory range in both calibration and validation, the calibration of solid flow (sediment) from the years 2001 to 2009 with statistics equal to NSE=0.4, PBIAS=-4.23 and RSR=0.788, the validation of the solid flow from the years 2010 to 2014 with statistics equal to NSE= 0.55, PBIAS= 30.17 and RSR=0.671, being found within the satisfactory range in the validation and the Average Sediment Production estimated with a value of 14.833 M*T/year. It is also worth mentioning that, within the potentially critical zones, the province of Huaylas produces the greatest amount of sediment with a total of 3,767 M*T/year. It was concluded that water erosion has a 0.30-40 times greater influence on sediment production.

Key words: Soil Water Erosion, Sediment Production, RUSLE, SWAT.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento y Formulación del Problema.

Descripción del Problema.

Ccorahu (2021) indica que el tiempo de vida del embalse está afectado precisamente por la acumulación de sedimentos en suspensión a lo largo y ancho del embalse y los sedimentos de fondo en la cola, lo cual genera una preocupación constante en los operadores dado que este embalse debe superar largamente el tiempo de explotación de la mina Southern Perú Copper Corporation (SPCC). Con la finalidad de mitigar el avance de la sedimentación, se extrae aproximadamente 50 000 m³ /año de sedimentos de la cola del embalse, esto genera un alto costo para los intereses del operador. Sin embargo, los sedimentos en suspensión se siguen acumulando por decantación en zona cercana a las ventanas, amenazando la operatividad de las válvulas de descarga. (p.2)

Núñez (2021) señala que la morfodinámica de ríos y el transporte de sedimentos son procesos muy complicados, cuyo grado de conocimiento es, hasta ahora, restringido. No existe modelo morfodinámico apropiado para representar todos los problemas y condiciones fluviales. Pese a ello en la práctica es más viable el uso de modelos numéricos pues son más económicos que realizar mediciones experimentales, tienen bajo costo temporal y además presentan la ventaja de poder incluir escenarios hipotéticos para evaluar las alteraciones y efectos futuros, recurriendo a fórmulas de transporte de sedimentos de fondo, con los cuales se puede cuantificar el caudal sólido de una corriente en función de las características hidráulicas, geométricas y granulométricas del cauce. (p.1)

Huayan y Urtecho (2020) mencionan que es ampliamente conocida la vocación hidráulica del poblador peruano a través del tiempo; muchas obras de irrigación a lo largo de todo el territorio atestiguan la calidad y funcionalidad de dichas obras, entre ellas tenemos: El Canal de Achirana en Ica, El Canal Huaca La Cruz en Lambayeque, El sistema de regadío en Nazca e Ica, El abastecimiento de agua a la ciudad del Cuzco y Machu Picchu. El diseño de una obra de bocatoma puede ser un problema muy difícil de resolver, en el que debe preverse la interacción estructura-naturaleza. La obra, es un elemento extraño en contacto con el agua. Es decir, que la estructura va a producir inevitablemente alteraciones en el medio natural circundante y a la vez, la naturaleza va a reaccionar contra la obra. Lo

que se pretende es determinar experimentalmente cual es el mejor comportamiento hidráulico de retención de material granular (sedimentos) considerando barrajes de perfil tipo indio y Creager en el canal de procesos morfológicos. (p.18)

Salas (2019) menciona que actualmente los procesos erosivos merman la capacidad productiva del suelo, generando un impacto directo en la economía local. Las características de la cuenca, como la orografía accidentada y los factores climáticos anómalos, incrementan la producción de sedimentos dentro de la cuenca. Ello, sumado a otros factores como: una pobre cobertura vegetal, un suelo susceptible a la erosión y el uso inadecuado del suelo, pueden generar catástrofes ambientales y económicas. La generación de un modelo hidrológico, capaz de ubicar y medir el grado de erosión en la cuenca, mediante el uso de la herramienta SWAT, calculará el volumen de pérdida de suelo por hectárea y por año.

Peña (2017) señala que el transporte de sedimentos ocurre desde la parte alta de la cuenca hasta la desembocadura al mar, alterando la flora, fauna, geomorfología, calidad de agua, actividades antrópicas e incluso la permanencia y período de vida útil de obras de infraestructura hidráulica. Se comprobó que su variación se debe al material disponible al lavado por precipitaciones debido a que el mayor transporte se da al inicio de la época húmeda debido al alto material disponible y disminuyendo hasta el fin de la época húmeda.

Morera (2014) indica que la vertiente del Pacífico peruano ocupa el 21.8 % de la superficie del territorio nacional y está situada entre los 2° y 18° de latitud sur. Sus cuencas montañosas sufren un intenso desgaste físico-químico de los suelos (proceso de desertificación). Además, son el origen y la principal fuente de recursos hídricos para el 65% de la población peruana. Por otra parte, los principales y más grandes proyectos hidráulicos del Perú se encuentran en esta región. En este sentido, el aprovechamiento del recurso hídrico (poblacional, hidro-electricidad, irrigación, etc) es puesto en riesgo debido a las altas cargas de sedimento fluvial, las cuales afectan los ecosistemas acuáticos, disminuyen el tiempo de vida útil de las obras hidráulicas e incluso contribuyen a los conflictos debido a la disminución de la disponibilidad del agua (calidad del agua). (p.4)

Morera (2010) señala que la erosión y la dinámica de la producción de sedimentos en los Andes occidentales peruanos son aún desconocidos. Siendo el principal problema del río Santa las altas concentraciones de sedimentos en suspensión, se genera la necesidad de predecir qué sucederá en este tipo de sistemas en el futuro, esto se traduce en el cálculo de

los flujos de agua y producción de sedimentos; además de la vital importancia de conocer la dinámica de la producción de sedimentos.

Sánchez (2009) menciona que la acción erosiva de las lluvias acarrea anualmente millones de toneladas de suelo a los ríos. Por otro lado, las corrientes también ejercen una acción erosiva en sus canales. Partículas de lecho arrancadas de éste, pasan a ser transportadas en suspensión en la corriente por acción de las componentes verticales en régimen turbulento. Los sólidos presentes en el canal madre y laterales del proyecto especial CHAVIMOCHIC son partículas finas que tienen fundamentalmente dos orígenes: La cuenca del río Santa y las dunas presentes en los intervalles. En la cuenca del río Santa, el origen de los sedimentos está relacionado con los procesos erosivos y de movimiento masivo de tierras y taludes especialmente durante el periodo de lluvias. Asimismo, el aporte permanente de sedimentos, lo constituyen las explotaciones mineras, por análisis de sedimentos se ha comprobado que estos son altamente abrasivos, por su composición de materiales de alta dureza (cuarzo), constituyendo un problema para el mantenimiento de estructuras hidráulicas, equipos hidromecánicos y eléctricos. De otro lado, las partículas sólidas en suspensión del río Santa son muy finas como arcillas y limos; siendo 80 % de diámetro inferior a 0.15 mm y solo 20 % mayores que 0.15 mm. (p.1).

Ministerio de Economía y Finanzas (2010) indica que el costo anual de operación y mantenimiento del proyecto especial CHAVIMOCHIC es de 3'341,526 (tres millones trescientos cuarenta y un mil quinientos veinte seis) dólares siendo un presupuesto bastante alto que complica la viabilidad del proyecto.

Melgarejo y Roldan (2019) mencionan que el proyecto Especial CHINECAS es una obra hidráulica ubicado en los Valles de Santa, Nepeña y Casma, que deriva las aguas del río Santa, estas aguas transportan partículas sólidas (limo y arcilla) en suspensión, cuyo fin es el de mejorar los sistemas de riego, niveles de producción agraria y abastecer de agua para uso doméstico e industrial a los distritos de Chimbote y Nuevo Chimbote. La escases o nulidad de un plan estratégico de la deposición final de los sedimentos del proyecto especial CHINECAS, especialmente durante las temporadas de lluvia intensa en la serranía de nuestro país, en los meses comprendidos entre diciembre y abril, nos hace ubicarnos en un panorama alarmante, con las estructuras almacenando una cantidad excesiva de sedimentos.

García (2016) señala que el fenómeno de la erosión regresiva de fondo en cauces aluviales se viene presentando en las bocatomas “La Huaca” y “La Víbora” en cada época de avenidas en el Río Santa, uno de los ríos más caudalosos que desembocan en el océano pacífico. En los últimos 20 años la rasante del cauce original ha descendido más de 4,00 metros trayendo consigo efectos colaterales de alto riesgo. Para este período, el costo acumulado del mantenimiento correctivo de las estructuras asciende a aproximadamente US \$ 3 millones según la Gerencia de Operación y Mantenimiento del Proyecto Especial CHINECAS. (p.1).

Rocha (2006) menciona que el conocimiento de la magnitud de aporte sólido de una cuenca, producto de la erosión, es de vital importancia para proyectos hidráulicos. Sin embargo, la tasa de transporte de sedimentos varía de una cuenca a otra y a lo largo del tiempo, dificultando la selección del tipo de estructura. Existen muchos casos en Perú donde la sedimentación ha reducido el volumen máximo de almacenamiento de embalses aproximadamente en un 50% en pocos años, lo que se esperaba tener a lo largo de su vida útil. (p.2)

Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 1998) afirman que la actividad humana se ha convertido en un factor determinante en la producción de sedimentos fluviales, la cuenca del río Santa ostenta evidencias de la contaminación de sus aguas, producto de actividades industriales, desechos de residuos sólidos, malas prácticas agrícolas la intensa actividad minera, desarrollada con polimetálicos, oro, carbón, cobre, plata, tungsteno y algunos no metálicos, han dejado un pasivo ambiental muy disperso, esto varía con el modo de explotación pequeña, mediana y a gran escala; además dicha cuenca se caracteriza por su topografía agreste en la cuenca media y alta con pendientes que sobrepasan el 100%, cobertura vegetal estacional y escasa, con una litología que presenta suelos poco estables ello sumado a las elevadas precipitaciones desde 100-1150 mm.

Monsalve (1997) afirma que la acción erosiva de las lluvias acarrea anualmente millones de toneladas de suelo a los ríos. Por otro lado, las corrientes también ejercen una acción erosiva en sus canales. Partículas de lecho arrancadas de este, pasan a ser transportadas en suspensión en la corriente por acción de los componentes verticales en régimen turbulento.

Formulación del Problema.

Al concluir la presente investigación me permitió responder la siguiente interrogante:
¿En qué medida la erosión hídrica del suelo influirá en la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa en el Periodo: 1981 - 2014?

1.2. Objetivos.

Objetivo General.

Determinar cómo influye la Erosión Hídrica del Suelo para la producción de Sedimentos en la Cuenca del Río Santa en el Periodo: 1981 – 2014.

Objetivos Específicos.

Determinar los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Santa.

Estimar la erosión hídrica utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

Estimar la producción de sedimentos mediante la utilización del modelo Hidrológico semi-distribuido, herramienta de evaluación de suelos y aguas SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Calibrar y validar la estimación de la Producción de Sedimentos.

Determinar las zonas potencialmente críticas de la Erosión Hídrica del Suelo y Producción de Sedimentos.

1.3. Justificación de la Investigación.

Justificación Teórica.

Los procesos de degradación de una cuenca se desarrolla fundamentalmente el transporte de sedimentos en el cauce principal de un canal natural. Los resultados de la presente investigación “Influencia de la Erosión Hídrica del Suelo para la Producción de Sedimentos en la Cuenca del Río Santa en el Periodo: 1981 – 2014”, contribuirán a generar un nuevo conocimiento sobre las ya existentes; así mismo, servirá como herramienta de gestión de recursos hídricos y como antecedentes para las futuras investigaciones de pregrado y otros.

Justificación Metodológica.

El método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) y la construcción del modelo Hidrológico semi-distribuido, Herramienta de evaluación de suelos y aguas SWAT (Soil and Water Assessment Tool) se justifica, ya que se podrá obtener productos a un menor costo, a un menor tiempo, se podrá manejar gran cantidad de información, con mayor seguridad y en general, al incremento de la productividad. En consecuencia, el método y herramienta descrita garantizará la calidad y confiabilidad de los resultados de la investigación.

Justificación Práctica.

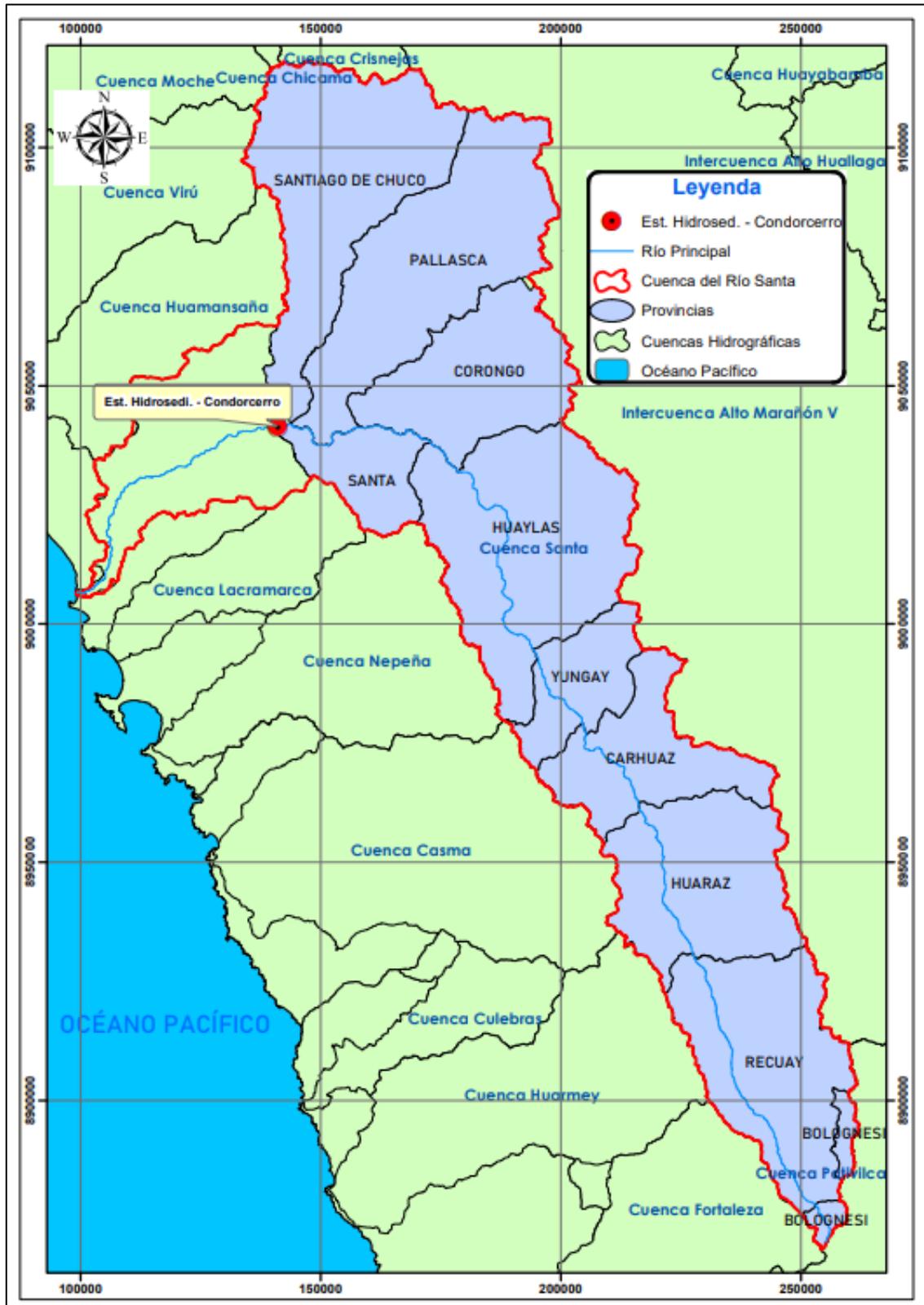
Los ríos en su gran mayoría traen consigo partículas sólidas conocidas como sedimentos, que son productos de la degradación del suelo por la erosión hídrica, afectando a las estructuras hidráulicas que están construidas sobre el lecho del río. El efecto económico frente al problema mencionado producirá impactos negativos a las estructuras hidráulicas generando mayores costes en el mantenimiento e inversiones. El efecto ambiental de los sedimentos van alterar la calidad del agua para el consumo humano, para la vida silvestre y el suelo. El efecto social que traerá consigo son las molestias e incomodidades por parte de la población debido al mal funcionamiento de las estructuras hidráulicas ya que se verán perjudicados por el limitado acceso al uso de agua. Los resultados de la investigación contribuirán con la gestión de recursos hídricos dentro de la cuenca del río Santa con la finalidad de servir como apoyo en la toma de decisiones de carácter técnico y político, asimismo, serán utilizados como información y/o antecedentes para documentos de gestión de Recursos Hídricos, las que servirán a las instituciones públicas y privadas.

1.4. Delimitación.

El estudio se realizó dentro de la cuenca del río Santa, esta cuenca tiene una superficie de 10409.15 km², considerando el punto de desfogue en la estación hidrosedimentológica “Condorcero” ubicada en las coordenadas WGS84 17 L, 801375.00 m E - 9041858.00 m N. Políticamente, se localiza en los departamentos de Ancash y La Libertad, comprendiendo total o parcialmente las provincias de: Bolognesi, Recuay, Huaraz, Carhuaz, Yungay, Huaylas, Santa, Corongo, Pallasca y Santiago de Chuco. La delimitación propuesta de la cuenca del río Santa tiene una altitud mínima de: 468 m.s.n.m. y máxima de: 6768 m.s.n.m.

Figura 1

Mapa de ubicación del área de estudio.



Nota. En la figura se muestra la delimitación de la Cuenca del río Santa.

II. MARCO TEÓRICO.

2.1. Antecedentes de Investigación.

Antecedentes Internacionales.

Valverde (2018) publicó en la tesis para obtener el título profesional de ingeniero forestal titulada “Modelación hidrológica para cuantificar la producción de agua y sedimento actual y futuro a partir de cambios de cobertura forestal, sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú”. Cuyo objetivo fue evaluar los cambios en la producción de agua y sedimento bajo diferentes escenarios de cambio de cobertura forestal. La herramienta usada fue el modelo hidrológico SWAT para evaluar el comportamiento de la producción de agua y sedimento. Para el cambio de cobertura forestal se consideraron dos escenarios, el primero fue eliminar las plantaciones forestales y dejar el suelo descubierto y el segundo eliminar las plantaciones y dejar que la vegetación se regenere naturalmente. Los resultados indicaron que la producción de agua sufrió un aumento de 1,30% para el primer escenario y un descenso de 0,69% para el segundo escenario. La sedimentación aumentó para el primer escenario 2,80% pero para el segundo escenario disminuyó en 1,95%. Se concluyó que al cambiar la cobertura forestal de un sitio, la dinámica hídrica se modifica generando una afectación en la producción de caudal líquido y caudal sólido.

Tamayo (2017) publicó en la tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de recursos hídricos titulada “Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos estimados con el modelo soil wáter assessment tool (SWAT) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados”. Cuyo objetivo fue de evaluar los caudales líquidos y la producción de sedimentos de la cuenca aportante al proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados utilizando el modelo hidrológico SWAT. La herramienta usada fue el modelo hidrológico SWAT que tiene como propósito crear o revisar las bases de datos del modelo en función de la información disponible del área de estudio respecto a clima, cobertura de suelo o tipos de suelo. Los resultados respecto a los criterios estadísticos de desempeño fueron para la estación H0714: Calibración NSE=0.74, PBIAS=-5.11, RSR=0.51 y para la validación NSE=0.62, PBIAS=-9.71, RSR=0.28, para la estación H0715: Calibración NSE=0.81, PBIAS=1.83, RSR=0.43 y para la validación NSE=0.67, PBIAS=-8.57, RSR=0.37, se obtuvo como producción de sedimentos con el modelo SWAT: Estación H0714= 816

(t/km²*año) y H0715= 676 (t/km²*año). Se concluyó que la simulación de caudales líquidos indica que el modelo SWAT es capaz de estimar el ciclo hidrológico centro del río Coca a un paso de tiempo mensual. La relación entre caudales líquidos estimados por el modelo y observados en la cuenca a nivel mensual es satisfactoria, considerando que los criterios estadísticos (NSE, PBIAS y RSR), están en un rango catalogado como bueno y muy bueno de acuerdo a los criterios exigidos.

Sánchez et al. (2017) publicaron en el artículo científico titulado “Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT”. Cuyo objetivo fue estimar la cantidad de sedimentos que produce la cuenca del río Sordo, estimando y calibrando el modelamiento. La herramienta que se utilizó fue el modelo hidrológico semidistribuido SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua). Los resultados fueron para la producción mensual de sedimentos, simulada por el modelo mostró buen ajuste, con valores de 0.59 y 0.51 para r² y NSE, respectivamente, con una máxima cantidad de sedimentos de 10 ton/ha y mínimo de 0 ton/ha. Se concluyó que el modelo SWAT se calibró y validó de manera satisfactoria en la cuenca del río Sordo en Oaxaca, el modelo SWAT permitió estimar de forma suficiente la producción de sedimentos en la cuenca del río Sordo.

Cruz et al. (2021) señalaron en el artículo científico titulado “Uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT”. Cuyo objetivo fue aplicar el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) para evaluar el impacto del cambio de uso de suelo sobre el escurrimiento y los sedimentos en la cuenca del río Chapingo de 1999 a 2015. La herramienta que se utilizó fue el modelo hidrológico semidistribuido SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua). Los resultados fueron que la aplicación del SWAT calibrado y validado sólo para escurrimiento para el periodo 1999-2015 no detectó cambios en el escurrimiento ($p = 0.2351$) y sedimentos ($p = 0.4430$) en función del cambio de uso de suelo determinado. Se concluyó que la correlación entre el escurrimiento y los sedimentos anuales simulados con SWAT fue significativa ($p = 0.0116$), con un R² bajo (0.36), atribuible a la falta de datos de campo de sedimentos para calibrar y validar el SWAT.

Ramirez (2020) publicó en la tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de recursos hídricos titulada “Modelación Hidrológica y de cambio climático para simular la producción de agua, los niveles de erosión y producción de sedimentos, con diferentes coberturas de suelo en la subcuenca Aguná, Escuintla, Guatemala”. Cuyo objetivo fue Estimar la producción actual de agua, los niveles de erosión hídrica y sedimentos utilizando

modelación hidrológica y escenario de cambio climático para el año 2050, para la selección de cambio de cobertura/uso de suelo en la subcuenca Aguná, Escuintla, Guatemala. La herramienta que se utilizó fue el modelo hidrológico semidistribuido SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua). Los resultados muestran que la subcuenca Aguná, es excedentaria de agua. Esto debido a que la precipitación (3,757.17 mm) es mayor a la evapotranspiración (629.55 mm) y el 79.40% del total de precipitación se convierte en flujo de salida o caudal, como promedio anual, con respecto a la producción de sedimento se estima una descarga anual de 144,983.61 Ton. Se concluyó que la herramienta de evaluación de agua y suelo (SWAT) permitió evidenciar el comportamiento de las distintas variables del ciclo hidrológico y los efectos que producen relacionados a la producción de erosión y sedimentación de subcuenca Aguná a pesar de no contar con datos observados que permitieran la calibración del modelo, permite obtener una aproximación de las condiciones actuales.

Antecedentes Nacionales.

Solari (2018) publicó en la tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Minería y Medio Ambiente titulada “Aplicación del modelo SWAT en la evaluación de impactos en la subcuenca del río Suyamarca por las actividades de la unidad operativa Pallancata”. Cuyo objetivo fue de evaluar su utilidad para identificar impactos al caudal por operaciones de la Unidad Operativa Pallancata. La herramienta que se empleó fue el modelo SWAT para estimar los caudales mensuales en las Unidades Hidrográficas (UH) a nivel local (UH Suyamarca III, Suyamarca IX y Ranichico) de la cuenca del río Suyamarca, Los resultados fueron la reducción de caudal en los escenarios Sin proyecto y Con proyecto fluctúa entre 0% y 6.4% en la unidad hidrográfica Ranichico, entre 0% y 3.5% en la unidad hidrográfica Intercuenca Suyamarca III y entre 0% y 1.5% en la unidad hidrográfica Intercuenca Suyamarca IX. Por lo tanto, es posible realizar una estimación del impacto ambiental por las operaciones de la Unidad Operativa Pallancata, aunque dada la magnitud del proyecto el impacto sea mínimo y se encuentre dentro del rango de error del modelo. Se concluyó que las simulaciones realizadas en el proceso de modelación permitieron evaluar la serie histórica de caudales generado para el período 1998-2014 bajos los escenarios Sin proyecto y Con Proyecto.

Valladares (2017) publicó en la tesis para obtener el título profesional de ingeniero agrícola titulada “Respuesta hidrológica de la cuenca del río Santa en condiciones de cambio

climático”. Cuyo objetivo del estudio fue conocer el impacto del cambio climático en la respuesta hidrológica de la cuenca del Rio Santa para el periodo (2050 – 2059). La herramienta que se utilizó fue el modelo hidrológico semidistribuido SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua). Los resultados fueron que se obtuvo valores de NS, PBIAS, RSR y R2 de 0.89, 8.26, 0.34 y 0.92 respectivamente, posteriormente se realizó la calibración de los sedimentos, alcanzado valores de NS, PBIAS, RSR y R2 equivalentes a 0.64, -7.42, 0.6 y 0.66 respectivamente. Los caudales y sedimentos simulados fueron comparados con los datos observados en la estación de control Condorcerro, durante el periodo 2006 – 2011 para calibración y 2012 – 2015 para validación. Los resultados obtenidos dentro de una superficie de 10419.26 km² hasta la estación Condorcerro fueron que para la disponibilidad hídrica al 50% de persistencia indican un incremento de +18% durante el periodo húmedo y +7% durante el periodo seco; la disponibilidad hídrica al 75% de persistencia incrementa un +10% durante el en periodo húmedo y +2% durante el periodo seco; la oferta hídrica al 90% de ocurrencia muestra +6% en periodo húmedo y -5% en periodo seco, obteniendo una carga sedimentaria en el rio de 17.32 Millones de toneladas para el 2055. Se concluyó que el decenio futuro (2050 - 2059) proyecta un +19% de agua, así como un +9.25% de sedimentos respecto al decenio observado en la estación Condorcerro.

Velásquez (2019) publicó en la tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil titulada “Análisis de los Potenciales Problemas de Sedimentación y medidas de mitigación en la Presa Palo Redondo”. Cuyo objetivo fue de sugerir medidas que mitiguen las posibilidades de una rápida sedimentación en su embalse. La herramienta utilizada fue SWAT (Soil & Water Assessment Tool). Los resultados fueron que el estudio del sistema hidráulico involucrado en la Presa Palo Redondo permitió entender el por qué la Cuenca del Santa es una de las más erosivas del país. Se evaluó la producción de sedimentos en la subcuenca Palo Redondo ante eventos extremos mediante el modelo Kineros obteniéndose un volumen de 6.6 MMC de sedimentos producto de dos tormentas. Asimismo, teniendo en cuenta el volumen de 5.9 MMC estimado por descargas anuales de la Quebrada, se tendría un aporte total por parte de la Quebrada Palo Redondo de 12.5MMC. Asimismo, se aplicó el método de Avedaño para estimar el CES obteniendo 9.2% y en consecuencia una tasa de sedimentos de 27.4 Ton/ha. Se concluyó que el modeló la subcuenca de Tablachaca en

SWAT con un registro de precipitación de 36 años, obteniendo una tasa de pérdidas potenciales a través de la herramienta SWAT de 297.7 Ton/ha.

Salas (2019) publicó en la tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil titulada “Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo SWAT”. Cuyo objetivo del estudio fue estimar la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca a través del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para lograr identificar los puntos de mayor erosión y poder así plantear medidas de protección. La herramienta utilizada fue SWAT (Soil & Water Assessment Tool). Los resultados respecto al rendimiento del modelo durante la calibración y validación fueron: NSE=-0.98, PBIAS=-8.0, RSR=0.15 y NSE=0.62, PBIAS=-20.8, RSR=0.60 respectivamente. El total de producción de sedimentos estimada para todas las subcuencas fue de 1'787935 en toneladas por año. Se concluyó que la formulación del modelo hidrológico, con los datos disponibles, logró representar de manera satisfactoria la dinámica hidrológica en la zona de estudio. Ello dio lugar, a que el modelo sea capaz de simular los procesos hídricos y sedimentológicos de la cuenca.

Condori (2019) publicó en la tesis para obtener el título profesional de ingeniero sanitario y ambiental titulada “Efecto del cambio de uso del suelo sobre la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Llallimayo - Melgar - Puno”. Cuyo objetivo es determinar el efecto del cambio de uso del suelo por la actividad agropecuaria, sobre la producción de agua y sedimentos de la subcuenca del río Llallimayo mediante el modelo hidrológico SWAT. La herramienta utilizada fue SWAT (Soil & Water Assessment Tool). Los resultados obtenidos en la validación se obtuvo un coeficiente R^2 de 0.79 y un coeficiente NSE de 0.75 en caudales diarios, del mismo modo, los caudales con escenario de cambio simulados se incrementaron en épocas de máxima avenida en un promedio de 62 m^3/s equivalente a un 8.5 % con respecto a caudal base y en épocas de estiaje disminuyó en un promedio de 5 m^3/s equivalente a un 12.36% con respecto con el caudal base, así mismo, se observó un incremento en la generación de sedimentos en un promedio de 1.88 Tn/ha-mes equivalente a un 75% en los meses de máxima avenida. Se concluyó que el cambio de uso de suelo tiene un efecto negativo, provocando aumentos en las pérdidas de recurso hídricos en los meses de máxima avenida y menos disponibilidad hídrica en los meses de estiaje, de la misma forma provoca erosión de suelos por el incremento de arrastre de sedimentos.

2.2. Bases Teóricas.

Cuenca Hidrográfica.

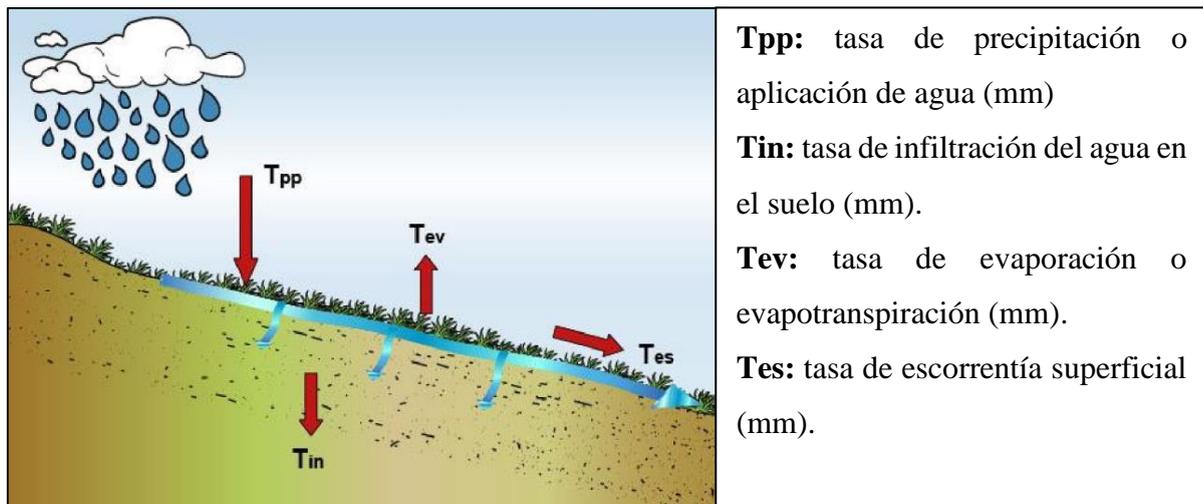
Vásquez et al. (2016) definen que la cuenca hidrográfica desde el punto hidrológico es el área geográfica natural o unidad de territorio delimitada por una divisoria topográfica (Divortium Aquarum), que capta las precipitaciones y drena el agua de escorrentía hacia un colector común, denominado río principal. (p.15)

Erosión Hídrica.

Morgan et al. (1994) definen que la erosión hídrica permanece a nivel mundial como la forma más importante de degradación de la tierra. Sus efectos incluyen reducciones en la productividad del suelo y los cultivos, aumento de la sedimentación, inundaciones, contaminación río abajo y en declive valores de la tierra, como tierras agrícolas de alta calidad convertido en páramo sin valor. (p. 5)

Figura 2

Esquema de una ladera con lluvia y sus demás componentes.



Nota. En la figura se muestra la tasa de precipitación y como recorre por la superficie de un terreno. Tomado de: (Vásquez et al., 2016). *Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas*. Lima, Perú. Pág. 33

Tipos de Erosión Hídrica.

Erosión por Salpicadura. Cisneros et al. (2012) definen que “Se debe al impacto de las gotas de lluvia sobre los agregados de un suelo desnudo”. (p.67)

Erosión Laminar. Cisneros et al. (2012) definen que “Es una forma de erosión superficial que se produce por acción del escurrimiento, perdiéndose una fina y uniforme capa de toda la superficie del suelo en forma de lámina”. (p.68)

Erosión por Surcos. Cisneros et al. (2012) definen que “Conforme se incrementan los caudales, la altura del agua y su velocidad, se pasa de un flujo de tipo laminar a uno concentrado, definido por la microtopografía del lote”. (p.69)

Erosión en Cárcavas. Cisneros et al. (2012) argumentan que las cárcavas (también llamadas barrancas, o simplemente zanjas) son la manifestación más visible y llamativa del proceso erosivo. Se desarrollan a partir de la acción del escurrimiento sobre la superficie, luego de que se alcanza un cierto caudal y velocidad del flujo, y se considera una cárcava como aquella forma de erosión que no puede ser borrada por las labranzas. (p.70)

Erosión por Movimientos en masa. Cisneros et al. (2012) mencionan que “Implica el desplazamiento de grandes volúmenes de material en condiciones especiales de humedad, pendiente y tipo de suelo. Los movimientos en masa se producen frecuentemente en suelos someros, asentados sobre un material impermeable, como rocas graníticas, bajo fuertes pendientes”. (p.71)

Erosión de Surcos Permanentes. Cisneros et al. (2012) refieren que los bordes y fondos de ríos y arroyos son las zonas de la cuenca más susceptibles a la erosión en virtud de su proximidad al cauce y a que deben soportar la máxima energía de las crecientes, ya que son los lugares de traslado y concentración de escurrimientos. (p.72)

Factores que afectan a la Erosión Hídrica.

Subramanya (2008) manifiesta que la cantidad de sedimento que se produce por la erosión hídrica en una cuenca depende de gran parte de los factores relacionados con el clima, el suelo, la topografía, la cobertura del suelo y las actividades humanas dentro de la cuenca. (p. 375), los principales efectos de estos parámetros se resumen y se mencionan en la siguiente tabla.

Tabla 1

Factores que afectan la erosión hídrica.

Factor	Parámetro	Efecto
Clima	Intensidad de la lluvia	Erosión por salpicadura

	Duración de la lluvia	Erosión en el flujo
	Temperatura	Acción de meteorización
Características del suelo	Característica de la masa de suelo (granulación, porosidad, contenido de humedad)	Tasa de infiltración y escorrentía, por lo tanto, tasa de erosión
	Tamaño y forma de grano	Tasa de erosión y modo de transporte
Topografía	Pendiente (orientación, grado y longitudes)	Pendiente pronunciada: mayor energía de flujo, mayor erosión y tasa de transporte.
Cobertura del suelo	Vegetación /cubierta vegetal	Retraso de tasa de flujo y erosión, protección de la erosión por salpicadura.
Uso del suelo (actividades humanas)	Prácticas agrícolas, mineras, carreteras, edificios, construcción, entre otros.	Incremento de tasa de erosión
	Reservorios	Sedimentación

Nota. En la tabla se muestra los principales factores que participan en la erosión hídrica del suelo. Tomado de: Subramanya k. (2008). Ingeniería Hidrológica. India, Kanpur. (P.375), así mismo Vásquez et al. (2016) coinciden que son 5 y los mismos factores determinantes para los sucesos de erosión hídrica.

Etapas de la erosión Hídrica.

Asturias (1986) menciona que la mecánica del proceso de erosión hídrica consta de tres etapas:

Etapas de Desprendimiento: Consiste en el desprendimiento de las partículas del suelo por la acción del impacto de las gotas de lluvias en la superficie, y por el constante golpeteo de las mismas, que mantienen en suspensión las partículas finas y en rodamiento

las gruesas. La dispersión de las partículas sella los poros superficiales, lo que disminuye la capacidad de infiltración del agua.

Etapa de Arrastre o transporte: El arrastre de partículas, sucede cuando el agua no se filtra en el suelo y se produce el escurrimiento superficial. La capacidad erosiva de este último está determinada por la cantidad, intensidad y distribución de las gotas de lluvia; asimismo, por la capacidad de retención del agua en el suelo y por la velocidad de la lámina de agua.

Etapa de Deposición: Se presenta cuando la velocidad del flujo disminuye y las partículas en suspensión se sedimentan en la superficie del suelo.

Metodología para cuantificar la Erosión Hídrica.

Ecuación Universal de Pérdida de suelo Revisada (RUSLE). Esta ecuación fue desarrollada por Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. y Porter, J.P. en el año de 1991. Riesco (2015) indica que este modelo mantiene la estructura paramétrica de la USLE, aunque cambian algunos algoritmos dentro de cada uno de los parámetros que representan a los factores de la erosión. Quizás, el cambio más significativo haya sido la informatización de esta tecnología, de tal manera que cada factor se puede determinar recurriendo a las bases de datos integradas en el programa informático en el que se apoya. (p. 41)

Renard et al. (1991) consideran que la ecuación básica de RUSLE es la siguiente:

Ecuación 1. Ecuación RUSLE – (Renard et al., 1991).

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

Donde:

A: Pérdida anual promedio de suelo por unidad de área con unidades

de: $\left(\frac{\text{tonelada}}{\text{hectárea.año}}\right)$ o $\left(\frac{t}{\text{ha.año}}\right)$

R: Factor de erosividad por la precipitación pluvial. La unidad de medida es:

$$\left(\frac{\text{Megajoule.milímetros}}{\text{hectárea.hora.año}}\right) \text{ o } \left(\frac{\text{MJ.mm}}{\text{ha.hr.año}}\right)$$

K: Factor de erodabilidad del suelo. La unidad de medida es:

$$\left(\frac{\text{toneladas métricas.hectárea.hora}}{\text{hectárea.megajoule.milímetros}}\right) \text{ o } \left(\frac{t.\text{ha.hr}}{\text{ha.MJ.mm}}\right)$$

L: Factor de longitud de pendiente (adimensional).

S: Factor de inclinación o gradiente de pendiente (adimensional).

C: Factor de cobertura vegetal (adimensional)

P: Factor de método de control de erosión (adimensional)

Determinación de los Factores de USLE/RUSLE.

Factor R. Angulo y Beguería (2013) refieren que la estimación de la erosividad de la lluvia presenta tres inconvenientes: i) la escasez de estaciones de medición de la energía de la lluvia debido al coste del instrumental requerido; ii) la incertidumbre asociada al uso de modelos de estimación a partir de datos pluviográficos; iii) y la incertidumbre espacial derivada de la necesidad de interpolar datos puntuales para conocer la erosividad de la lluvia en una región geográfica. (p.64)

Método para Determinar el Factor de Erosividad con la Ecuación Según Renard & Freimund (1994). Ochoa (2015) señala que en esta ecuación incluyó el índice modificado de Fourier (IMF) y que deben ser valores superiores a 55 mm, la ecuación de la erosividad es la siguiente:

Ecuación 2. Ecuación de Renard & Freimund (1994).

$$R_{(i,j)} = 95.77 - 6.081(IMF) + 0.4770(IMF)^2 \quad (2)$$

Donde:

$R_{(i,j)}$: Factor R por celda (i,j) ($\frac{MJ.mm}{ha.hr.año}$)

IMF: Índice Modificado de Fournier (IMF), (mm)

Flores (2015) menciona que el índice modificado de Fournier fue desarrollado por Arnoldus en 1978 y dice que es un método práctico que utiliza una fórmula obtenida por regresión lineal en la cual correlacionó valores conocidos de R con las lluvias medias anuales.

Ecuación 3. Índice Modificado de Fourier (1960).

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (3)$$

Dónde:

IMF: Índice Modificado de Fournier en mm (Índice de agresividad climática)

P_i: Precipitación media mensual (mm)

P: Precipitación media anual (mm)

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2010). Clasifica el IMF como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 2

Clasificación del IMF.

IMF (mm)	Agresividad Climática
0 - 60	Muy Bajo
60 - 90	Bajo
90 - 120	Moderado
120 - 160	Alto
>160	Muy Alto

Nota. En la tabla se muestra el índice Modificado de Fourier. Tomado de UNESCO (2010), Atlas de zonas áridas de América Latina y El Caribe. (P. 4)

Garro (2019) considera que el factor de la erosión se clasifica por rangos, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3

Rangos típicos del factor R.

Clase	$R \left(\frac{MJ.mm}{ha.hr.año} \right)$
Muy baja	<500
Baja	500 - 1000
Mediana	1000 - 3000
Alta	3000 - 6000
Muy Alta	>6000

Nota. En la tabla se muestra los rangos de erosividad. Tomado de Mannaerts, C, 1999, Factores de Erosión. Curso de postgrado en levantamiento de recursos hídricos. Cochabamba, Bolivia.

Factor K. El departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1978) menciona que, “El factor de erodabilidad del suelo (K) en RUSLE explica la influencia de las propiedades del suelo en la pérdida de suelo durante las tormentas”. (p.68)

Método de Determinación del Factor de Erodabilidad del Suelo con uso del Mapa Digital de Suelos del Mundo (DSMW).

Se utilizó la fórmula de Williams (1975).

Ecuación 4. Fórmula de Williams (1975).

$$K = 0.1317 f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (4)$$

Donde:

Sand: Arena, Clay(cl): Arcilla, Silt(si): Limo y Orgc: Carbono orgánico.

$$f_{csand} = (0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 m_s (1 - \frac{m_{silt}}{100})]) \quad (4.1)$$

$$f_{cl-si} = (\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}})^{0.3} \quad (4.2)$$

$$f_{orgc} = \left[1 - \frac{0.25 orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 orgC]} \right] \quad (4.3)$$

$$f_{hisand} = \left[1 - \frac{0.70 (1 - \frac{m_s}{100})}{(1 - \frac{m_s}{100}) + \exp[-5.51 + 22.9 (1 + \frac{m_s}{100})]} \right] \quad (4.4)$$

Tabla 4

Clasificación de erodabilidad con diferentes rangos del factor K.

Grupo	K - Factor	Naturaleza del suelo	Clase de erodabilidad
I	0.0 - 0.10	Suelo de pozo permeable que tiene sustratos pedregosos	Bajo
II	0.11 - 0.17	Suelos bien drenados en material libre arenoso clasificado	Moderado
III	0.18 - 0.28	Suelo maltratado, moderadamente fino y texturizado.	Alto
IV	> 0.28	Limo mal clasificado o suelo muy arenoso, bien y moderadamente drena el suelo.	Muy Alto

Nota. En la tabla se muestra la clasificación de erodabilidad con diferentes rangos del factor K. Tomado de Toryila 2016, a review of soil erodibility.

Factor LS. Renard et al. (1997) refieren que el efecto de la topografía o la erosión en RUSLE se explica por el factor LS. La erosión aumenta a medida que aumenta la longitud de la pendiente y se considera mediante el factor de longitud de la pendiente (L). El factor

de inclinación de la pendiente (S) refleja la influencia del gradiente de la pendiente en la erosión. (p.104)

Quintero et al. (2017) mencionan que para obtener el cálculo del factor L con el área de drenaje aportadora se procedió a realizar la dirección de flujo y acumulación del flujo con las herramientas Flow Direction y Flow Accumulation respectivamente. Obtenidas estas dos imágenes se halló el Factor L en “Raster Calculator” empleando la fórmula de Desmet & Govers (1996).

Ecuación 5. Factor de Longitud de pendiente Desmet & Gober (1996).

$$L_{(i,j)} = \frac{[A_{(i,j)} + D^2]^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{X^m D^{m+2} (22.13)^m} \quad (5)$$

Donde:

$A_{(i,j)}$ = es el área aportadora unitaria a la entrada de un pixel (celda).

D = es el tamaño del pixel.

X = es el factor de corrección de forma.

m = coeficiente.

Rodríguez y Suárez (2008) señalan que en el modelo RUSLE, “m, se define como una función continua” que se incrementa con el ángulo de pendiente θ (en grados) y es de la forma:

Ecuación 6. Coeficiente m por Desmet & Gober (1996).

$$m = \frac{k}{(1 + k)} \quad (6)$$

Donde, k, es la relación de erosión en surcos a erosión en entresurcos calculada a partir de:

$$k = \frac{\frac{\text{sen}\theta}{\text{sen}(5.143^\circ)}}{3(\text{sen}\theta)^{0.8} + 0.56} \quad (6.1)$$

Donde:

θ : Ángulo de la pendiente

Grado de pendiente (Factor S): McCool et al. (1987) señala que en un esfuerzo por revisar la relación para el factor S en el USLE, derivó dos relaciones para pendientes moderadas ($S < 9\%$) y de mayor inclinación ($S \geq 9\%$) es decir:

Ecuación 7. Grado de Pendiente (S) (McCools et al., 1987).

$$S_{(i,j)} = 10.8 \times \text{sen}(\beta_{(i,j)}) + 0.03 \quad \text{Tan}(\beta_{(i,j)}) < 9\% \quad (7.1)$$

$$S_{(i,j)} = 16.8 \times \text{sen}(\beta_{(i,j)}) - 0.5 \quad \text{Tan}(\beta_{(i,j)}) \geq 9\% \quad (7.2)$$

Donde:

$\beta_{(i,j)}$: Ángulo de la pendiente de la inclinación (grados)

Producto LS. Desmet y Gober (1996) con McCools et al. (1987) sostienen que el factor LS de la ecuación universal de pérdidas de suelo pueden ser encontrado con las siguientes ecuaciones, según el ángulo de la pendiente:

Ecuación 8. Factor topográfico (LS) Desmet y Gober (1996) y McCools (1987).

$$LS = \left(\frac{[A_{(i,j)} + D^2]^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{X^m D^{m+2} (22.13)^m} \right) \times (10.8 \times \text{sen}(\beta_{(i,j)}) + 0.03) \quad (8.1)$$

$$\text{Tan}(\beta_{(i,j)}) < 9\%$$

$$LS = \left(\frac{[A_{(i,j)} + D^2]^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{X^m D^{m+2} (22.13)^m} \right) \times (16.8 \times \text{sen}(\beta_{(i,j)}) - 0.5) \quad (8.2)$$

$$\text{Tan}(\beta_{(i,j)}) \geq 9\%$$

Donde:

$\beta_{(i,j)}$: ángulo de la pendiente de la inclinación (grados)

$A_{(i,j)}$ = Acumulación del flujo a nivel de pixel.

D = Lado del pixel

X = Coeficiente de Forma (x=1)

m = es el sub factor m (coeficiente).

Valores del factor LS para diferentes pendientes. Según la tabla siguiente:

Tabla 5

Factor LS según grupos de pendientes.

Grupos de Pendientes en %	Factor LS
0 - 3	0.3
3 - 12	1.5
12 - 18	3.4
18 - 24	5.6
24 - 30	8.7
30 - 60	14.6

60 - 70	20.2
70 - 100	25.2
> 100	28.5

Nota. En la tabla se muestra los grupos de pendientes. Tomado de Portuguesez, M. 2015, Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la Cuenca del río Sigwas utilizando Geoinformática. Anales Científicos, 76(2), 324. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>.

Factor C. Cisneros et al. (2012) definen que el factor de manejo de cultivos representa la relación de pérdida del suelo a partir de una condición específica de cultivo o cobertura, con la pérdida del suelo a partir de un estado de barbecho continuo para el mismo suelo, pendiente y precipitación pluvial. La condición de barbecho desnudo, laboreado a favor de la pendiente toma el valor $C=1$. (p.79)

Anin et al. (2013) mencionan que para poder obtener el factor de cobertura vegetal (C), se puede utilizar la teledetección como herramienta, gracias a estos se puede aplicar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado, que es uno de los índices de vegetación más utilizados como se indica en la siguiente ecuación.

Ecuación 9. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado - Rouse (1974).

$$NDVI = \frac{(IRC - IR)}{IR + IRC} \quad (9)$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado.

IR: Bandas correspondientes a la porción del rojo.

IRc: Bandas correspondientes al infrarrojo cercano.

Yali (2018) señala que con el valor del NDVI obtendremos el factor de la cobertura vegetal, se pueden utilizar las siguientes fórmulas:

Ecuación 10. Factor de la cobertura vegetal - Lin (2002).

$$C = 0.1 \left(\frac{-NDVI + 1}{2} \right)$$

Donde:

C: Se adecua para la realidad del Perú.

Tabla 6*Valores de cobertura vegetal (C).*

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1
Bosque o matorral denso	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobre pastoreada	0.1
Maíz, sorgo, alto rendimiento, laboreo convencional	0.20 – 0.55
Maíz, sorgo, alto rendimiento, sin laboreo convencional	0.50 – 0.90
Maíz, sorgo, bajo rendimiento, laboreo mínimo	0.02 – 0.10
Maíz, sorgo, alto rendimiento, laboreo con chisel	0.12 – 0.20
Maíz, sorgo, bajo rendimiento, laboreo con chisel	0.30 – 0.45
Algodón	0.40 – 0.70
Pradera herbácea	0.01 – 0.025
Soya	0.20 – 0.50
Trigo	0.10 – 0.40
Arroz	0.10 – 0.20
Cacahuete	0.30 – 0.80
Frutales con cobertura vegetal	0.01 – 0.8
Caña de azúcar	0.56
Arbolado denso	0.001-0.003
Arbolado forestal clareado	0.003-0.009
Arbolado muy clareado (25-60 %)	0.041
Matorral con buena cobertura	0.003-0,013
Matorral ralo y eriales	0.20-0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Pasturas	0.15
Plantas herbáceas y matorjos (100 %)	0.003
Plantas herbáceas y matorjos (60 %)	0.035
Cubierta escasa (60 %)	0.15-0.09
Cubierta inapreciable	0.45

Nota. En la tabla se muestra los valores de cobertura vegetal (C). Tomado de Cabrejos, M. N. 2016, Modelamiento geoespacial en la determinación del riesgo, vulnerabilidad y de la cuantificación de la erosión hídrica en la microcuenca del río Atué - Amazonas.

Factor P. Osti et al. (2007) definen que las prácticas mecánicas o manejo del terreno son un factor atenuante del proceso erosivo. Su principal objetivo es controlar los escurrimientos superficiales para disminuir la erosión hídrica en terrenos con pendiente. En la ecuación universal de pérdida de suelo el valor de P varía de 0 a 1 e indica el valor de la

práctica de conservación al compararse con un terreno continuamente barbechado en el sentido de la pendiente.

Tabla 7

Valores del factor P.

Pendiente	Contorno	Franjas	Terrazas
0 - 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 - 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 - 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 - 26.8	0.90	0.45	0.18
> 26.8	1.00	0.50	0.20

Nota. En la tabla se muestra los valores que puede tomar el factor P según su pendiente ya sea en contornos, franjas y terrazas. Tomado de Parveen (2012). Enfoque integrado de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y el sistema de información geográfica (GIS) para la evaluación del riesgo de pérdida de suelo en la cuenca superior del sur de Koel, Jharkhand. Ranchi, India. (P. 591)

Nivel de Erosión según RUSLE.

El nivel de la erosión hídrica se debe conocer con el fin de realizar propuestas para aminorarlas, se utilizará la siguiente tabla, que muestra pérdidas de suelos con valores desde zonas con erosión muy baja hasta zonas de erosión extrema.

Tabla 8

Niveles de Erosión.

Pérdidas de suelo	Interpretación
0 (t/ha y año)	Zonas no susceptibles al proceso erosivo, como puedan ser espacios urbanos, carreteras, embalses, entre otros.
0 a 5 (t/ha y año)	Zonas con niveles de erosión muy bajos y pérdidas de suelo tolerables. No hay erosión neta.
5 a 10 (t/ha y año)	Zonas con niveles de erosión bajos y pérdidas de suelo que pueden ser tolerables. Probablemente no hay erosión neta.

10 a 25 (t/ha y año)	Zonas con procesos erosivos leves. Existe erosión, aunque no es apreciable a simple vista.
25 a 50 (t/ha y año)	Zonas con procesos erosivos moderados. Existe erosión, aunque puede no ser apreciable a simple vista.
50 a 100 (t/ha y año)	Zonas con procesos erosivos graves. Existe erosión y es apreciable a simple vista.
100 a 200 (t/ha y año)	Zonas con procesos erosivos muy graves. Existe erosión y es manifiesta a simple vista.
Más de 200 (t/ha y año)	Zonas con procesos erosivos extremos. Existe erosión y es evidente a simple vista.

Nota. En la tabla se muestra las pérdidas de suelo en (t/ha y año) y su respectiva interpretación. Tomado de (IDER Ingeniería y Desarrollo Rural, S.A., 2005). Mapa de erosión de suelos de la Comunidad Autónoma del País Vasco. (P. 142)

Producción de Sedimentos.

Andreazzini (2014) argumenta que “La cantidad de sedimentos entregados por una cuenca hidrológica en la unidad de tiempo se define como producción de sedimentos”

Morera (2010) menciona que la alta carga de sedimento resulta un mayor problema para el desarrollo de los recursos hídricos a través de la sedimentación de embalses, captación de agua, sistemas de riego, daños a las turbinas, así como aumentar el costo del tratamiento de agua extraída de un río.

Modelos Hidrológicos.

Cabrera (2012) señala que los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Como consecuencia de ello, los modelos hidrológicos se usan:

Como herramienta para la gestión y planeamiento.

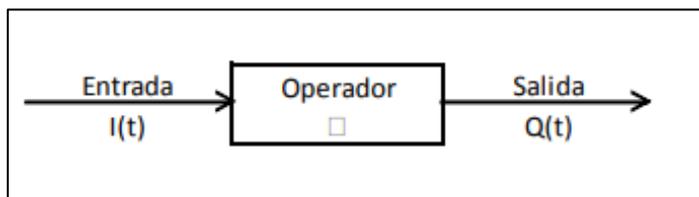
Para una mayor comprensión del rol de los componentes del ciclo hidrológico en una determinada cuenca.

Para extrapolar potenciales condiciones futuras a partir de condiciones actuales.

Como base para la modelación de otros procesos, como la calidad de agua, erosión, entre otros.

Figura 3

Esquema de un Sistema Hidrológico, mostrando entradas y salidas.



Nota. En la figura se muestra un esquema de un modelador hidrológico. Tomado de (Chow, 1994) citado por Cabrera, 2012. Modelos Hidrológicos.

Modelo Hidrológico Semi – distribuido SWAT – (Arnold et al., 1990).

Uribe (2010) define que SWAT son las siglas de Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua para una cuenca hidrográfica; el modelo a escala fue desarrollado por Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, and N.B. Sammons en el año de 1990 para el USDA y el Servicio Agrícola de Investigación (ARS). SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado.

El SWAT requiere información específica sobre el clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas para utilizar estas como datos de entrada. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, entre otros. Son modelados directamente por SWAT, entonces por lo mencionado, podemos citar a Fernández (2017) que menciona que el modelo hidrológico semi distribuido SWAT es un software que fácilmente se transforma en una herramienta de planificación puesto que permite valorar los efectos de los cambios de uso del suelo, de las actividades de restauración y de las distintas prácticas de conservación del suelo sobre el conjunto de la cuenca, optimizando de la toma de decisiones del gestor.

Beneficios del modelo SWAT. Uribe (2010) refiere que los beneficios de utilizar el modelo SWAT son los siguientes:

Interface gráfica con ArcGIS.

Impacto relativo de una variación en los datos de entrada (por ejemplo; cambios en prácticas de gestión, clima, vegetación, entre otros.)

Método ágil de extrapolación e integración de la información.

Simulación dirigida.

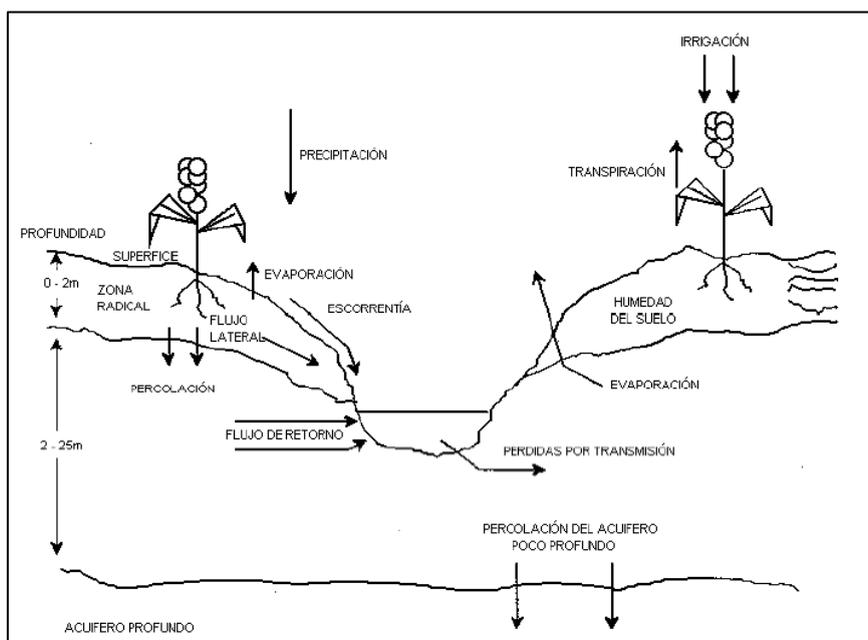
Disponibilidad inmediata de datos de entrada y salida.

Amplio proceso de iteraciones de procesos físicos.

Características del modelo Hidrológico Semi Distribuido SWAT. Uribe (2010) sostiene que SWAT permite varios procesos físicos diferentes para ser simulados en una cuenca hidrográfica. Para propósitos de la simulación, la cuenca hidrográfica será dividida en un número de sub-vertientes o sub-cuencas. La simulación hidrológica de la cuenca puede ser separada en dos divisiones mayores. La primera división es la Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico, la segunda división es la Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico.

Figura 4

Representación del Ciclo Hidrológico en SWAT.



Nota. En la figura se muestra el sistema del ciclo hidrológico. Tomado de (Fernández, 2017). Modelamiento Hidrológico de la Región Hidrográfica del Titicaca. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Lima, Perú. (P. 10)

Fase Terrestre del ciclo Hidrológico. Uribe (2010) menciona que esta fase controla la cantidad de agua, sedimentos, las cargas de alimento nutritivo y de pesticida al canal principal en cada subcuenca. El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basado en la ecuación del equilibrio de agua:

Ecuación 11. Ecuación del Equilibrio Hidrológico – (Arnold et al., 1990).

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (11)$$

Donde:

SW_t : Es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O)

SW_0 : Es el contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H₂O)

t : Es el tiempo (días)

R_{day} : Es la cantidad de precipitación en un día (mm H₂O)

Q_{surf} : Es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mmH₂O)

E_a : Es la cantidad de evapotranspiración en un día i (Mn H₂O)

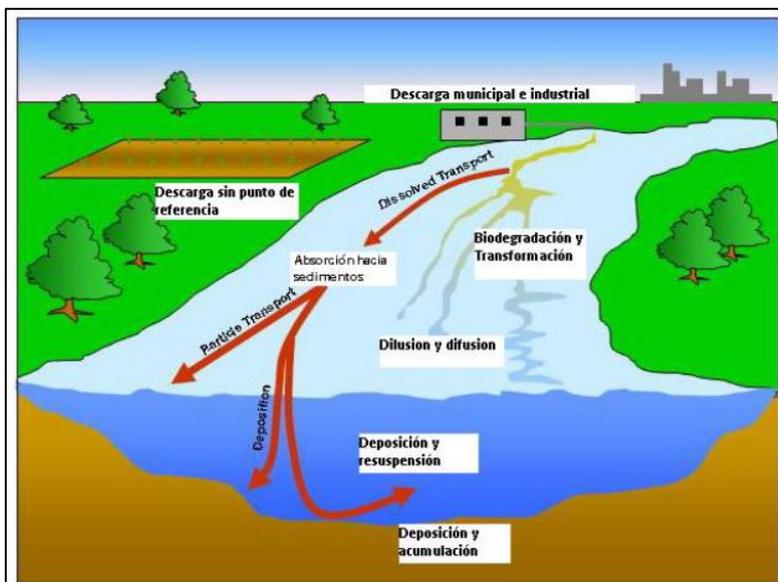
W_{seep} : Es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm H₂O)

Q_{gw} : Es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm H₂O)

Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico. Uribe (2010) define que esta fase se refiere al movimiento del agua, sedimentos, entre otros. A través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el vertedero.

Figura 5

Procesos de Corriente modelados por SWAT.



Nota. En la figura se muestra el recorrido del flujo de un río. Tomado de Fernández (2017). Modelamiento Hidrológico de la Región Hidrográfica del Titicaca. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Lima, Perú. (P. 16)

Estadísticos para evaluar el desempeño del modelo hidrológico. Para evaluar el rendimiento de cualquier modelo hidrológico existe una gama de indicadores estadísticos para catalogar el modelo desde inaceptable hasta excelente. Estos estadísticos fueron propuestos por diversos autores, como los siguiente:

Coefficiente de Nash Sutcliffe. Nash y Sutcliffe (1970) proponen la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) que es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de datos medida. Este parámetro indica qué tan bien la gráfica de datos observados versus simulados se ajusta a la línea 1: 1. $NSE = 1$, corresponde a una coincidencia perfecta del modelo con los datos observados. $NSE = 0$, indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, $-\infty < NSE < 0$, indica que la media observada es un mejor predictor que el modelo. La ecuación asociada a este coeficiente es la siguiente:

Ecuación 12. Coeficiente de Nash Sutcliffe (1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_m^{obs})^2} \quad (12)$$

Donde:

Q_i^{sim} es la escorrentía simulada por el modelo.

Q_i^{obs} es la escorrentía observada en la salida de la cuenca.

Q_m^{sim} es la media de la escorrentía observada.

Persistencia de la eficiencia del modelo (PBIAS). Moriasi et al. (2007) mencionan que el PBIAS mide la tendencia promedio de los valores simulados a ser mayores o menores que los observados. El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación de modelo precisa. Los valores positivos indican un sesgo de sobreestimación, mientras que los valores negativos indican un sesgo de subestimación del modelo. La ecuación asociada a este coeficiente es la siguiente:

Ecuación 13. Persistencia de la eficiencia del modelo (PBIAS) - Moriasi et al. (2007).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{obs}} * 100 \quad (13)$$

donde:

Q_i^{sim} es la escorrentía simulada por el modelo.

Q_i^{obs} es la escorrentía observada en la salida de la cuenca.

Relación de Desviación de Observaciones (RSR). Moriasi et al. (2007) señalan que la relación de desviación estándar de observaciones RSR se calcula como la relación de la RMSE y la desviación estándar de los datos medidos. RSR varía desde el valor óptimo de 0 hasta un gran valor positivo. Cuanto menor sea el RSR, menor será el RMSE y mejor será el rendimiento de la simulación del modelo.

Ecuación 14. Relación de Desviación de Observaciones RSR - Moriasi et al. (2007).

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{x=} (Q_i^{obs} - Q_m^{obs})^2}} \quad (14)$$

Donde:

Q_i^{sim} es la escorrentía simulada por el modelo.

Q_i^{obs} es la escorrentía observada en la salida de la cuenca.

Q_m^{sim} es la media de la escorrentía observada.

Estos criterios de evaluación se han establecido firmemente hasta la fecha en la literatura. sin embargo, Moriasi et.al (2007) han sugerido rangos de aceptación de este parámetro, como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9

Estadísticos recomendados para evaluar el desempeño del modelo hidrológico.

Valoración del Desempeño	Estadísticos Recomendados			
	RSR	NSE	PBIAS%	
			Escorrentía	Sedimento
Muy Buena	[0,0-0,5]	[0,75-1,00]	< ±10	< ±15
Buena	[0,5-0,6]	[0,65-075]	[±10 - ±15]	[±15 - ±30]
Satisfactoria	[0,6-0,7]	[0,50-0,65]	[±15 - ±25]	[±30 - ±55]
Insatisfactoria	> 0,7	< 0,50	> ±25	> ± 55

Nota. En la tabla se muestra los estadísticos con sus respectivos rangos de valoración. Recomendados. Tomados de Moriasi et.al (2007). Estadísticos recomendados con valoración del desempeño.

Propuesta de calibración manual de caudales líquidos. Si bien este proceso puede llegar a tornarse tedioso, es una metodología que nos permite relacionarnos de mejor manera con el comportamiento del modelo y así también con los parámetros que lo rigen.

Arnold et al. (2012) proponen un esquema el cual permite la calibración de varios parámetros y sus correspondientes ajustes. El procedimiento que se propone es simple, como primer punto se debe realizar la simulación en SWAT, posteriormente comparar los resultados calculados por el modelo con los reales, para evaluar cada resultado se estiman los tres parámetros estadísticos anteriormente mencionados, de las cuales se selecciona una para aceptar los resultados o rechazar los resultados.

Una buena de referencia de calibración manual es el cuadro presentado a continuación que muestra la cantidad de veces que se usó los distintos parámetros para calibrar distintos modelos para distintas cuencas, por lo cual tomando esa referencia en este proyecto se han usado los parámetros más usados por otros usuarios.

Figura 6

Parámetros para calibrar modelos de 64 distintas cuencas de estudios pasados.

Table 1. Calibration parameters reported in 64 selected SWAT watershed studies.^[a] Numbers in parentheses are the number of times the parameter was used in calibration. Definitions of variables are found in the SWAT user manual (<http://swatmodel.tamu.edu/documentation>).

Process	Input Parameters										
Surface runoff	CN2 (36)	AWC (28)	ESCO (23)	EPCO (10)	SURLAG (22)	OV_N (8)					
Baseflow	GW_ALPHA (28)	GW_REVAP (18)	GW_DELAP (21)	GW_QWN (12)	REVAPMN (13)	RCHARG_DP (14)					
Snow	SFTMP (11)	SMFMN (14)	SMFMX (18)	SMTMP (13)	TIMP (7)	SNO50COV (4)	SNOCOVMX (3)				
Sediment from channels	PRF (10)	APM (7)	SPEXP (10)	SPCON (11)	CH_EROD (6)	CH_COV (7)					
Sediment from landscape	USLE_P (7)	USLE_C (7)	USLE_K (7)	LAT_SED (1)	SLSOIL (2)	SLOPE (8)					
N from landscape	RCN (1)	UBN (3)	GWNO3 (2)	ERORGN (5)	NPERCO (11)	ANION_EXCL (2)					
P from landscape	PSP (5)	PHOSKD (6)	UBP (5)	PPERCO (8)	GWQMINP (1)	ERORGP (5)					
Pesticides	KOC (1)	HL_SOIL (1)	HL_FOL (1)	WSOL (1)	WOFFW (2)						
Subsurface tile	TDRAIN (1)	GDRAIN (2)	DEP_IMP (1)								
N and P from channels	BC1 (2)	BC2 (2)	BC3 (2)	BC4 (2)	RS4 (2)	RS5 (1)					
Plant growth	GSI (3)	HI (1)	BLAI (3)	PHU (1)	CN_YLD (1)						
Bacteria	BACTRDQ (1)	BACTMIX (1)	BCNST (1)	CFRT_KG (1)	WDRCH (1)	WDPO (1)					
Other	BIOMIX (4)	SOL_ROCK (1)	MSK_COL (1)	MSK_CO2 (2)	CBNINT (1)	SOL_BD (3)	ALPHA_BNR (1)	EVRCH (1)	SOL_ALB (2)	LAT_TTIME (1)	

^[a] Abbaspour et al. (2007), Ahl et al. (2008), Alibuyog et al. (2009), Behera and Panda (2006), Bekele and Nicklow (2007), Benaman and Shoemaker (2004), Benaman et al. (2005), Bekele and Knapp (2010), Cheng et al. (2007), Chin et al. (2009), Chu et al. (2004), Coffey et al. (2010), Debele et al. (2008), Di Luzio and Arnold (2004), Douglas-Mankin et al. (2010), Du et al. (2006), Easton et al. (2008), Eckhardt et al. (2002), Eckhardt et al. (2005), Engel et al. (2007), Ghaffari et al. (2010), Gikas et al. (2006), Gitau et al. (2008), Green et al. (2006, 2007), Green and van Griensven (2008), Heuvelmans et al. (2004, 2006), Hu et al. (2007), Inamdar and Naumov (2006), Jha et al. (2010), Lemonds and McCray (2007), Maski et al. (2008), Meng et al. (2010), Mukundan et al. (2010), Muleta and Nicklow (2005), Narasimhan et al. (2010), Santhi et al. (2008), Shoemaker et al. (2007), Starks and Moriasi (2009), Sui and Frankenberger (2008), Sudheer et al. (2007), Tuppad et al. (2011), van Griensven et al. (2008), Van Liew et al. (2007), White and Chubey (2005), Zhang et al. (2008a), Zhang et al. (2008b).

Nota. En la figura se muestra el reporte de calibración de 64 cuencas estudiadas. Tomado de Arnold et al. (2017). SWAT: Model use, calibration, and validation. (P. 1498)

El valor al cual es permitido para aceptar los datos de calibración muchas veces depende del usuario, ya que si es un proyecto de alto riesgo o normado por la ley, se utiliza el valor requerido por esta. Sin embargo, cerca de 20 estudios realizados con SWAT determinan que un valor satisfactorio de aceptación estadística para calibración de acuerdo con los datos reales es de 0,5 para el cálculo de NSE. (Douglas et al., 2010).

Tabla 10

Parámetros que regulan la respuesta del agua.

Parámetro	Unidad	Definición	Rango
Parámetros que regulan la respuesta del agua superficial			
CN2	-	Número de curva SCS	± 10% (1)
ESCO	-	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0-1
SOL_AWC	mm/mm	Contenido de humedad en el suelo	± 20% (1)
Parámetros que regulan la respuesta del agua subsuperficial			
GW_DELAY	días	Retardo de las aguas subterráneas	31-480
GW_REVAP	-	Coefficiente de aumento de aguas subterráneas	0.02-0.2
REVAPMN	mm	Profundidad mínima de agua en el acuífero superficial para que el aumento de agua se reproduzca	0-750
GWQMN	mm	Límite mínimo para que el agua del acuífero superficial retorne a la superficie	0-5000
ALPHA_BF	días	Constante de recesión	
RCHRG_DP	fracción	Fracción de percolación al acuífero profundo	0-1

SOL_K	mm/h	Conductividad hidráulica saturada	± 10% (1)
Parámetros que regulan la respuesta del agua en la cuenca			
SURLAG	días	Tiempo de retraso de la escorrentía superficial	0.5-24
CH_K2	mm/h	Conductividad hidráulica del canal	0.01-150

Nota. En la tabla se muestra los parámetros con sus unidades, definición y rango admisible para una buena modelación, estos parámetros regulan la respuesta del agua en la cuenca. Obtenido de (Neitsch et al., 2002) Manual de herramienta de evaluación de suelos y aguas.

(1) La fracción mostrada no indica el rango ya estos parámetros varían según el tipo de suelo; indica la variabilidad admisible en este tipo de parámetros.

Propuesta de calibración manual de caudales sólidos. Neitsch et al. (2002) mencionan en su manual de herramienta de evaluación de suelos y aguas menciona lo siguiente:

Sedimentación en canales

PRF. Factor de ajuste de tasa máxima para el enrutamiento de sedimentos en el canal principal. El enrutamiento de sedimentos es una función del caudal máximo y el caudal medio diario. Debido a que SWAT no puede calcular directamente el hidrograma subdiario, esta variable se incorporó para permitir el ajuste del efecto de la tasa de flujo máxima en el enrutamiento de sedimentos. Esta variable impacta la degradación del canal. Si no se ingresa ningún valor para PRF, el modelo establecerá PRF = 1.0. (P. 79)

SPEXP. Parámetro de exponente para calcular el sedimento re-arrasado en el enrutamiento de sedimentos del canal. La cantidad máxima de sedimento que se puede transportar desde un segmento de tramo. Si no se ingresa ningún valor para SPEXP, el modelo establecerá SPEXP = 1.0. (P. 79)

CH_EROD. Factor de erosionabilidad del canal. El factor de erosionabilidad del canal es conceptualmente similar al factor de erosionabilidad del suelo utilizado en la ecuación USLE. La erosionabilidad del canal es una función de las propiedades de los materiales del lecho o del banco. En general, los valores de erosionabilidad del canal son un

orden de magnitud más pequeños que los valores de erosionabilidad del suelo. CH_EROD se establece en un valor entre 0,0 y 1,0. Un valor de 0,0 indica un canal no erosivo, mientras que un valor de 1,0 indica que no hay resistencia a la erosión. (P. 256)

Sistema de Información Geográfica (SIG).

Sendra (1994) define que “Los SIG son una tecnología aplicada a la resolución de problemas territoriales, una herramienta que añade valor a la información y que puede comportarse simultáneamente como Sistema de Información y Sistema de Apoyo a las Decisiones” (p.208)

Tipos de Capas en el Sistema de Información Geográfica (SIG).

Modelo raster. Pérez (2011) señala que en formato ráster se pueden representar objetos espaciales cubriendo todo el espacio con una matriz de celdas y asignando valores concretos a las celdas que cubren el objeto. Este tipo de formato tiene menos precisión que el formato vectorial, ya que se ve limitado por el tamaño de las celdas. (p.189)

Modelo vector: Mancebo et al. (2008) indican que se “Utilizan un conjunto de puntos, líneas o polígonos que modelizan un aspecto del medio. Estos puntos, líneas o polígonos se conocen, de manera genérica como objetos, características o entidades (features). (p.9).

Herramientas Geoestadísticas. Giraldo (2002) conceptualiza que “La geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales y es importante resaltar que el propósito esencial es la interpolación”. (p.17)

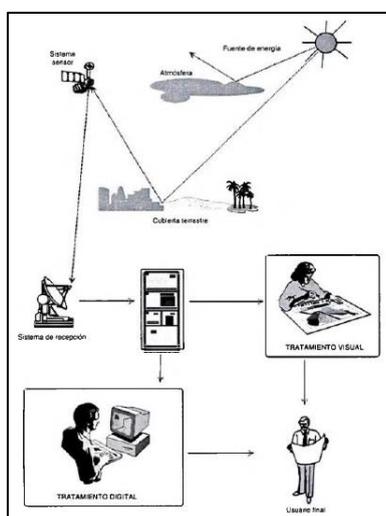
Álgebra de Mapas. Tomlin (1990) nos dice que se entiende por álgebra de mapas al conjunto de técnicas y procedimientos que, operando sobre una o varias capas en formato ráster, nos permite obtener información derivada, generalmente en forma de nuevas capas de datos. Aunque nada impide que este proceso se lleve a cabo sobre capas vectoriales, se entiende que el álgebra de mapas hace referencia al análisis desarrollado sobre capas ráster.

Teledetección. Évora y Arbelo (2012) definen que la teledetección es el vocablo usado por los hispanos parlantes para referirse al término inglés “remote sensing”, que se traduce literalmente como percepción remota. Se refiere a la ciencia, técnica o, incluso “arte” para algunos, de obtener información (imágenes) de la superficie de nuestro planeta a distancia, sin entrar en contacto directo con él. Pero la teledetección también incluye todo el

trabajo realizado a posteriori con esas imágenes, es decir, su procesamiento e interpretación.
(p.9)

Figura 7

Componentes de un Sistema de Teledetección.



Nota. En la figura se muestra el procedimiento que se realiza para procesar imágenes satelitales. Tomado de (Chuvienco, 2010). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio, (3era ed.). Barcelona, España. (P. 19)

Automatización.

Marengo y Pereyra (2019) mencionan que “la automatización reduce ampliamente la necesidad sensorial y mental del humano”, teniendo los siguientes objetivos.

Objetivos de la Automatización:

Simplificar el trabajo

Mayor eficiencia

Disminución de piezas defectuosas

Mayor Calidad

Incremento de la productividad y competitividad

Control de calidad más estrecho

Integración con sistemas empresariales

Automatización de procesos de SIG con ArcGIS, modelador (Model Builder) y

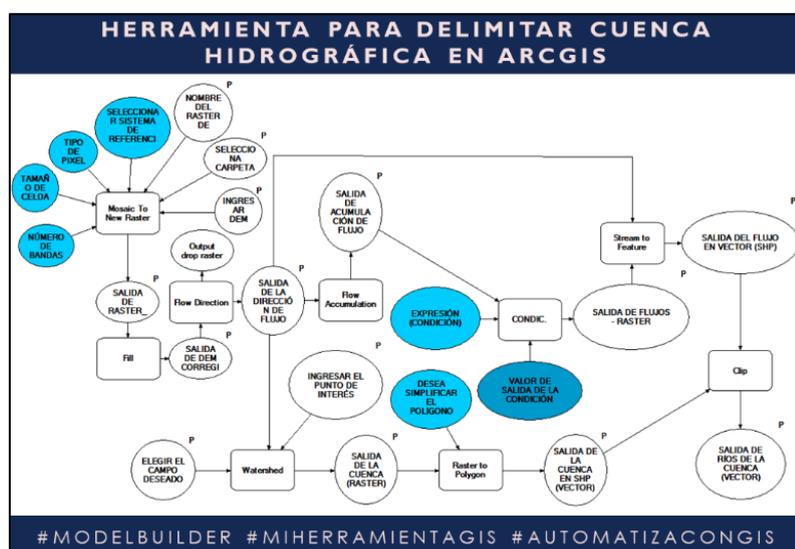
RStudio.

ArcGIS. Olya (2011) menciona que es el principal componente de la suite de aplicaciones ArcGIS de Environmental Systems Research Institute (ESRI) y el software que contiene las funcionalidades clásicas del SIG. ArcGIS es un conjunto de herramientas que permiten la visualización y manejo de información geográfica, y que cuenta con una arquitectura extensible mediante la que pueden añadirse nuevas funcionalidades.

ModelBuilder. Environmental Systems Research Institute (ESRI, 2018) conceptualiza que es una aplicación que se utiliza para crear, editar y administrar modelos. Los modelos son flujos de trabajo que encadenan secuencias de herramientas de geo procesamiento y suministran la salida de una herramienta a otra herramienta como entrada. ModelBuilder también se puede considerar un lenguaje de programación visual para crear flujos de trabajo. El programa se crea mediante la necesidad del que lo emplea, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 8

Generación de un modelo en Model Builder.



Nota. En la figura se muestra un modelo de programación visual para cualquier cuenca.

Rstudio. Es un entorno de desarrollo integrado que se utiliza para una mejor manipulación del lenguaje de programación con R diseñado principalmente para el análisis estadístico, además es gratuito y de código abierto.

2.3. Definición de términos básicos.

Precipitación, se define como “precipitación a toda forma de agua, que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo a esta definición, las lluvias, las granizadas, las garúas y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación”

Escorrentía, se define como el agua de lluvia que fluye por la superficie de un terreno.

Topografía, se define como un conjunto de particularidades que presenta un terreno en su proporción superficial.

Geología, se define como la ciencia que estudia la historia del globo terrestre, así como la naturaleza, formación, evolución y disposición actual de las materias que lo componen.

Sedimentos, se define como la materia que, habiendo estado suspendida en un líquido, se posa en el fondo por su mayor peso.

Energía Cinética, se define como la energía que posee un cuerpo cuando está en movimiento.

Intensidad, se define como el nivel de fuerza con que se manifiesta un fenómeno natural, una magnitud física, una cualidad, una expresión, entre otros.

2.4. Hipótesis.

Existe una razón de proporcionalidad de 4 a 3 entre la erosión hídrica del suelo y la producción de sedimentos respectivamente dentro de la cuenca del río Santa.

2.5. Variables:

Variable Independiente.

Erosión Hídrica del Suelo.

Variable Dependiente.

Producción de Sedimentos.

III. METODOLOGÍA.

3.1. Tipo de Investigación:

La investigación es aplicada ya que se basa en los resultados que arroja la investigación básica; como también es de nivel descriptivo, pues se orientó a describir las variables como son la Erosión Hídrica del Suelo y la Producción de Sedimentos (Lozano y Cerrón, 2015).

3.2. Diseño de la Investigación:

El diseño de la investigación es no experimental, es decir, “es investigación donde no hacemos variar intencionalmente la variable independiente. Lo que hacemos en la investigación no experimental es observar fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlos” (Kerlinger, 1979, p. 116).

3.3. Población y Muestra.

La población y muestra de la investigación comprendió a las precipitaciones del producto grillado de precipitaciones RAIN4PE.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

La técnica de recolección de datos fue la observación porque estudia cuidadosamente el evento para confirmar su hipótesis (Ñaupas et al., 2018). La técnica de observación fue utilizada para los cinco objetivos específicos.

Los instrumentos de recolección de datos fueron analizados en la presente tesis para cada objetivo específico como se detalla a continuación:

Para el objetivo específico 1, “Determinar los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Santa”:

Figura 9

Recolección de datos para el Objetivo Específico 1.



Para el objetivo específico 2, “Estimar la erosión hídrica utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)”:

Figura 10

Recolección de datos para el Objetivo Específico 2.





Modelos digitales de elevación (DEM) de 30.0 m, STRM (Stands for Shuttle Radar Topography Mission).

Información en formato Vectorial actualizada.

Imágenes de Sensores Remotos Satelitales .

Producto Grillado RAIN4PE (Lluvia para Perú y Ecuador), datos diarios desde enero de 1981 hasta diciembre de 2014.

Producto Grillado Pisco (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations)), datos diarios desde enero de 1981 hasta diciembre de 2014.

Mapa de suelos digitalizada del mundo FAO/UNESCO O también conocida como la base de datos armonizada de los suelos del mundo (Harmonized World Soil Database - HWSD). Mapas sobre propiedades y clase de suelos, con una resolución de 1km y 250 m, SoilGrids.

Imágenes satelitales MOD13Q1.



Ecuación RUSLE – (Renard et al., 1991).

Ecuación de Renard & Freimund (1994).

Índice Modificado de Fourier (1960).

Fórmula de Williams (1975).

Factor de Longitud de pendiente Desmet & Gober (1996).

Coefficiente m por Desmet & Gober (1996).

Grado de Pendiente (S) (McCools et al., 1987).

Factor topográfico (LS) Desmet y Gober (1996) y McCools (1987).

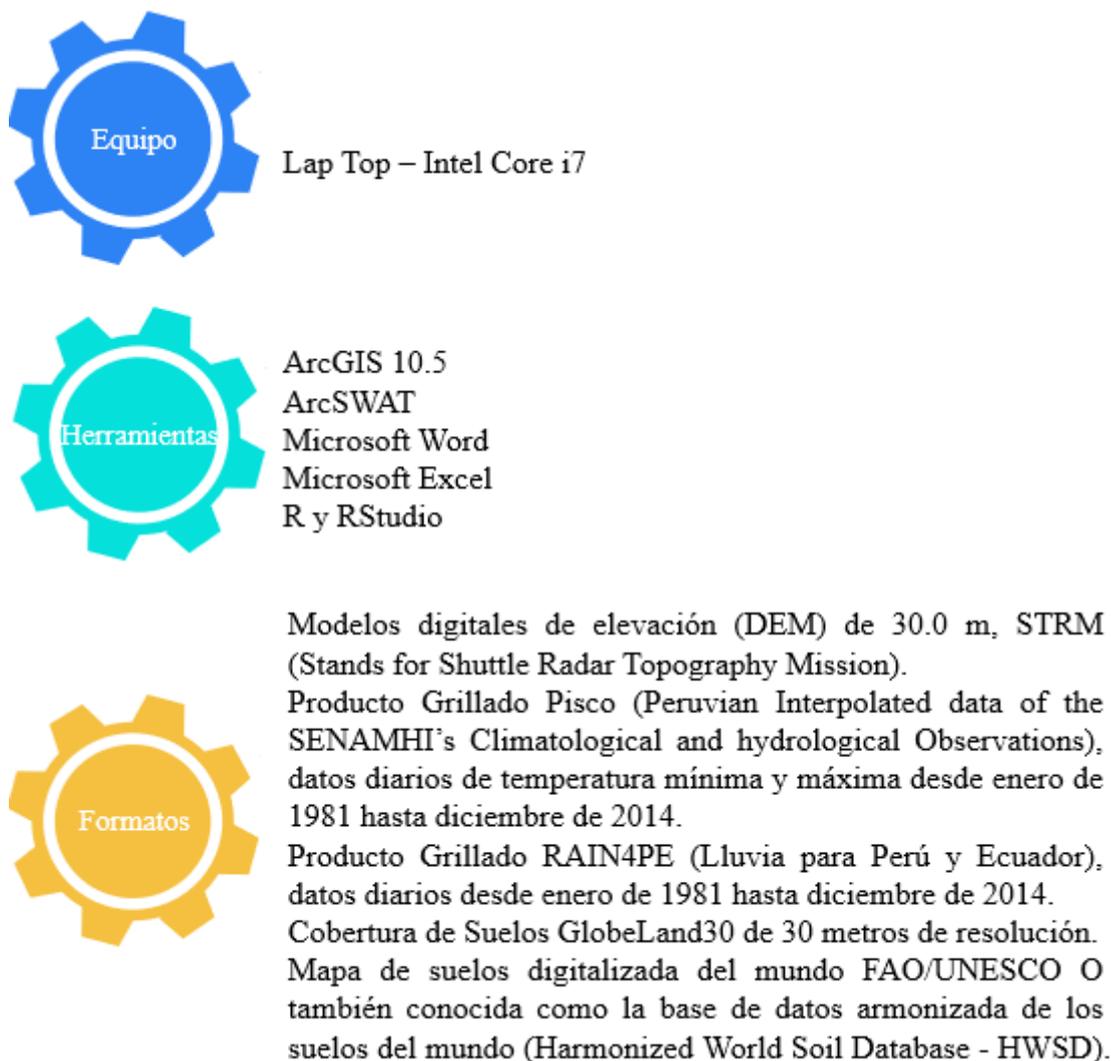
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado - Rouse (1974).

Factor de la cobertura vegetal - Lin (2002).

Para el objetivo específico 3, “Estimar la producción de sedimentos mediante la utilización del modelo Hidrológico semi-distribuido, herramienta de evaluación de suelos y aguas SWAT (Soil and Water Assessment Tool)”:

Figura 11

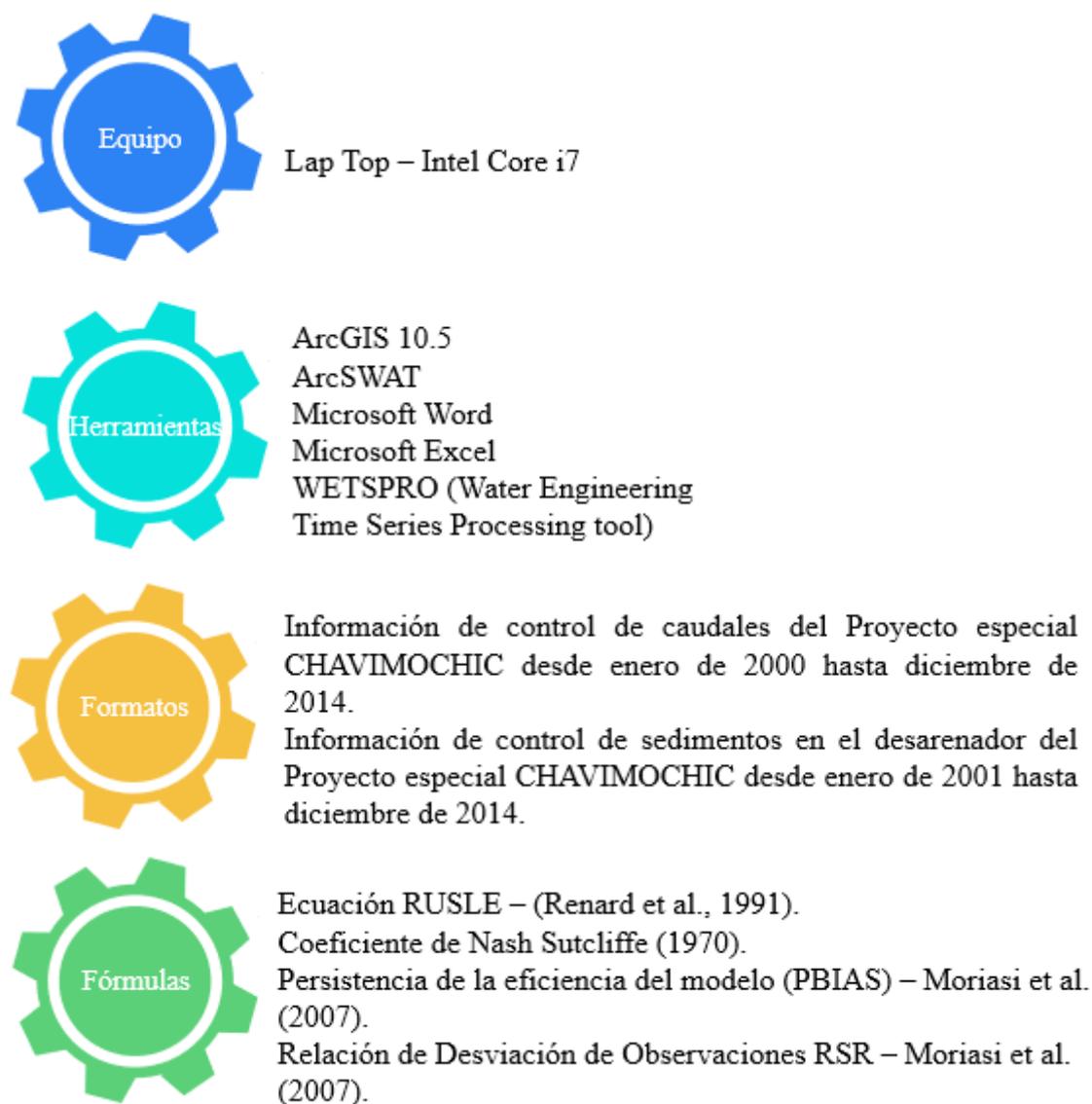
Recolección de datos para el Objetivo Específico 3.



Para el objetivo específico 4, “Calibrar y validar la estimación de la Producción de Sedimentos”:

Figura 12

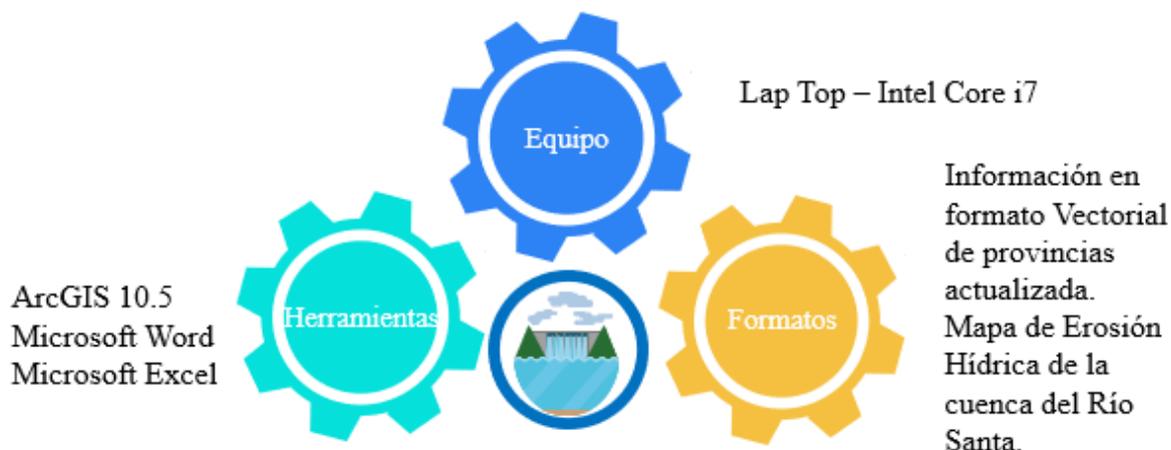
Recolección de datos para el Objetivo Específico 4.



Para el objetivo específico 5, “Determinar las zonas potencialmente críticas de la Erosión Hídrica del Suelo y Producción de Sedimentos”:

Figura 13

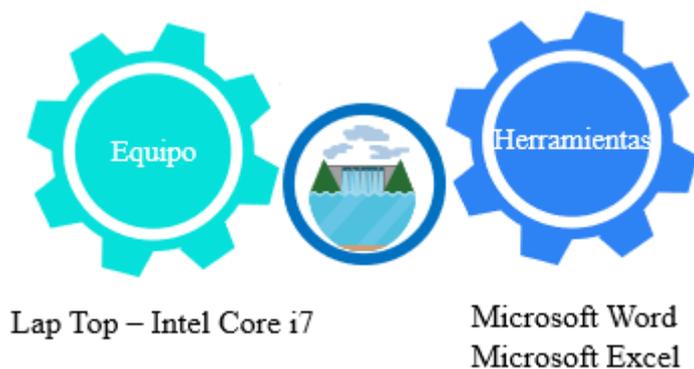
Recolección de datos para el Objetivo Específico 5.



Para el objetivo general, “Determinar cómo influye la Erosión Hídrica del Suelo para la producción de Sedimentos en la Cuenca del Río Santa en el Periodo: 1981 – 2014”:

Figura 14

Recolección de datos para el Objetivo General.

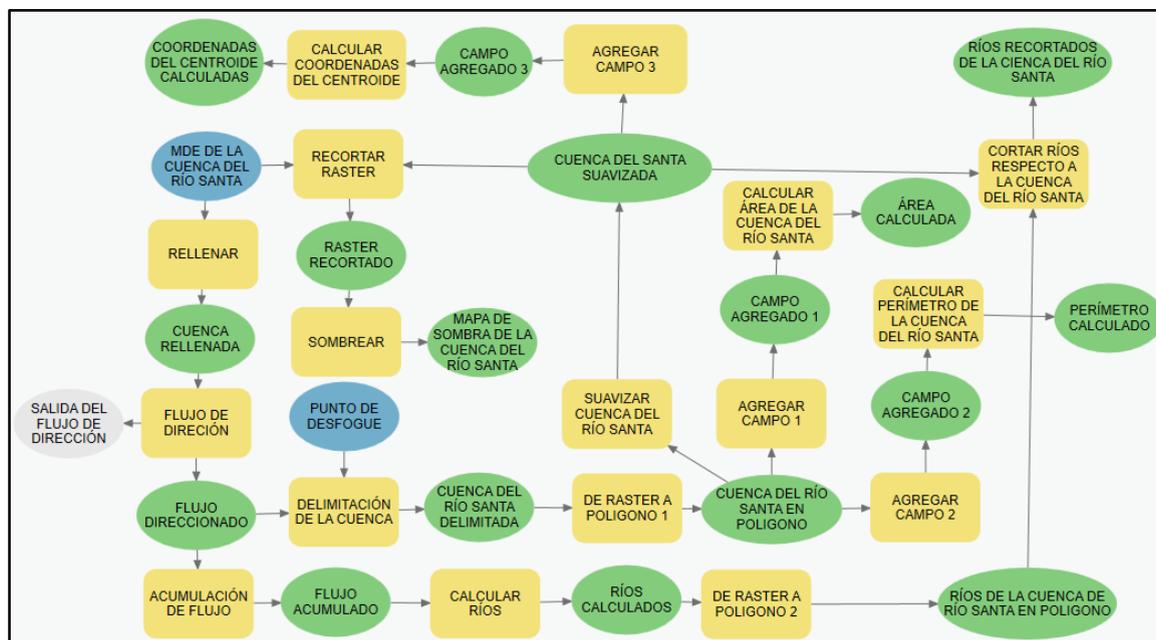


3.5. Plan de procesamiento y análisis estadístico de datos.

Respecto al objetivo específico 1, “Determinar los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Santa”:

Figura 15

Modelo automatizado, delimitación de una cuenca y sus parámetros geomorfológicos – Model Builder.

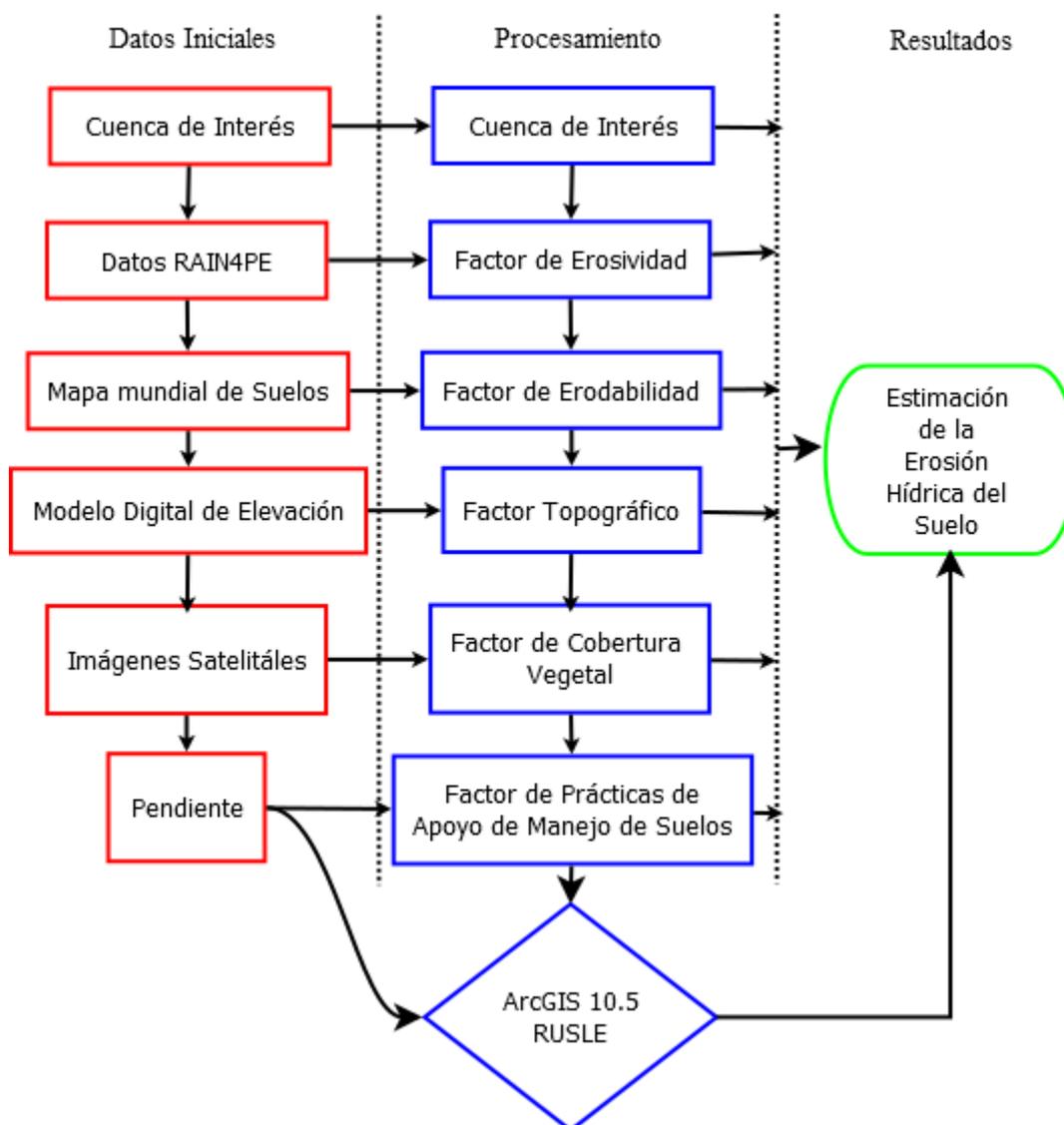


Nota. En la figura se muestra el proceso de programación visual con model builder en ArcGIS para delimitar una cuenca y determinar sus parámetros geomorfológicos.

Respecto al objetivo específico 2, “Estimar la erosión hídrica utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)”:

Figura 16

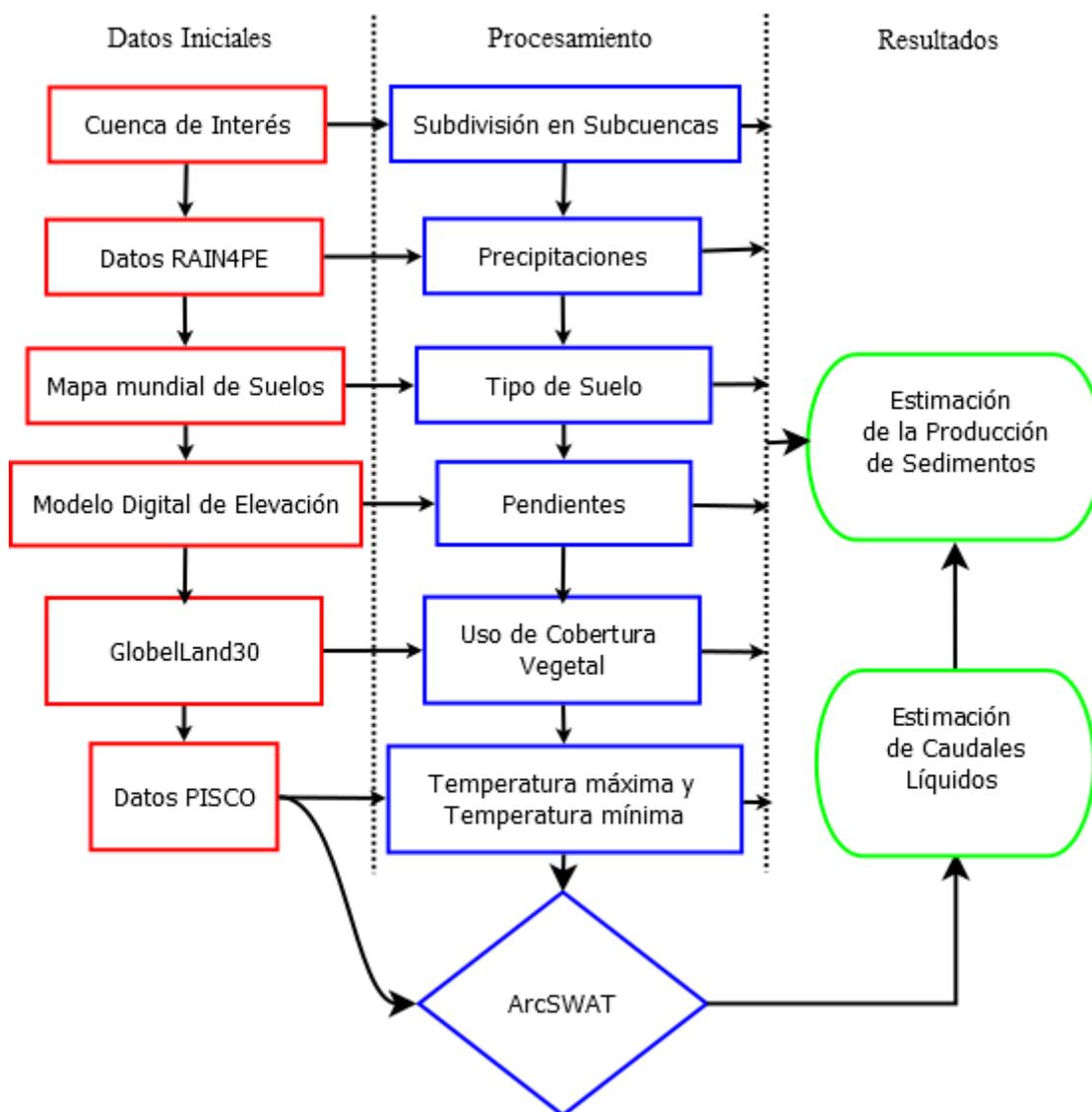
Flujograma para estimar la Erosión Hídrica del Suelo con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo RUSLE.



Respecto al objetivo específico 3, “Estimar la producción de sedimentos mediante la utilización del modelo Hidrológico semi-distribuido, herramienta de evaluación de suelos y aguas SWAT (Soil and Water Assessment Tool)”:

Figura 17

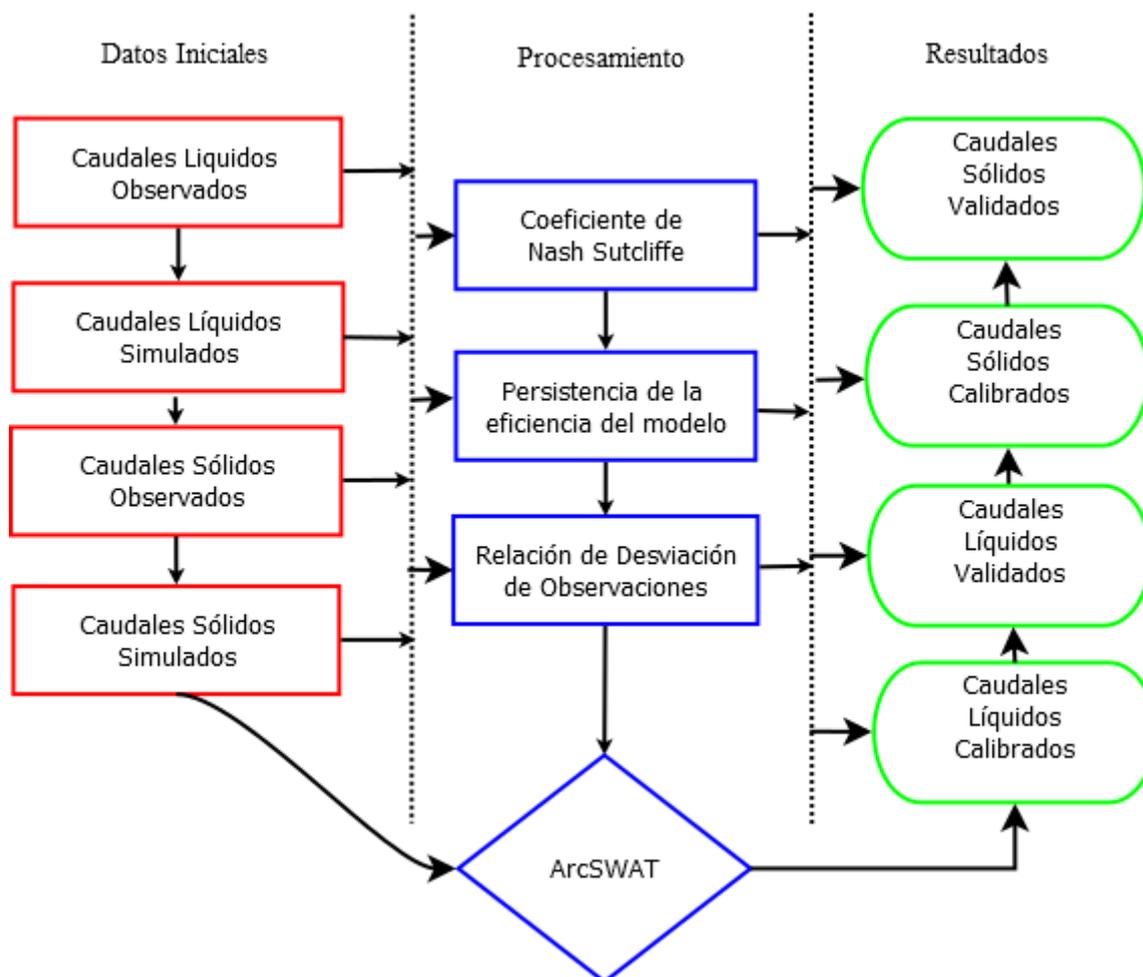
Flujograma para estimar la Producción de Sedimentos con la herramienta SWAT (Soil and Water Assessment Tool).



Respecto al objetivo específico 4, “Calibrar y validar la estimación de la Producción de Sedimentos”:

Figura 18

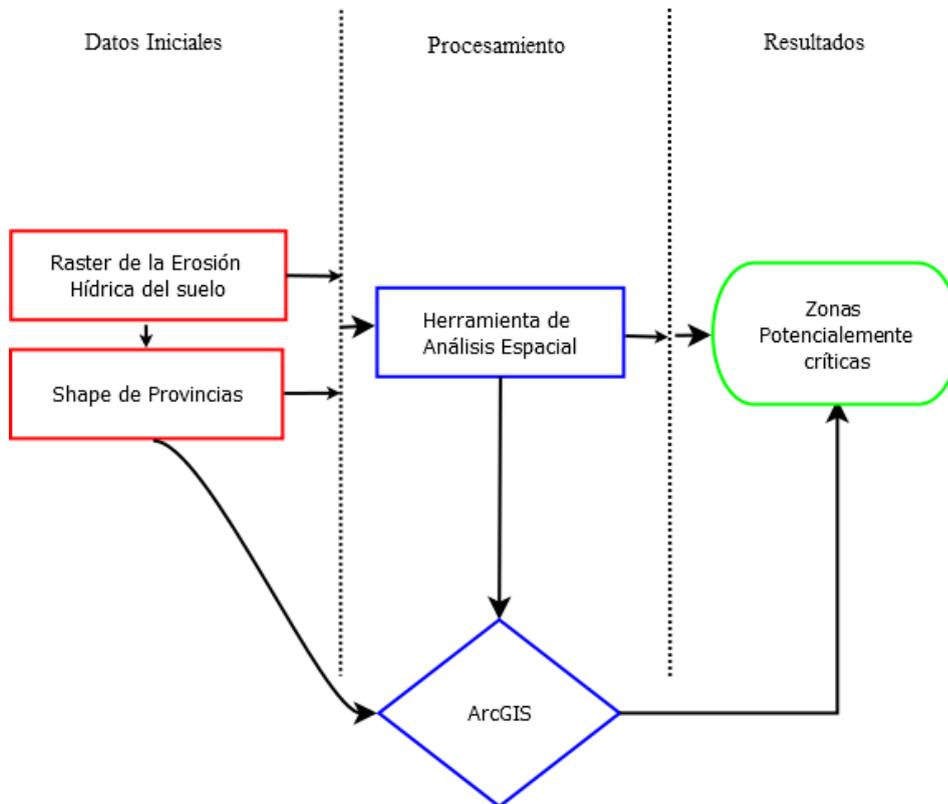
Flujograma para Calibrar y Validar la estimación de la Producción de Sedimentos.



Respecto al objetivo específico 5, “Determinar las zonas potencialmente críticas de la Erosión Hídrica del Suelo y Producción de Sedimentos”:

Figura 19

Flujograma para Determinar las zonas potencialmente críticas de la Erosión Hídrica del Suelo y Producción de Sedimentos.

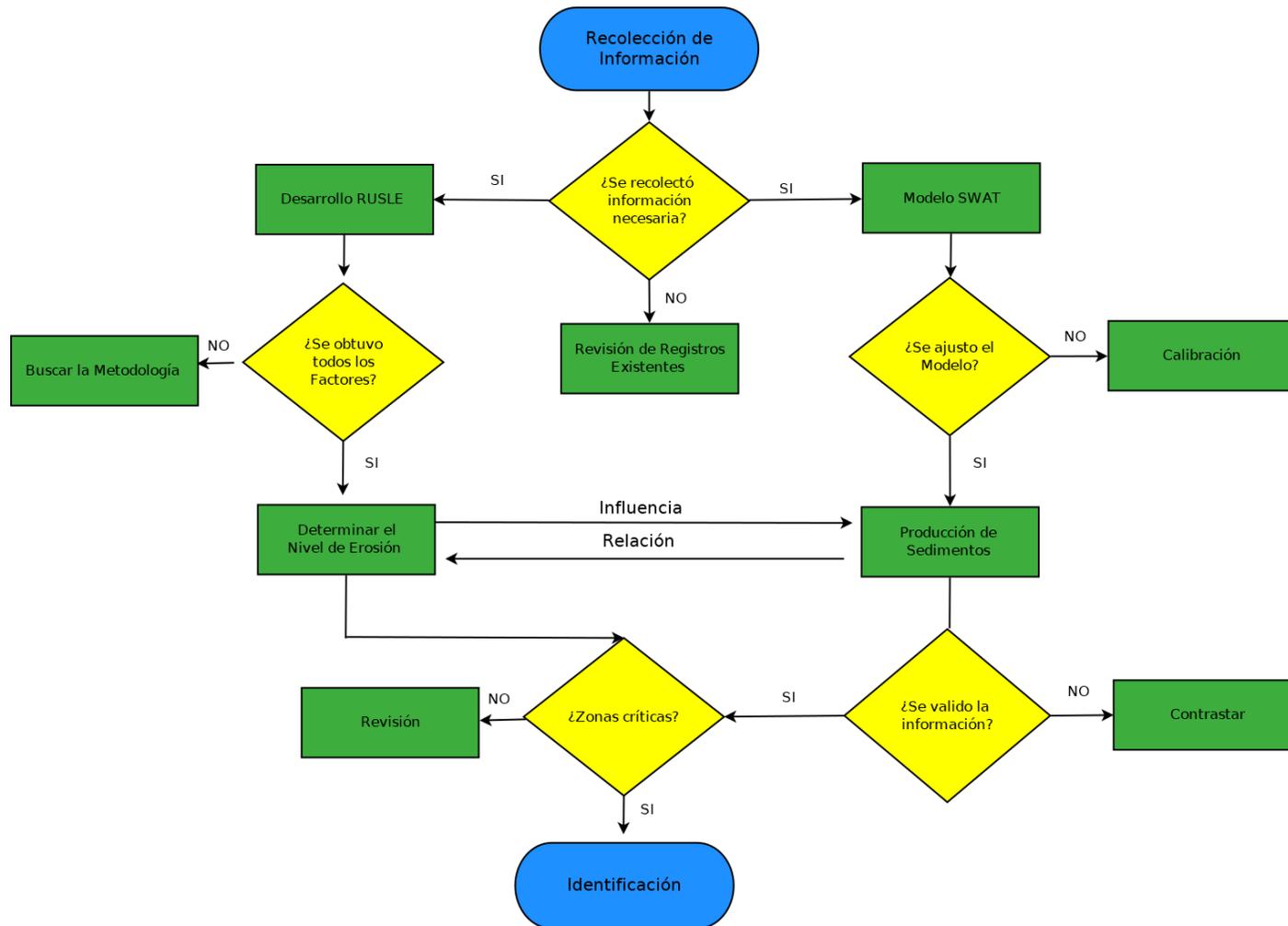


Respecto al objetivo general, “Determinar cómo influye la Erosión Hídrica del Suelo para la producción de Sedimentos en la Cuenca del Río Santa en el Periodo: 1981 – 2014”:

A través de un flujograma se presentará el procedimiento para cumplir con el objetivo general.

Figura 20

Flujograma para determinar la influencia de la Erosión Hídrica del Suelo con la Producción de Sedimentos.



Nota. En la figura se muestra un flujograma que resume el proceso de la investigación para cumplir con el objetivo general.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

El resultado de la investigación se realizó en 4 etapas:

4.1. Presentación de Resultados.

Primera Etapa.

Respecto del objetivo específico 1 “Determinar los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Santa”. Se calculó los parámetros geomorfológicos de la Cuenca del Río Santa. En las siguientes tablas 11, 12 y 13, podemos apreciar los parámetros de la Cuenca del Río Santa.

Tabla 11

Parámetros Fisiográficos de la Cuenca del Río Santa.

	Parámetros	Unidad de Medida	Cuenca Hidrográfica	
Parámetros de forma de la cuenca	Área total de la cuenca	km ²	10409.15	
	Perímetro de la cuenca	Km	1074.52	
	Longitud del río principal	Km	274.90	
	Orden 1	Km	4645.45	
	Orden 2	Km	2380.27	
	Orden 3	Km	1079.28	
	Orden 4	Km	591.74	
	Orden 5	Km	285.19	
	Orden 6	Km	80.08	
	Orden 7	Km	129.32	
	Longitud total de los ríos de diferente grado	Long. Total	Km	9191.33
	Este X	m	195187.11	
	Centroides Norte Y	m	9013345.53	
	Altitud Z	m	4077.18	
	Ancho promedio de la cuenca	Km	37.87	
Coefficiente de compacidad	-	2.97		
Factor de forma	-	0.1377		

Rectángulo	Lado mayor	Km	521.12
equivalente	Lado menor	Km	19.97
Radio de Circularidad		Km	0.1133

Nota. En la tabla se muestra los parámetros fisiográficos de la cuenca.

Tabla 12

Parámetros de Relieve de la Cuenca del Río Santa.

	Parámetros	Unidad de Medida	Cuenca hidrográfica
Parámetros de relieve de la cuenca	Curva hipsométrica	-	DETERMINADO
	Polígonos de frecuencia de altitudes	-	DETERMINADO
	Altitud media de la cuenca	m.s.n.m	3805.37
	Altitud de frecuencia media	m.s.n.m	4199.07
	Altitud máxima	msnm	6768
	Altitud mínima	msnm	468
	Pendiente media	m/m	0.0121
	Coefficiente masividad (Cm)	-	0.00011
	Coefficiente orográfico	-	0.00012
	Coefficiente de torrencialidad	.	0.38437

Nota. En la tabla se muestra los parámetros de relieve de la cuenca.

Tabla 13*Parámetros de la Red Hidrográfica de la Cuenca del Río Santa.*

	Parámetros	Unidad de Medida	Cuencas Hidrográficas
Parámetros de la Red Hidrográfica de la Cuenca	Tipo de corriente	-	Intermitente
	Orden 1	-	4001
	Orden 2	-	1849
	Orden 3	-	943
	Orden 4	-	568
	Número de Orden 5	-	373
	orden de Orden 6	-	111
	los ríos Orden 7	-	144
	N° Total de ríos	-	7989
	Grado de ramificación	-	7
	Frecuencia de densidad de los ríos	ríos/km ²	0.7675
	Densidad de drenaje	ríos/km ²	0.8830
	Extensión media del escurrimiento superficial	km ² /km	1.1325
	Cotas del cauce principal	msnm	4499
	Altitud máxima	msnm	468
	Altitud mínima	msnm	468
Pendiente media del rio principal	m/m	0.0147	
Altura media del rio principal	msnm	2015.5	
Tiempo de concentración	Horas	25.47	

Nota. En la tabla se muestra los parámetros de la Red Hidrográfica.

Respecto del objetivo específico 2 “Estimar la erosión hídrica utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)”. Para esta tesis se tomó la delimitación de la cuenca del Río Santa hasta la estación Hidrosedimentologica Condorcerro ubicada en las coordenadas WGS84 17 L, 801375.00 m E - 9041858.00 m S. Los factores que afectan la erosión hídrica son los que se mencionó en la tabla 1, detallándose a continuación:

Factor de Erosividad (R). En gabinete se obtuvo el factor de erosividad (R) del suelo para la cuenca del río Santa; primeramente, se realizó una comparación de datos de precipitaciones grilladas Pisco y RAIN4PE con los datos de precipitaciones Observados en campo que detalla en el anexo D, demostrándose estadísticamente con el Coeficiente de correlación r de Pearson, Coeficientes de determinación r^2 y Medidas de Bondad de Ajuste como son: NSE (Nash Sutcliffe), PBIAS (Persistencia de la eficiencia del modelo) y RSR (Relación de Desviación de Observaciones) utilizando las ecuaciones 12, 13 y 14 respectivamente, que los datos de precipitaciones RAIN4PE son datos permitidos y muy confiables para el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) y del modelo Hidrológico semi-distribuido, herramienta de evaluación de suelos y aguas SWAT (Soil and Water Assessment Tool) como lo detalla en el anexo E.

Estos datos de precipitaciones observadas fueron de las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro de la cuenca del Río Santa y son las siguientes: Yungay, Santiago Antúnez de Mayolo, Cachicadan y Cabana, como muestra la siguiente tabla.

Tabla 14

Estaciones meteorológicas medidas en campo.

Estación	Latitud	Longitud
Yungay	-9.1499	-77.751
Santiago antune de mayolo	-9.5165	-77.5249
Cachicadan	-8.0917	-78.1494
Cabana	-8.3836	-78.0123

En la siguiente tabla se puede apreciar las precipitaciones anuales según cada estación y tipo de datos de precipitación.

Tabla 15

Precipitaciones estimadas en mm/año con datos grillados RAIN4PE, PISCO y observados en campo.

AÑO	Estación Santiago						Estación					
	Estación Yungay			A. de M.			Cachicadan			Estación Cabana		
	RAI.	PIS.	Obs.	RAI.	PIS.	Obs.	RAI.	PIS.	Obs.	RAI.	PIS.	Obs.
2005	604	309	528	643	624	675	826	1200	708	581	510	514
2006	853	359	1021	962	843	840	1181	1764	1178	930	884	901
2007	792	334	1010	866	738	811	1163	1813	1202	869	778	862
2008	769	317	809	899	711	821	976	1403	783	837	750	839
2009	1084	492	1028	1238	1053	1179	1369	2024	1253	1150	1078	1203
2010	709	363	805	744	714	761	867	1298	744	767	718	871
2011	747	318	937	804	682	579	966	1394	937	778	667	720
2012	935	360	793	1012	843	823	1202	1956	1164	1005	975	1073
2013	836	479	652	873	699	781	1053	1728	1110	885	806	944
2014	810	377	848	991	854	989	992	1788	1106	819	804	926

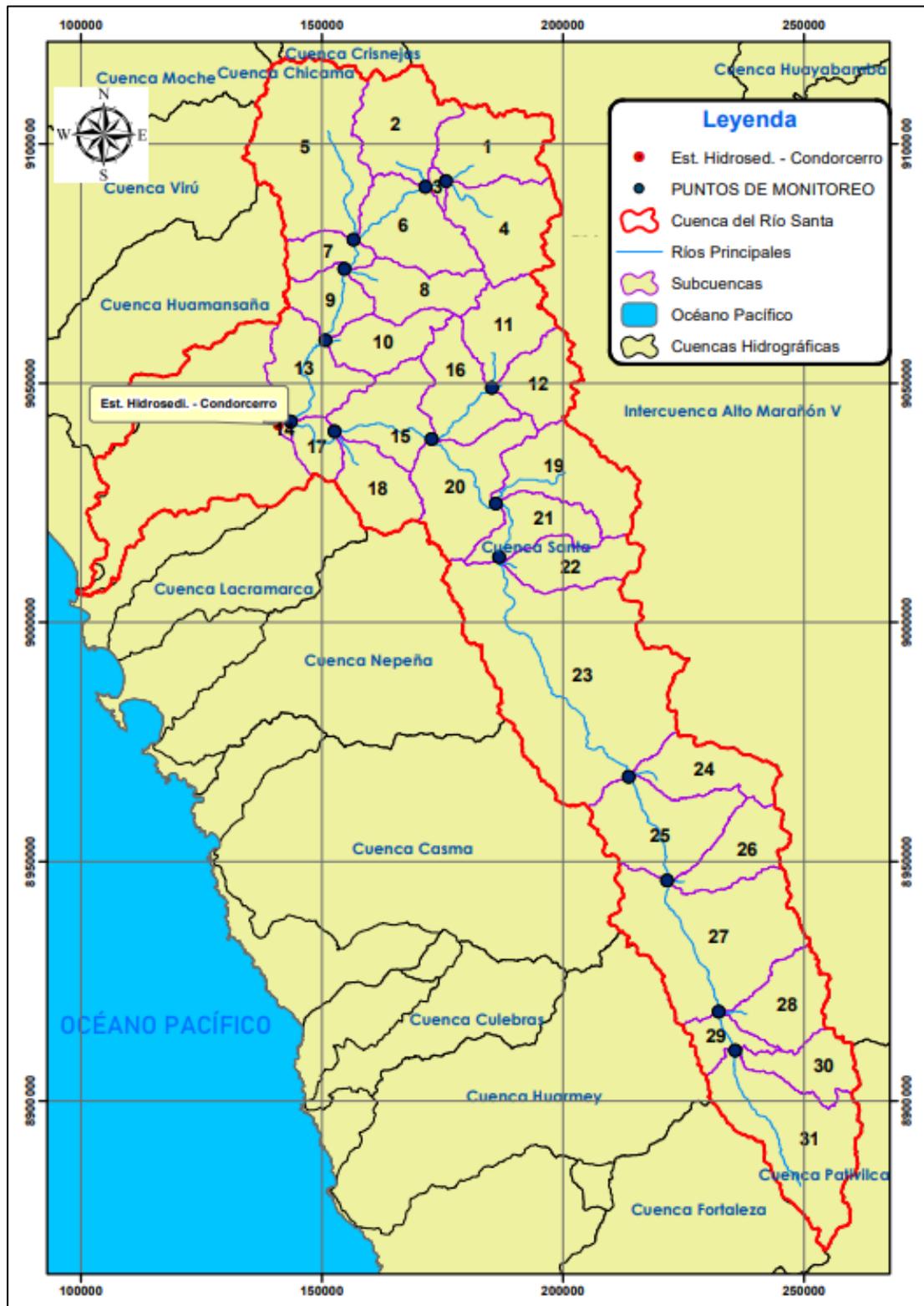
Nota. En la tabla se muestra cuatro estaciones de campo siendo comparadas con las estaciones de los datos grillados RAIN4PE y PISCO.

Tomando como punto de desfogue la ubicación de la estación Hidrosedimentológica Condorcerro, se delimitó la cuenca del río Santa con la extensión ArcSWAT del Software ArcGIS.

Esta cuenca del río Santa se subdividió en 31 subcuencas, quedando:

Figura 21

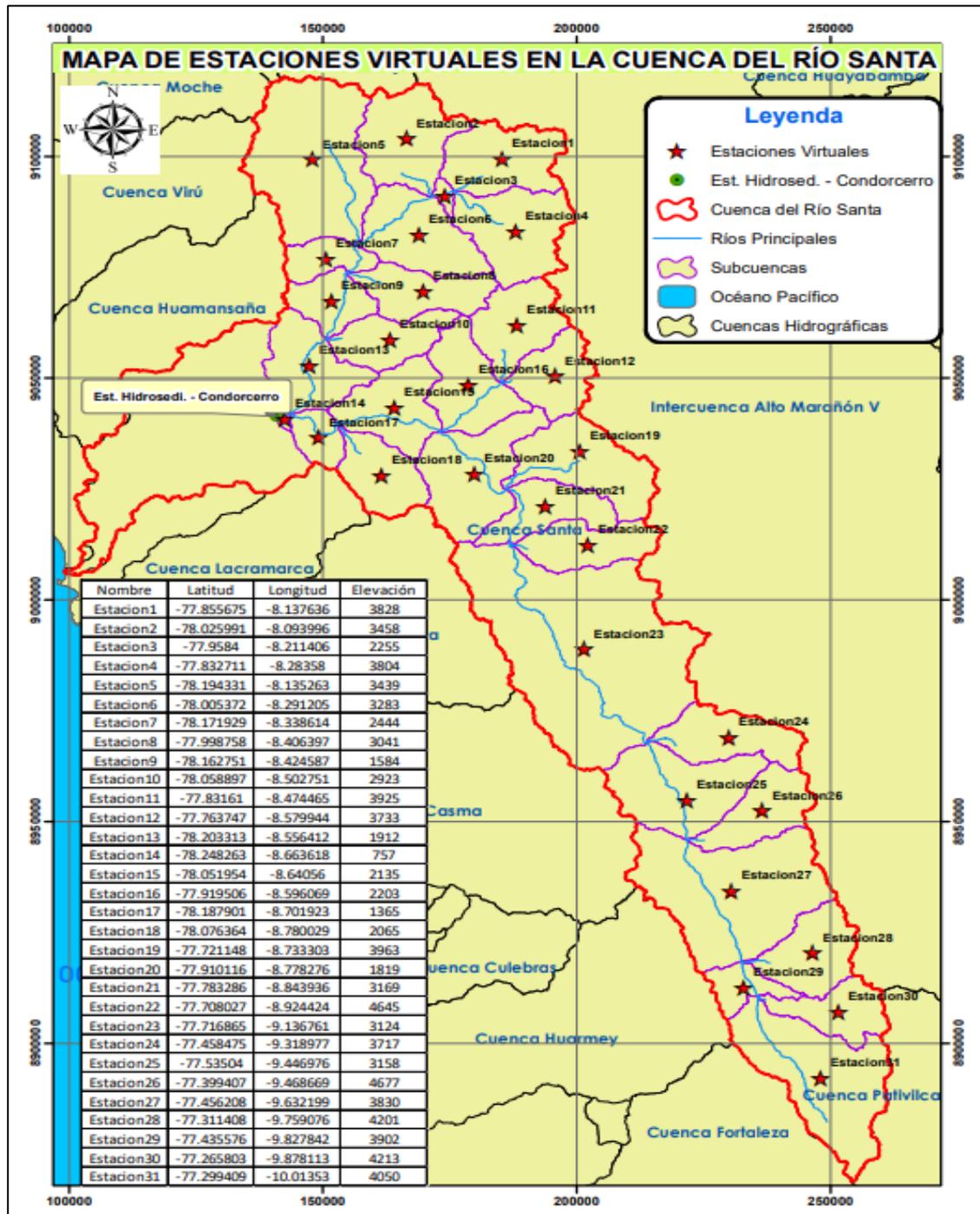
Mapa de subdivisión en 31 subcuencas a la cuenca del río Santa.



Se determinó el centroide de las 31 subcuencas, éstas fueron muy necesarias para considerarlas como estaciones virtuales y representen de mejor manera a la precipitación dentro de cada subcuenca y pueda realizarse una buena estimación de la erosión hídrica del suelo.

Figura 22

Mapa de 31 estaciones virtuales dentro de la cuenca del río Santa.

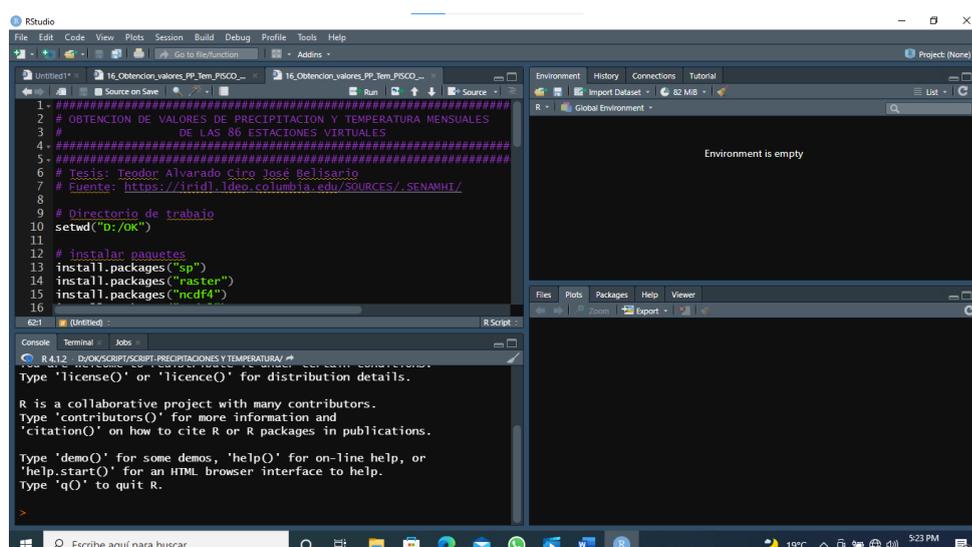


Para poder extraer estos datos de precipitación diaria del formato .nc en la que se encuentra la información de RAIN4PE, se tuvo que crear un script de lenguaje de programación con el entorno integrado de desarrollo (IDE) RStudio.

Con el script desarrollado se obtuvo datos de precipitación diaria de cada estación virtual desde el año de 1981 hasta el año 2014.

Figura 23

Script en RStudio para automatizar procesos y obtener datos.



Nota. En la figura se muestra el interfaz del entorno integrado de desarrollo (IDE).

Tabla 16

Precipitaciones en mm/año para las 31 estaciones virtuales de los datos RAIN4PE.

Nombre	Latitud	Longitud	Elevación	Prec.(mm/año) - RAIN4PE
Estación 01	-77.85568	-8.137636	3828	1025.043
Estación 02	-78.02599	-8.093996	3458	919.827
Estación 03	-77.9584	-8.211406	2255	978.177
Estación 04	-77.83271	-8.28358	3804	792.179
Estación 05	-78.19433	-8.135263	3439	883.442
Estación 06	-78.00537	-8.291205	3283	858.845
Estación 07	-78.17193	-8.338614	2444	827.461
Estación 08	-77.99876	-8.406397	3041	871.874
Estación 09	-78.16275	-8.424587	1584	761.464

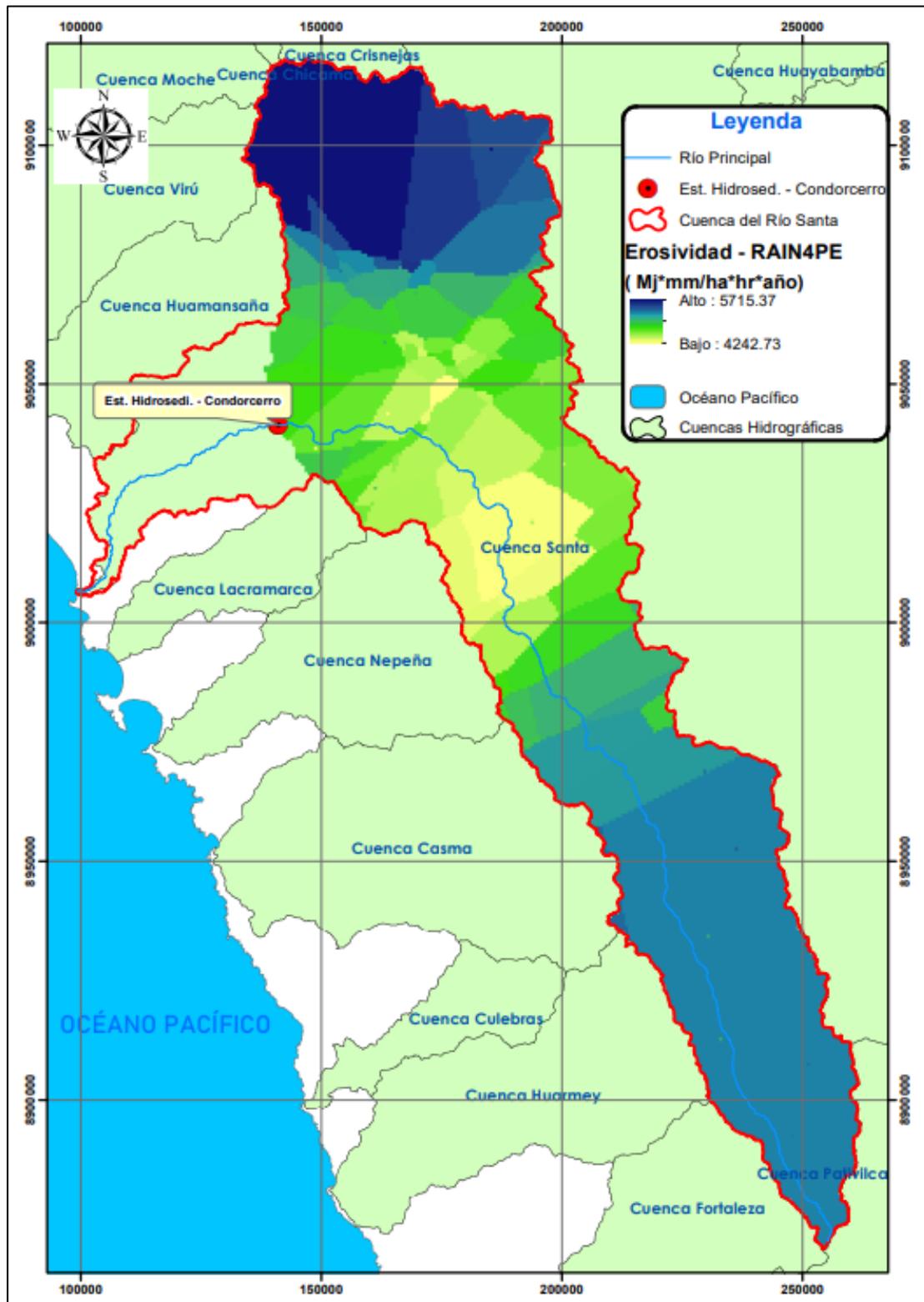
Estación 10	-78.0589	-8.502751	2923	881.922
Estación 11	-77.83161	-8.474465	3925	773.876
Estación 12	-77.76375	-8.579944	3733	596.276
Estación 13	-78.20331	-8.556412	1912	922.443
Estación 14	-78.24826	-8.663618	757	829.003
Estación 15	-78.05195	-8.64056	2135	482.323
Estación 16	-77.91951	-8.596069	2203	706.401
Estación 17	-78.1879	-8.701923	1365	529.205
Estación 18	-78.07636	-8.780029	2065	961.969
Estación 19	-77.72115	-8.733303	3963	659.959
Estación 20	-77.91012	-8.778276	1819	759.226
Estación 21	-77.78329	-8.843936	3169	1007.869
Estación 22	-77.70803	-8.924424	4645	822.075
Estación 23	-77.71687	-9.136761	3124	755.821
Estación 24	-77.45848	-9.318977	3717	900.208
Estación 25	-77.53504	-9.446976	3158	917.057
Estación 26	-77.39941	-9.468669	4677	941.827
Estación 27	-77.45621	-9.632199	3830	826.538
Estación 28	-77.31141	-9.759076	4201	838.689
Estación 29	-77.43558	-9.827842	3902	637.251
Estación 30	-77.2658	-9.878113	4213	986.562
Estación 31	-77.29941	-10.01353	4050	767.012

Se realizó la interpolación de las precipitaciones con los métodos de: Spline, IDW (Inversa de Distancias) y kriging lineal. En el presente proyecto de investigación se utilizó el método de kriging lineal que son para datos estadísticos que mejor se ajustan a nuestros requerimientos.

Se realizó el cálculo del Índice Modificado de Fourier, para la cual se utilizó la ecuación 3 y, por último, se calculó la erosividad del suelo (R) utilizando la ecuación 2.

Figura 24

Mapa de Erosividad del suelo (R) con datos de precipitación RAIN4PE.



Nota. En la figura se muestra el mapa de erosividad del suelo en las que se utilizó los datos RAIN4PE.

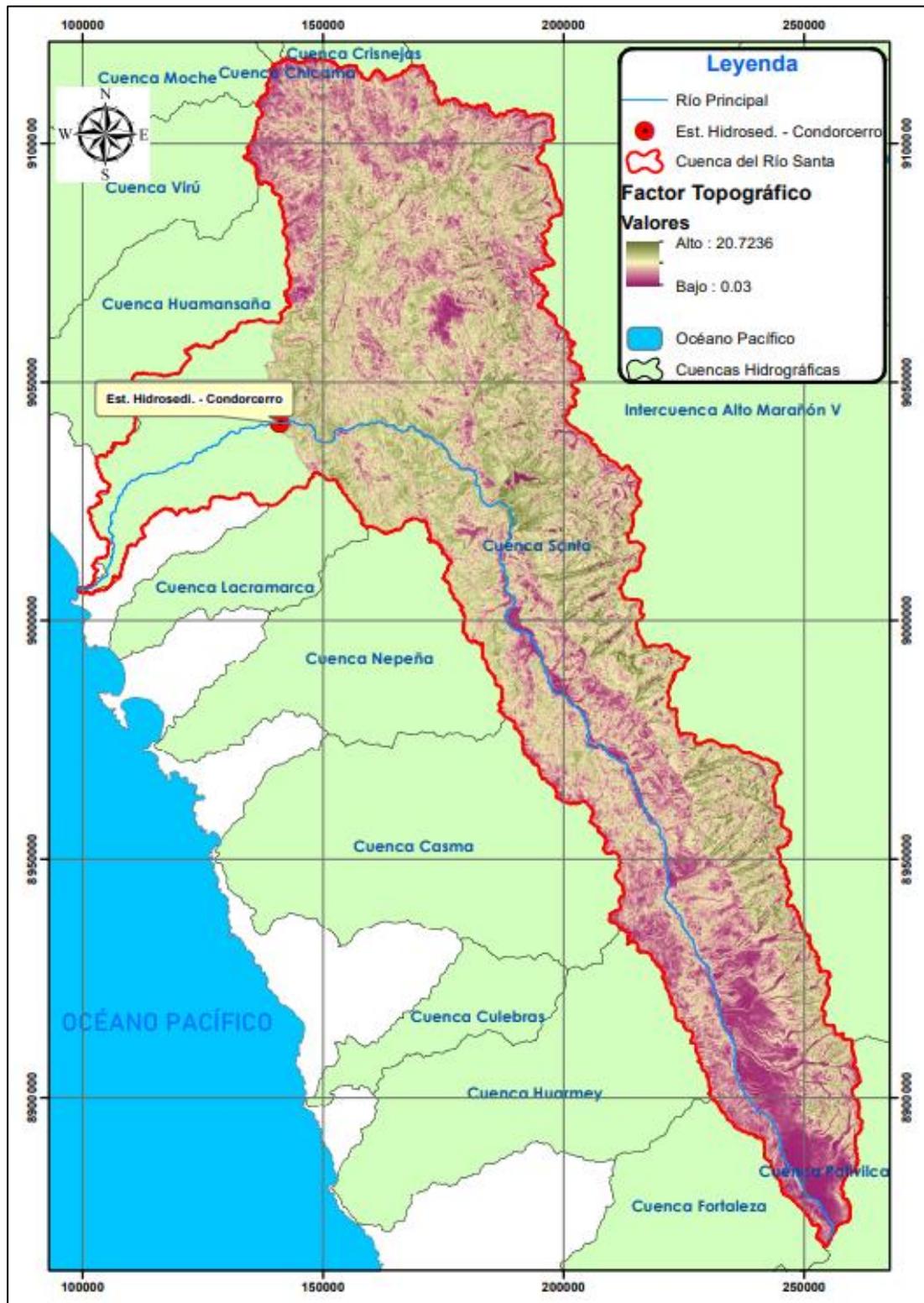
Factor Topográfico (LS). Se obtuvo el mapa de pendientes con el modelo digital de elevación de la cuenca del río Santa, primeramente, se calculó el parámetro k obteniendo valores mínimos de 0, máximos de 3.122 y una media de 2.048, seguidamente se calculó el coeficiente m, obteniendo valores mínimos de 0, máximos de 0.757 y una media de 0.654, ambas con la ecuación 6 y siendo muy necesario para el cálculo del Subfactor topográfico “L” que fue calculada utilizando la ecuación 5, todos estos procedimientos se realizaron con el Software ArcGIS 10.5 y su herramienta la calculadora raster, obteniendo valores de 1 como mínimo, 1.580 como máximo y una media de 1.251.

Para obtener el Subfactor topográfico “S” y con ayuda de la calculadora raster, mediante la ecuación 7, se obtuvo valores mínimos de 0.030, máximos de 16.080 y media de 5.887, para toda la cuenca del río Santa.

Habiendo obtenido el Subfactor “L” y el Subfactor “S” se realizó una multiplicación de ambos rasters la cual representa la ecuación 8. A continuación se muestra el mapa del factor topográfico (LS).

Figura 25

Mapa de Factor Topográfico (LS).



Nota. En la figura se muestra el mapa del factor topográfico con valores mínimos y altos.

Factor de Erodabilidad (k). Se realizó el análisis con el promedio de dos fuentes. La base de datos armonizada de los suelos del mundo (Harmonized World Soil Database - HWSD). El HWSD contiene la información más actualizada y completa del suelo disponible en la web actualmente y también se utilizó los mapas de clases y propiedades de los suelos de SoilGrids, ambas fuentes para determinar el factor de erodabilidad hacen que se convierta en una información muy consistente.

Según los datos HWSD, hay tres tipos de suelos: GL (Glaciares), HL (Phaeozem Luvic), I (Litosol) dentro de la cuenca del río Santa, cada una de esta representa una cantidad porcentual de arena, limo, arcilla y carbono.

Tabla 17

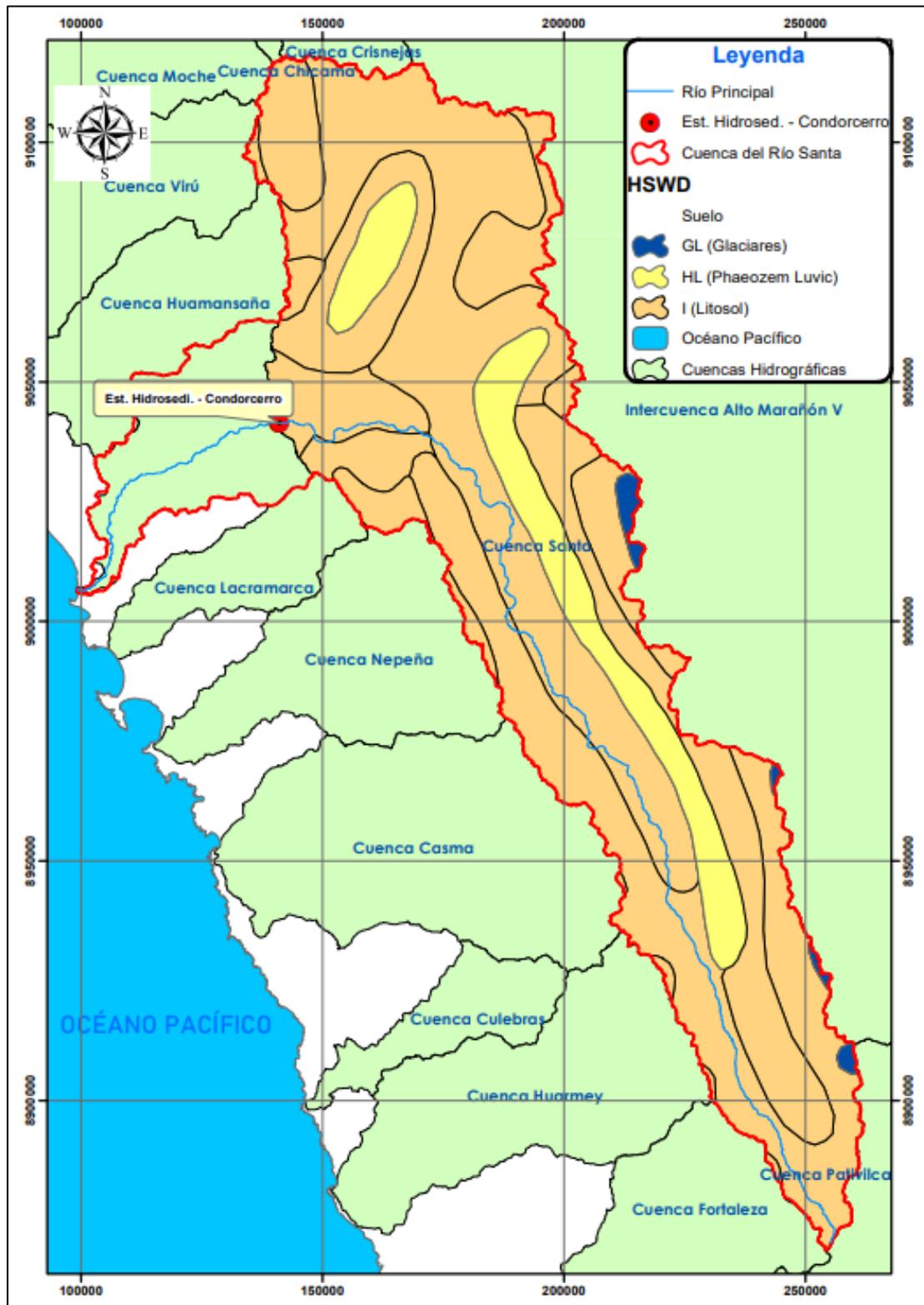
Cantidad de arena, arcilla, limo y carbono según el HWSD.

Según el HWSD	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Carbono (%)
HL	39.1	26.5	34.6	1.46
I	58.9	16.2	24.9	0.97
GL	0	0	0	0

Nota. En la tabla se muestra los porcentajes de arena, limo, arcilla y carbono, teniendo en cuenta el mapa Mundial del suelo HWSD.

Figura 26

Mapa de HSWD, información del suelo dentro de la cuenca del río Santa.



Nota. En la figura se muestra la distribución de tipo de suelo según el mapa mundial HSWD.

En la plataforma virtual de Soilgrids se puede tomar la muestra de suelo desde 5 cm hasta 200 cm de profundidad, en el proyecto se tomó muestra de 0 a 5 cm. tanto para Arcilla, arena, limo y muestra de 0-30 cm para carbono orgánico, obteniendo la siguiente tabla 18 y figuras.

Tabla 18

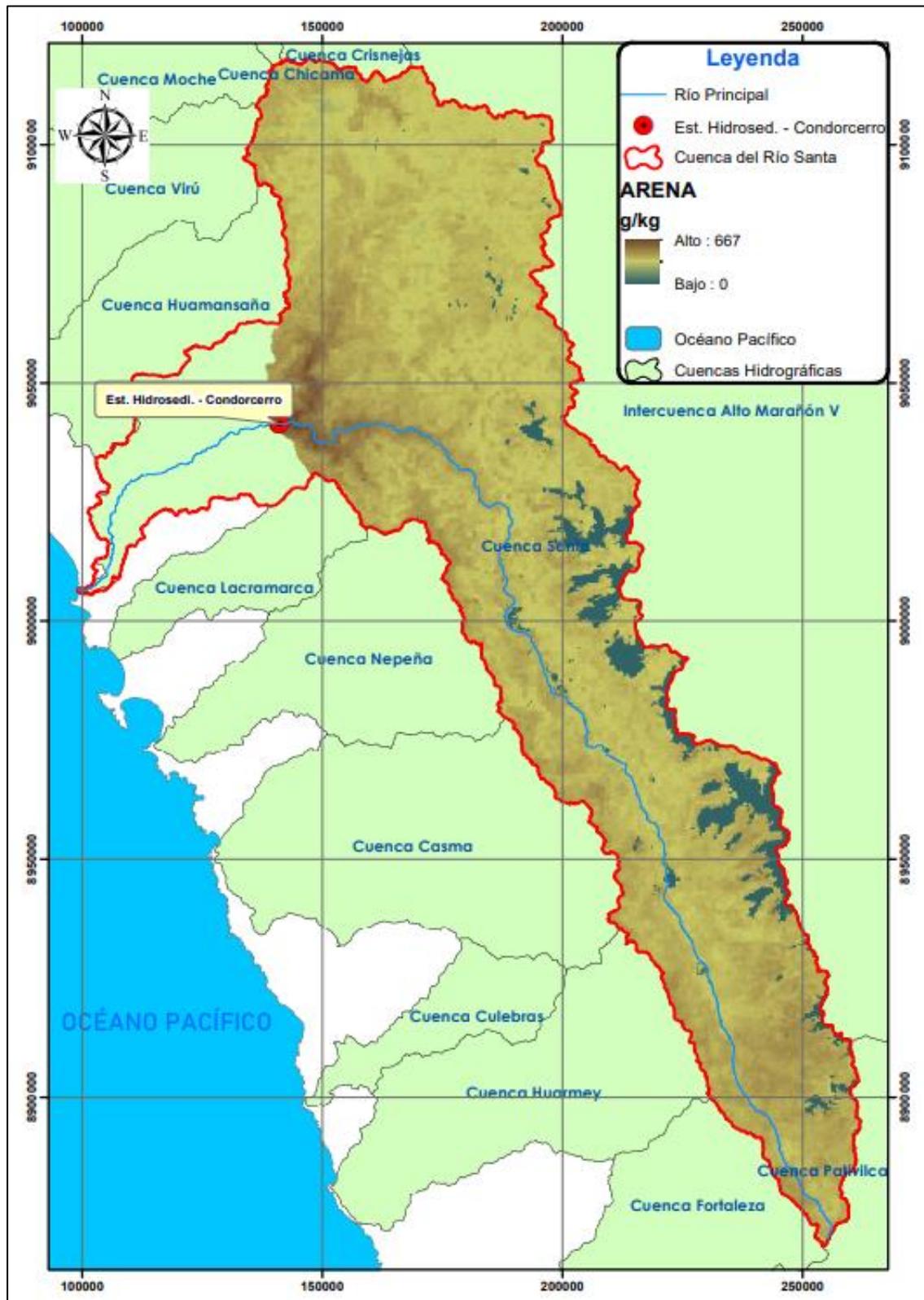
Cantidad de arena, arcilla, limo y carbono según SoilGrids.

Según SoilGrids	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Carbono (%)
HL	42.45	27.51	26.95	5.87
I	42.88	28.10	25.92	6.16
GL	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota. En la tabla se muestra los porcentajes de arena, limo, arcilla y carbono, teniendo en cuenta la plataforma de SoilGrids.

Figura 27

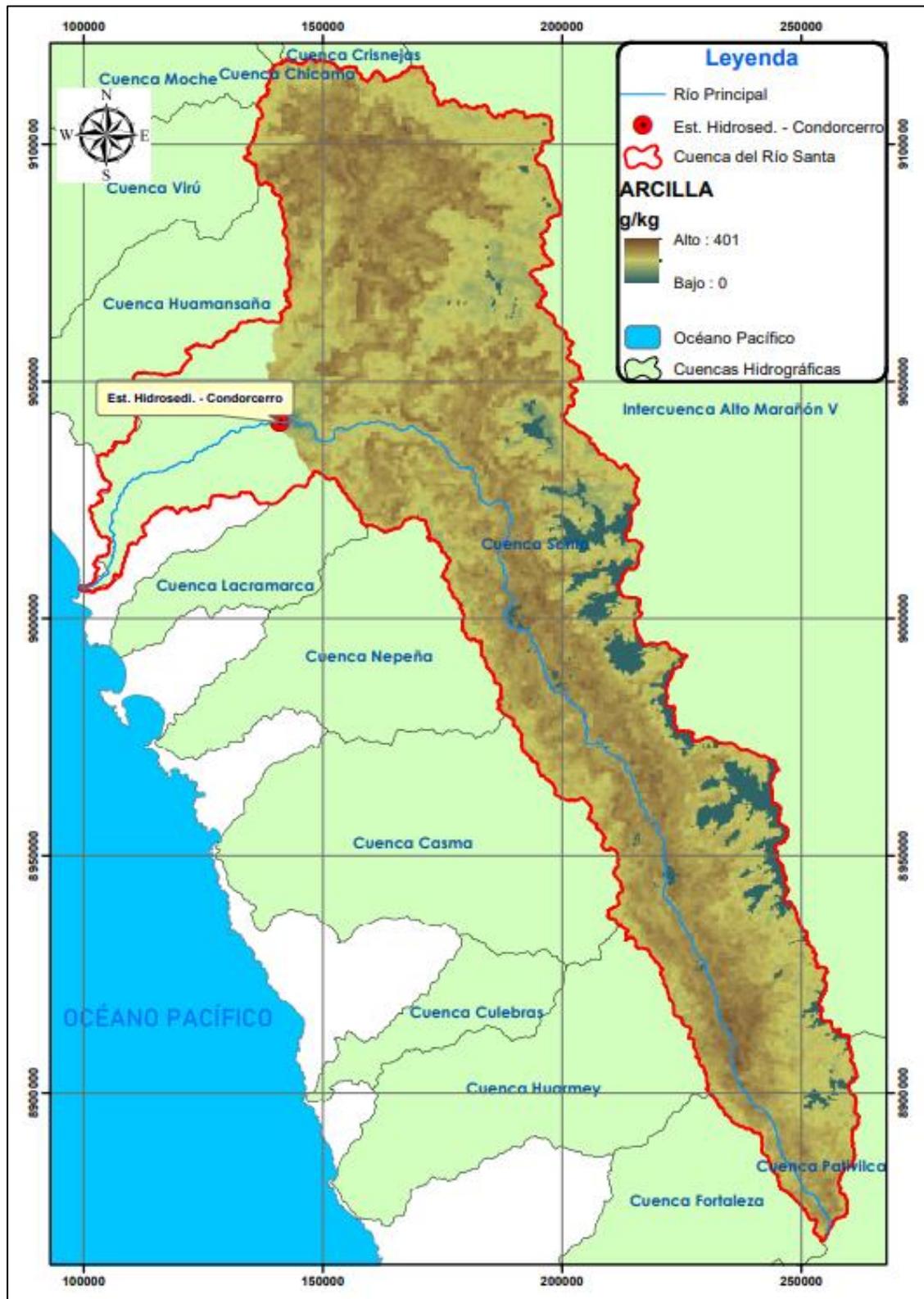
Mapa de SoilGrids, información de arena en g/kg dentro de la cuenca del río Santa.



Nota. En la figura se muestra el mapa de SoilGrids con información de arena en g/kg.

Figura 28

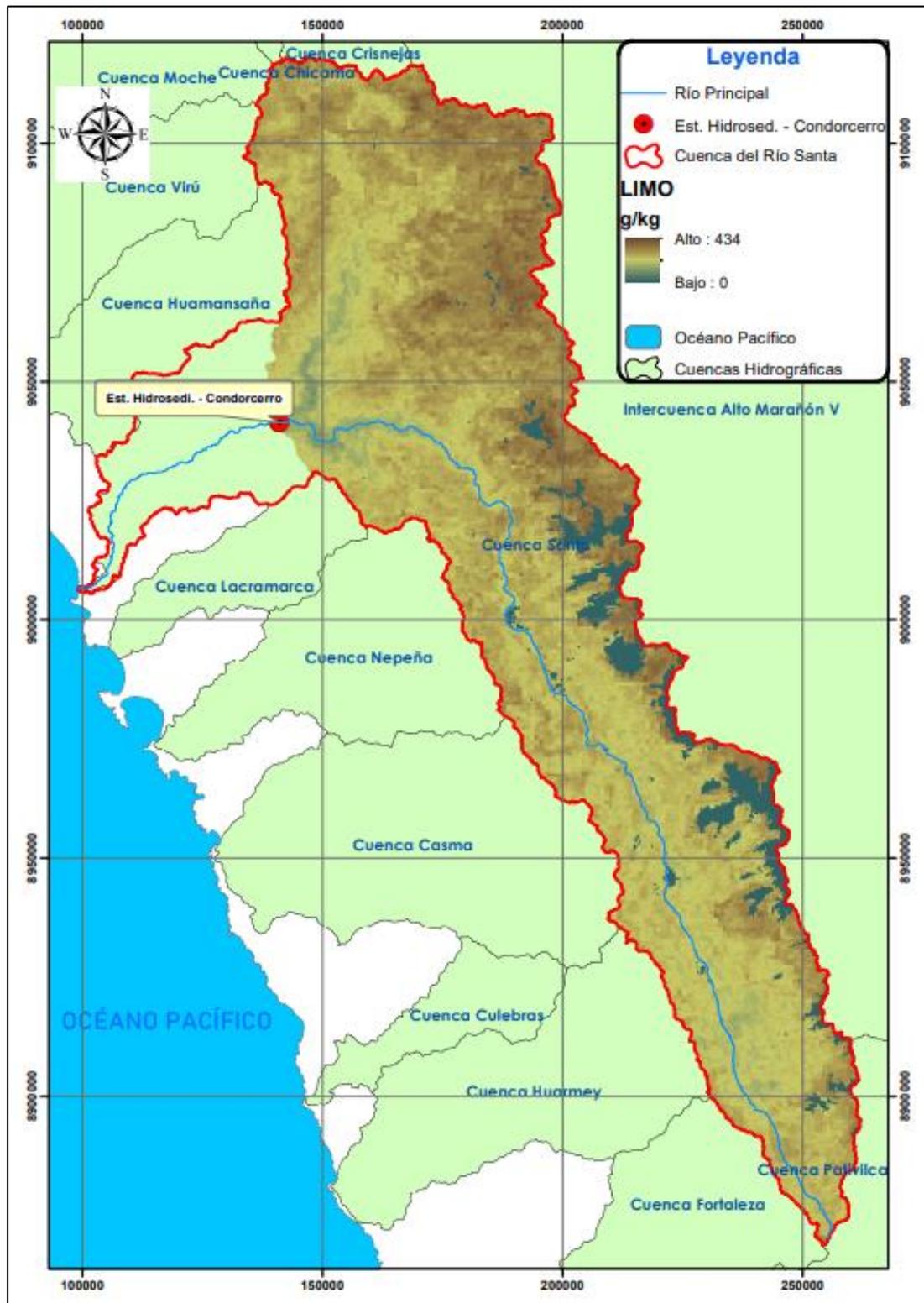
Mapa de SoilGrids, información de arcilla en g/kg dentro de la cuenca del río Santa.



Nota. En la figura se muestra el mapa de SoilGrids con información de arcilla en g/kg.

Figura 29

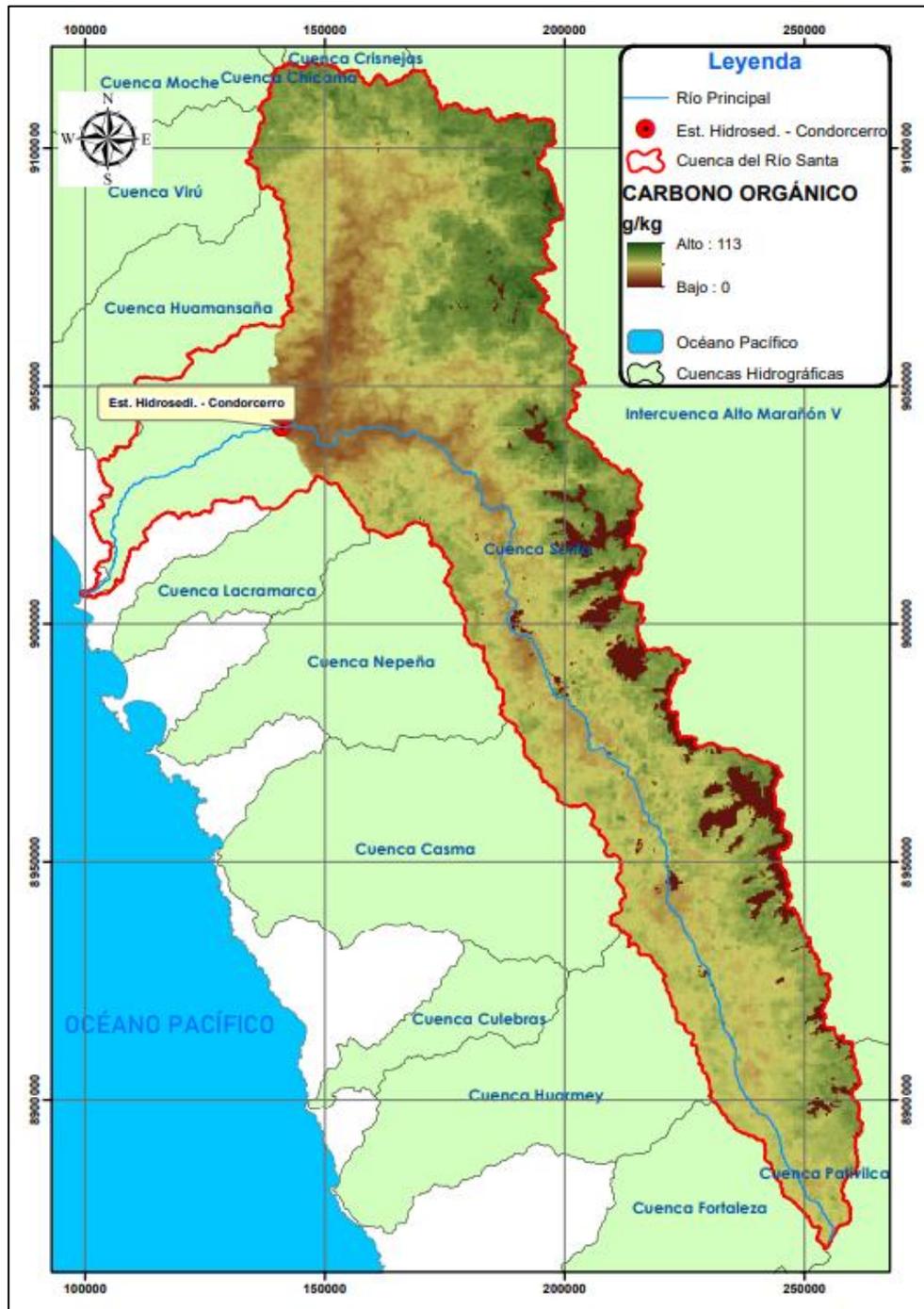
Mapa de SoilGrids, información de limo en g/kg dentro de la cuenca del río Santa.



Nota. En la figura se muestra el mapa de SoilGrids con información de arcilla en g/kg.

Figura 30

Mapa de SoilGrids, información de carbono orgánico en g/kg dentro de la cuenca del río Santa.



Nota. En la figura se muestra el mapa de SoilGrids con información de carbono orgánico en g/kg.

Habiendo obtenido los mapas por ambos métodos tanto del mapa de suelo mundial y de soilgrids, se promedió dichos resultados.

Tabla 19

Promedio porcentual de arena, arcilla, limo y carbono.

Media (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Carbono (%)	Total (%)
HL	41.26	27.49	31.26	4.15	100.00
I	51.41	22.67	25.93	4.08	100.00
GL	0	0	0	0	0.00

Nota. En la tabla se muestra el promedio porcentual del mapa mundial del suelo y SoilGrids de la arena, limo, arcilla y carbono orgánico.

Luego se procedió a calcular el factor K con la ecuación 4.

Tabla 20

Factor de erodabilidad k.

Suelo	fcsand	fcl-si	forge	fhisand	Factor K ((t.ha.hr)/(ha.MJ.mm))
HL	0.200	0.796	0.750	1	0.015741
I	0.200	0.796	0.750	1	0.015716

Nota. En la tabla se muestra los valores obtenidos de la erodabilidad.

Factor de Cobertura Vegetal (C). Este factor fue trabajado utilizando teledetección, se utilizó imágenes satelitales MOD13Q1. Se tuvo que procesar estas imágenes para evitar el cúmulo de nubes desde el año de 2001 hasta el 2014, se usó la ecuación 9 para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) y con la ecuación 10. Se consideró 2 temporadas secas y 2 temporadas húmedas por año, siendo los meses de temporada húmeda, febrero y marzo; para los meses de temporada seca son los meses de julio y agosto.

Tabla 21

Precipitación promedio mensual en temporada húmeda y temporada seca.

Datos de Precipitación RAIN4PE (mm/mes)												
Periodo	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	Mayo	Jun.	Jul.	Agos.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
Promedio Mensual	116.9	135.6	161	91.9	29.33	7.7	3.7	5.78	25.8	67.4	70.6	99.6

Nota. En la tabla se muestra el promedio mensual de las temporadas húmedas y secas de las estaciones RAIN4PE.

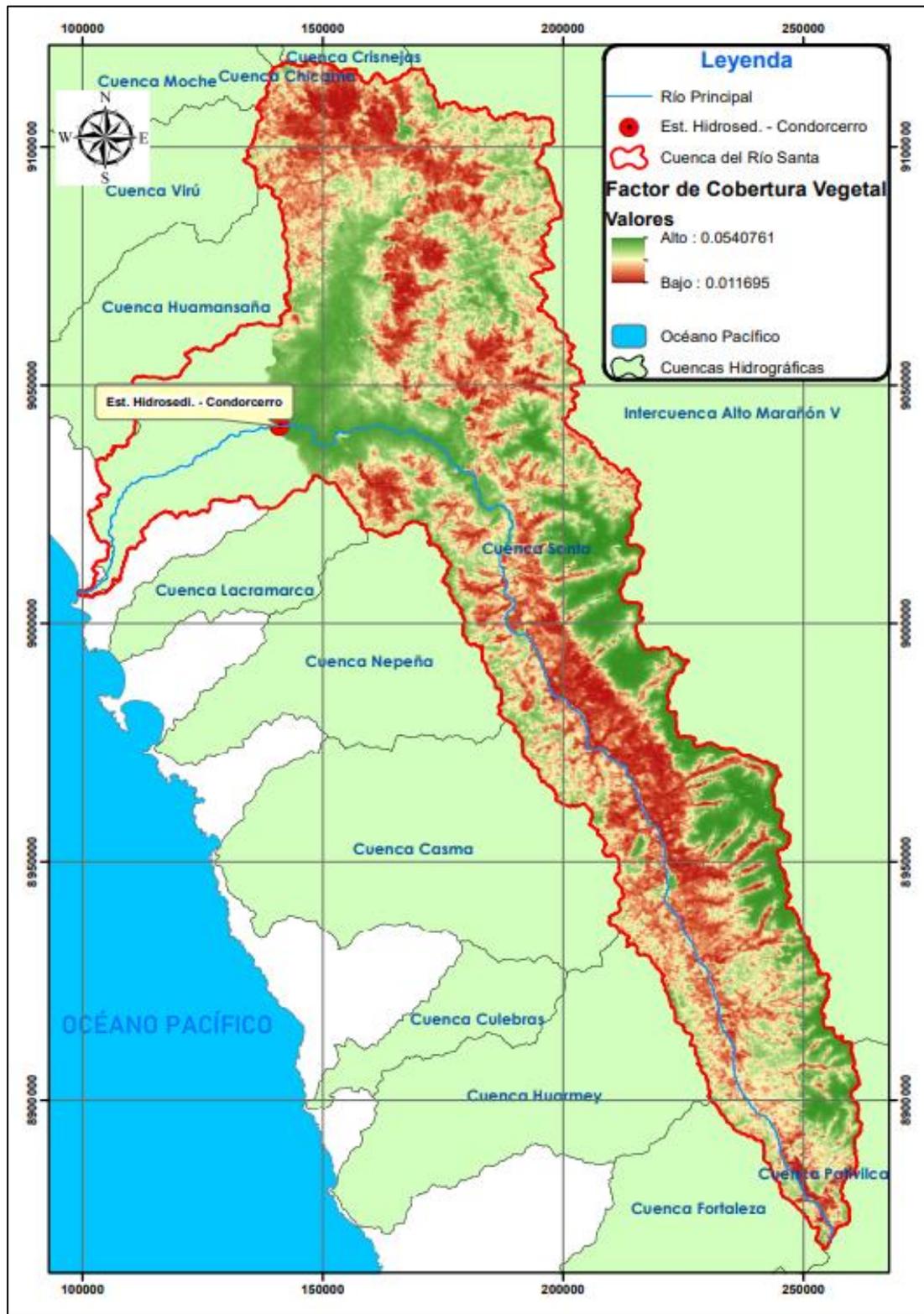
Tabla 22*Comportamiento NDVI y media del Factor de Cobertura Vegetal (C).*

Comportamiento NDVI					
Nro	Periodo	Época	Mínimo	Media	Máxima
1	Marzo – 2002	Húmeda	-0.1782	0.4061	0.9991
2	Julio – 2002	Seca	-0.2000	0.3217	0.9878
3	Marzo – 2006	Húmeda	-0.1693	0.3387	0.9849
4	Julio – 2006	Seca	-0.1889	0.3112	0.9723
5	Julio – 2010	Seca	-0.1868	0.3143	0.9900
6	Diciembre – 2010	Húmeda	-0.1785	0.2546	0.9967
7	Febrero – 2012	Húmeda	-0.1877	0.4162	0.9994
8	Marzo – 2012	Húmeda	-0.1787	0.4123	0.9970
9	Julio – 2012	Seca	-0.1889	0.3288	0.9628
10	Agosto – 2012	Seca	-0.1892	0.2868	0.9824
11	Febrero – 2014	Húmeda	-0.1973	0.3131	0.9981
12	Marzo – 2014	Húmeda	-0.1755	0.3178	0.9989
13	Julio – 2014	Seca	-0.1987	0.3355	0.9760
14	Agosto – 2014	Seca	-0.1949	0.2991	0.9693
Media			-0.0815	0.3328	0.7661
Factor C			0.0117	0.0334	0.0541

Nota. En la tabla se muestra el comportamiento NDVI de las épocas húmedas y secas de diferentes años.

Figura 31

Mapa de Cobertura Vegetal (C).

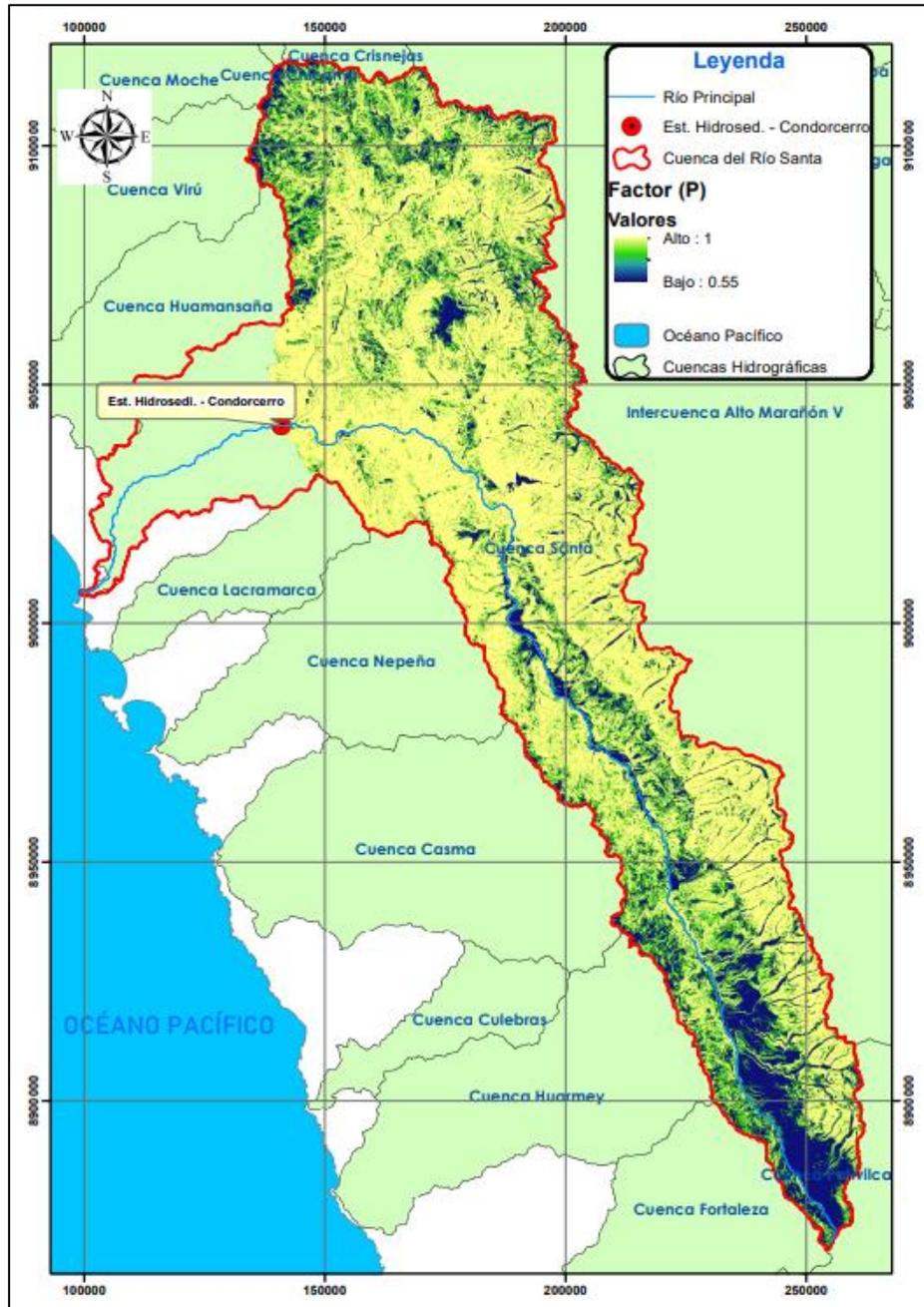


Nota. En la figura se muestra el mapa de cobertura vegetal dentro de la cuenca del río Santa.

Factor de Prácticas de Apoyo de Manejo de Suelos (P). Este factor varió según el porcentaje de pendiente, otorgándole valores según su contorno de 0.55 a 1 como se mencionó en la tabla 7. Se trabajó con el Modelo Digital de Elevación al cual se obtuvo el mapa de pendientes.

Figura 32

Mapa de Prácticas de apoyo de manejo de suelos (P).

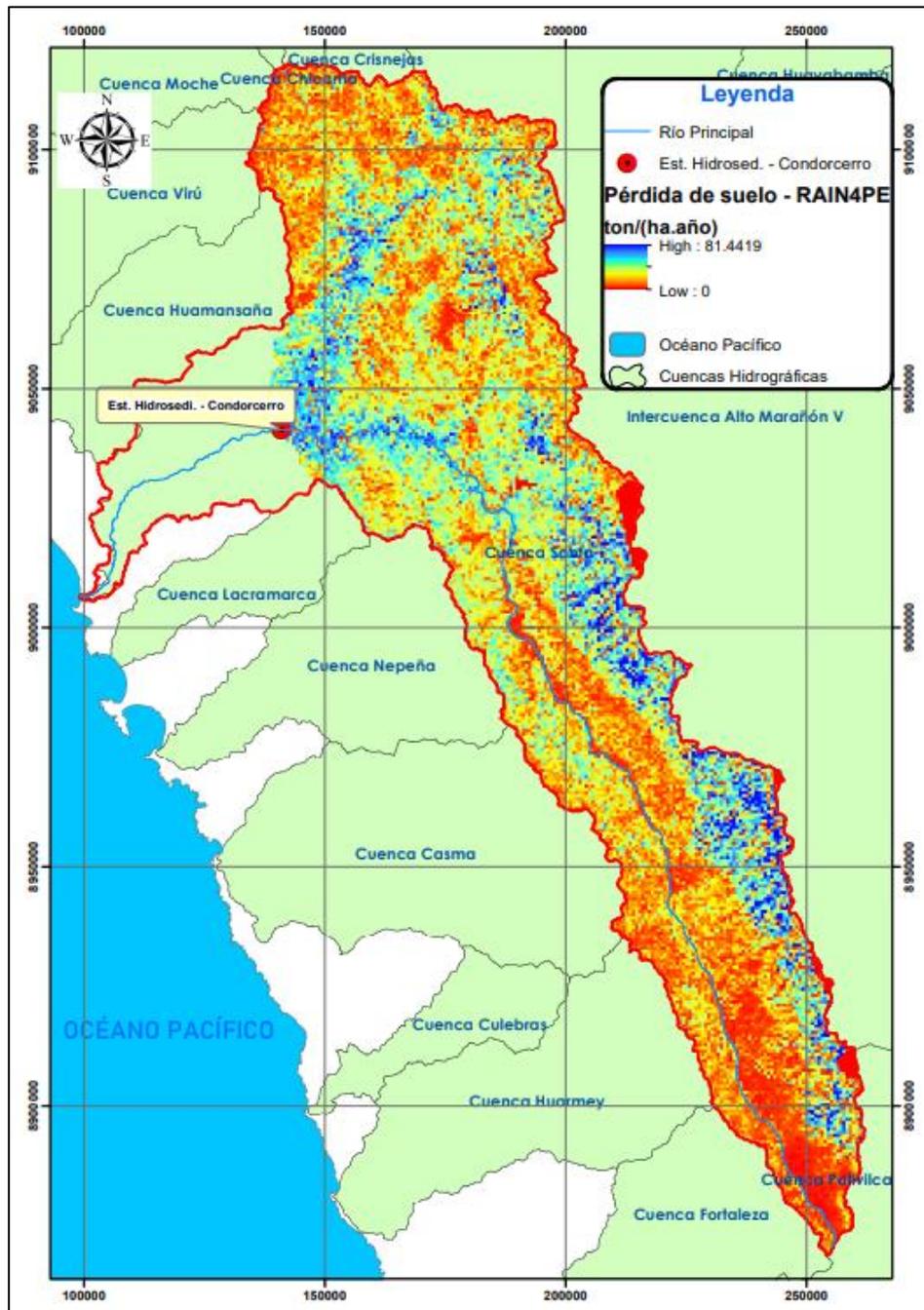


Nota. En la figura se muestra el mapa de las prácticas de apoyo de manejo de suelos que varían de 0.55 a 1.

Nivel de Erosión según RUSLE. Por último, dentro de la primera etapa y con la calculadora raster, se calculó el producto de: Factor de Erosividad (R), Factor Topográfico (LS), Factor de Erodabilidad (k), Factor de Cobertura Vegetal (C) y Factor de Practicas de Apoyo de Manejo de Suelos (P). Obteniendo

Figura 33

Mapa de Pérdida de suelo con precipitaciones RAIN4PE.



Nota. En la figura se muestra el mapa de erosión hídrica con el nivel de erosión según la ecuación RUSLE con datos de precipitación RAIN4PE.

Tabla 23*Resultados de la Erosión Hídrica con datos de precipitación RAIN4PE.*

Intensidad	RAIN4PE (T/ha.año)	Área de la cuenca (ha)	RAIN4PE (T/año)	RAIN4PE (M.T/año)
Mínimo	0	1040915	0	0
Máximo	81.441948	1040915	84774144	84.774144
Media	18.581627	1040915	19341894	19.341894

Nota. En la tabla se muestra la los valores obtenidos con el uso de datos de precipitaciones RAIN4PE, con intensidades, mínimo, máximo y media.

Segunda Etapa.

Respecto del objetivo específico 3 “Estimar la producción de sedimentos mediante la utilización del modelo Hidrológico semi-distribuido, herramienta de evaluación de suelos y aguas SWAT (Soil and Water Assessment Tool)” y respecto del objetivo específico 4 “Calibrar y validar la estimación de la Producción de Sedimentos”. Se estimó la producción de sedimentos calibrando y validando los resultados con los datos proporcionados por el proyecto especial Chavimochic mediante la utilización del modelo Hidrológico semi-distribuido, herramienta de evaluación de suelos y aguas SWAT (Soil and Water Assessment Tool). A continuación, se describe la obtención de los resultados de la modelación que se realizó.

Tomando los datos de precipitaciones de las 31 estaciones virtuales tratadas en la estimación de la erosión hídrica del suelo.

Para poder realizar la simulación en SWAT, se tuvo que hacer un Análisis de Unidad Respuesta Hidrológica, para la cual se tuvo que preparar:

Precipitación y Temperatura. Para esta segunda etapa de estimación de sedimentos, se trabajó con datos de precipitación grillada RAIN4PE. Con respecto a los datos de Temperatura mínima y Temperatura máxima se obtuvo información de los datos grillados PISCO que cuentan con una amplia información de temperatura, también se extrajo estas temperaturas diarias desde el año de 1981 hasta el año 2014. La precipitación y la temperatura extraída de la información grillada fueron procesadas con ayuda de un script para poder ingresar al Modelo semi-distribuido SWAT.

Modelo Digital de Elevación (MDE). Primeramente, Se realizó una comparación de los MDE entre SRTM 3, IGN, ALOS PALSAR y ASTER 3, todos con una resolución espacial de 30 x 30 metros y considerándose el mejor por criterio propio la cual se eligió SRTM 3. Se usó el modelo digital de elevación SRTM 3 de 30 m. por 30 m., la que fue procesada y recortada según la Cuenca del Río Santa considerándose un umbral de 20 mil hectáreas a más.

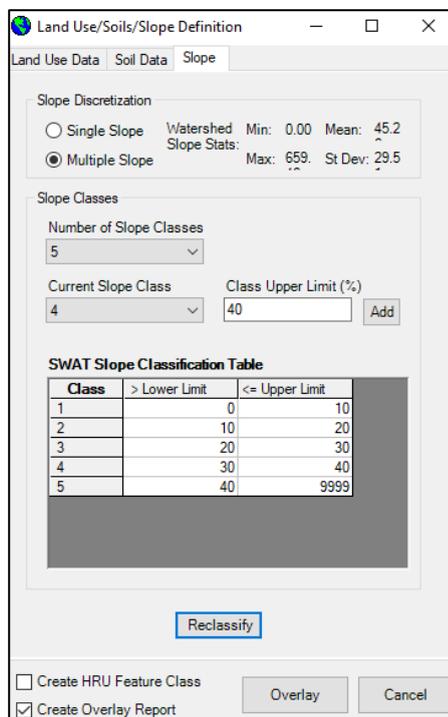
Al correr automáticamente con uso de Modelo Digital de Elevación, la delimitación de la Cuenca y subcuencas con la extensión de ArcGIS (ArcSWAT), se obtuvieron 31 subcuencas que serán trabajadas como muestra en la figura 31.

Automáticamente también se realizó el cálculo de los parámetros de las 31 subcuencas con ayuda de la extensión ArcSWAT.

Para el modelamiento en SWAT el MDE se tuvo que realizar la clasificación de la pendiente en 5 clases con intervalos de 10% en cada clase

Figura 34

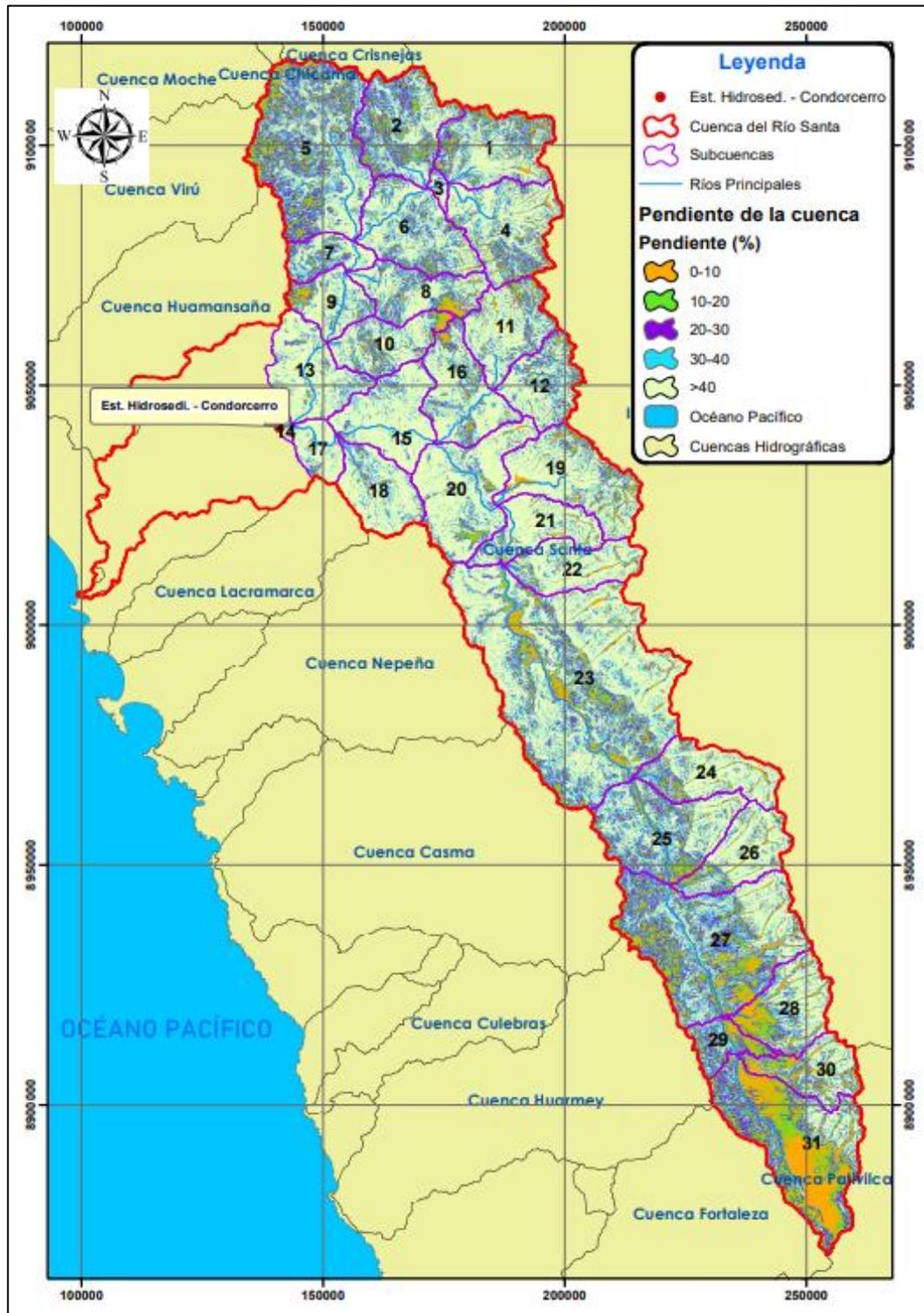
Ventana de ArcSWAT con la clasificación de la pendiente.



Nota. En la figura se muestra una ventana de interfaz del ArcSWAT para realizar la clasificación de pendientes. Se obtiene el siguiente mapa:

Figura 35

Mapa de clasificación de pendientes para el procesamiento de la modelación de Producción de Sedimentos.



Nota. En la figura se muestra el mapa de clasificación de pendientes para el procesamiento de la modelación de Producción de Sedimentos es ArcSWAT.

Uso de Cobertura. Habiéndose realizado una exhaustiva búsqueda de información, se consideró por conveniente la utilización de las imágenes satelitales de GLOBELAND con una resolución espacial de 30 metros por 30 metros del año 2000. Se realizó la preparación para ser trabajadas y evitar errores en el programa de ArcGIS. Reclasificando los valores dentro del área de la cuenca del río Santa, se tiene:

Tabla 24

Equivalencias según el tipo de suelo y su descripción.

		Globeland30	SWAT
Valor	Tipo	Descripción	Landuse
10	Tierra cultivada	Tierras utilizadas para agricultura, horticultura y jardines, incluidos arrozales, tierras de cultivo irrigadas y secas, huertas de hortalizas, hortalizas y frutas, entre otros.	AGRL
20	Forestal	Tierra cubierta por árboles, la vegetación cubre más del 30%, incluidos los bosques caducifolios y de coníferas, y los bosques dispersos con una cobertura del 10-30%, entre otros.	FRST
30	Pradera	Terreno cubierto de césped natural con una cobertura superior al 10%, entre otros.	PAST
40	Tierra de arbustos	Tierra cubierta por arbustos con una cobertura superior al 30%, incluidos arbustos de hoja caduca y perenne, y estepa desértica con una cobertura superior al 10%, entre otros.	FRST
50	Humedal	Tierra cubierta por plantas de humedales y cuerpos de agua, incluidos los pantanos interiores, los pantanos de lagos, los humedales de	WATR

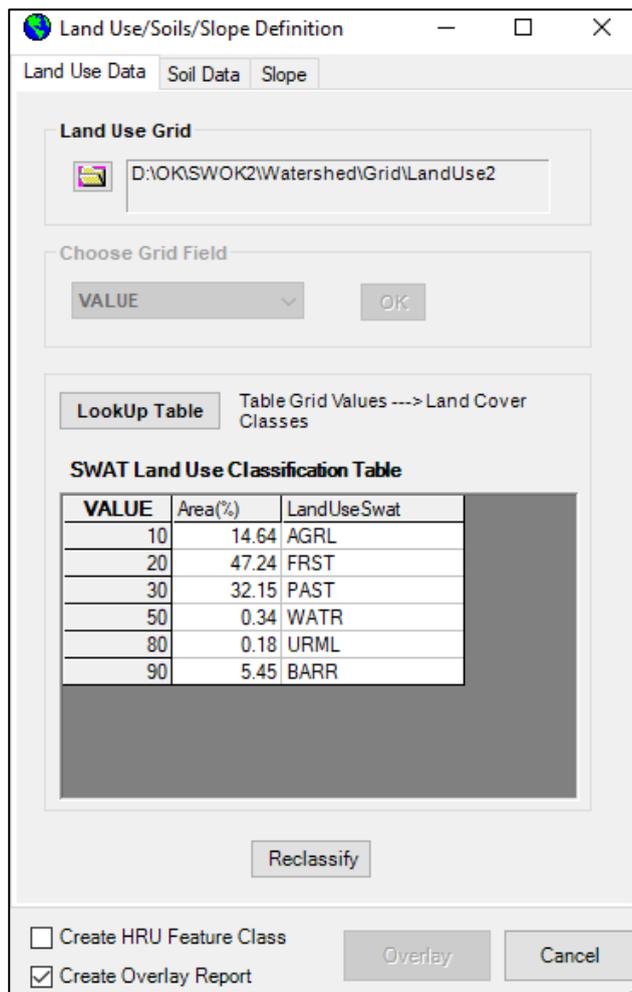
		llanuras fluviales, los humedales de bosques / arbustos, turberas, manglares y marismas, entre otros.	
60	Cuerpo de agua	Cuerpos de agua en el área terrestre, incluidos río, lago, embalse, estanque de peces, entre otros.	WATR
70	Tundra	Tierra cubierta por líquenes, musgo, hierbas perennes resistentes y arbustos en la región polar regiones, incluyendo tundra arbustiva, tundra herbácea, tundra húmeda y tundra estéril, entre otros.	SPAS
80	Superficie artificiales	Tierras modificadas por actividades humanas, incluidas todo tipo de viviendas, zona industrial y minera, facilidades de transporte e interior urbano zonas verdes y cuerpos de agua, entre otros.	URML
90	Tierra desolada	Tierras con una cobertura vegetal inferior al 10%, incluyendo desierto, campos arenosos, gobi, rocas desnudas, tierras salinas y alcalinas, entre otros.	BARR
100	Nieve y hielo permanente	Tierras cubiertas por nieve permanente, glaciares y casquetes polares	BARR

Nota. En la tabla se muestra los valores del producto Globeland 30 con el tipo, descripción y las siglas que se utilizan dentro del ArcSWAT.

Con el Software ArcSWAT se reclasificó el uso de cobertura según el uso de suelo valga la redundancia y el porcentaje de área que abarca esta.

Figura 36

Ventana de ArcSWAT con la clasificación del uso de cobertura.

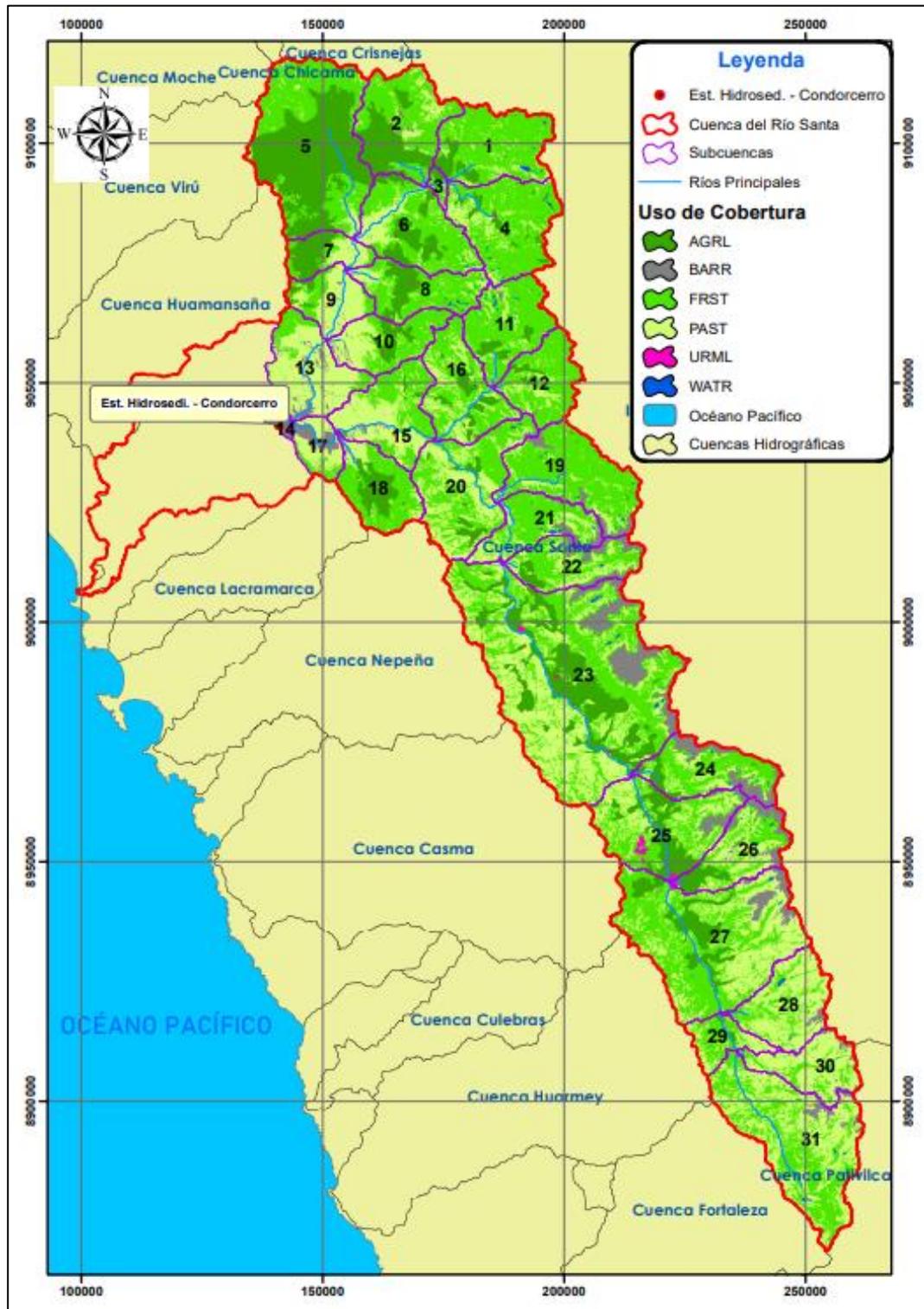


Nota. En la figura se muestra una ventana de interfaz del ArcSWAT para realizar la clasificación de uso de cobertura.

Se obtiene el siguiente mapa:

Figura 37

Mapa de clasificación de uso de cobertura para el procesamiento de la modelación de Producción de Sedimentos.

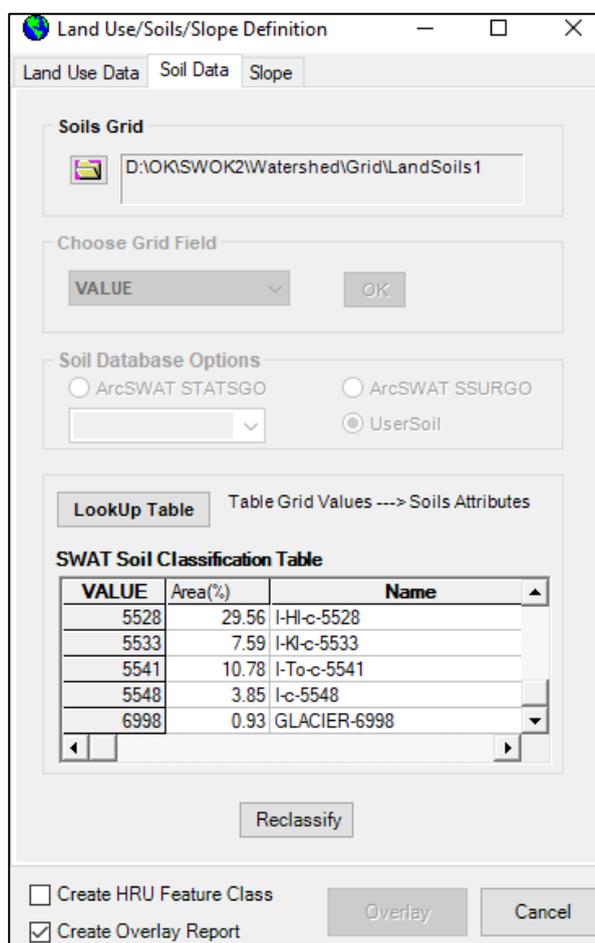


Nota. En la figura se muestra el mapa de clasificación de uso de cobertura para el procesamiento de la modelación de Producción de Sedimentos es ArcSWAT.

Tipo de Suelo. Se trabajó con los datos de suelo de la FAO, considerándose las equivalencias correspondientes según su área que abarcan.

Figura 38

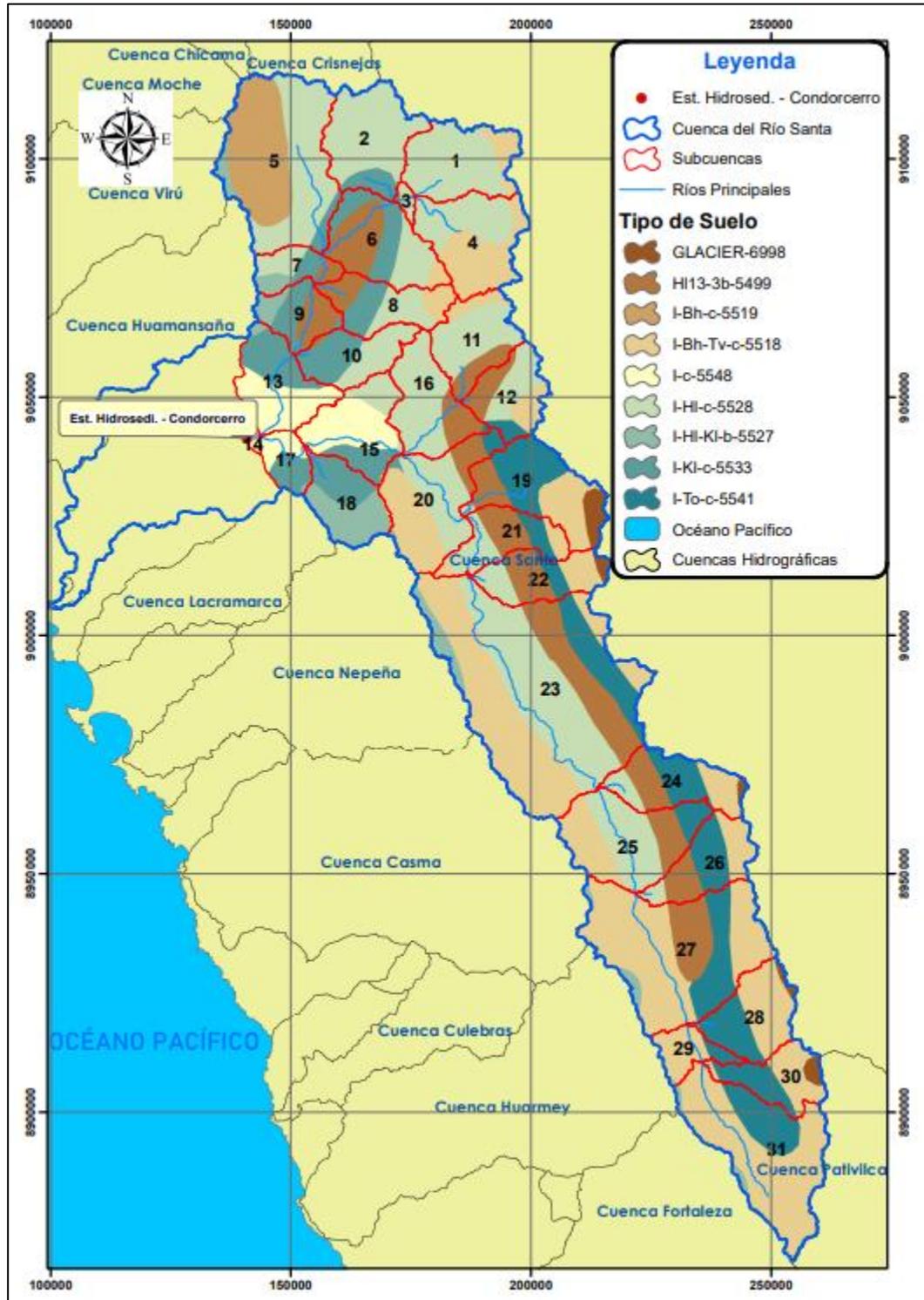
Ventana de ArcSWAT con la clasificación del tipo de suelo.



Nota. En la figura se muestra una ventana de interfaz del ArcSWAT para realizar la clasificación del tipo de suelo. Obteniendola siguiente figura:

Figura 39

Mapa de clasificación de tipo de suelo para el procesamiento de la modelación de Producción de Sedimentos.



Nota. En la figura se muestra el mapa de clasificación de uso de tipo de suelo para el procesamiento de la modelación de Producción de Sedimentos es ArcSWAT.

Se realiza una superposición de: la pendiente, uso de cobertura y datos de suelo, la cual generó las unidades de respuesta hidrológica y un reporte de cada subcuenca.

Modelamiento Hidrológico Semi-Distribuido, Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Detalles generales de la modelación. Para el modelo se tomó en cuenta el periodo 1998-2014 donde dos años serán de periodo de calentamiento para mitigar las condiciones iniciales del modelo, así también, ya que se sólo se tiene datos OBSERVADOS desde el 2000 hasta el 2014 entonces, se optó por tomar el periodo 2000-2009 como periodo de calibración y el 2010-2014 como el de validación.

Método de cálculo de la evapotranspiración. Debido a que se cuenta con datos de precipitación y de temperatura registrados y procesados se optó por el método de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración de referencia de la cuenca.

Rendimiento y valores iniciales de la simulación. Al ser el SWAT un modelo hidrológico tan completo y complejo, con una serie de parámetros asociados a las condiciones físicas de cualquier cuenca, se realizó una primera simulación, donde el modelo definió los parámetros de entrada por defecto de acuerdo a las características asociadas al suelo y cobertura, para lo cual fue necesario describir e identificar los parámetros involucrados en este proceso.

El modelo cuenta con una amplia gama de parámetros que caracterizan todos los procesos físicos de la cuenca como se muestra en la tabla 10. La calibración y validación de los caudales líquidos es primordial para estimar la producción de sedimentos con una aproximación más real a los datos OBSERVADOS.

En la primera simulación, los valores iniciales que el modelo asignó a los parámetros listados son presentados a continuación:

Tabla 25*Parámetros asignados en la primera simulación.*

Parámetro	Unidad	Valor Asignado por el SWAT
CN2	-	* var ⁽¹⁾
ESCO	-	0.95
SOL_AWC	mm/mm	* var ⁽¹⁾
GW_DELAY	días	31
GW_REVAP	-	0.02
REVAPMN	mm	750
GWQMN	mm	1000
ALPHA_BF	días	0.048
RCHRG_DP	fracción	0.05
SOL_K	mm/h	* var ⁽¹⁾
SURLAG	días	2
CH_K2	mm/h	0

Nota. En la tabla se muestra los parámetros que se usaron en la simulación y los valores que se asignaron según SWAT. Donde: ⁽¹⁾ La fracción mostrada no indica el rango ya estos parámetros varían según el tipo de suelo; indica la variabilidad admisible en este tipo de parámetros.

Una vez implementando toda la información geofísica y meteorológica al modelo se estimó el rendimiento inicial del modelo obteniendo los siguientes estadísticos:

Tabla 26*Estadísticos del desempeño hidrológico de la simulación para caudal líquido.*

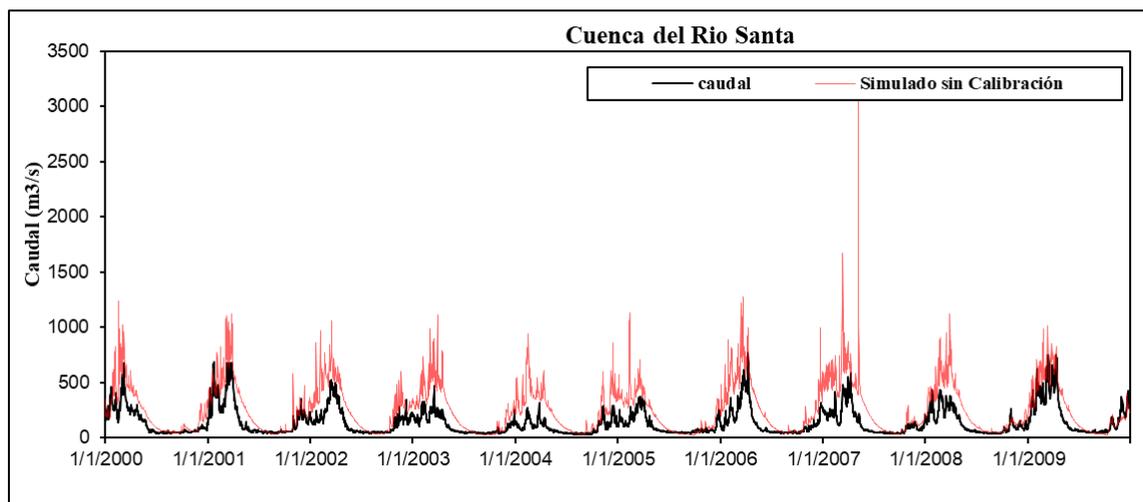
Cuenca	NSE	PBIAS	RSR
Cuenca del Rio Santa	-1.183	82.28	1.477

Nota. En la tabla se muestra los resultados de los estadísticos del desempeño hidrológico para el caudal líquido.

Si bien los estadísticos iniciales no entran dentro del rango aceptable se puede apreciar (ver figura 40) que el comportamiento de los caudales observados y simulados siguen la misma tendencia, que puede ser un buen indicativo inicial, mostrando similitudes en caudales de épocas bajas y una sobrestimación en temporadas altas.

Figura 40

Caudal líquido observado vs caudal líquido simulado.



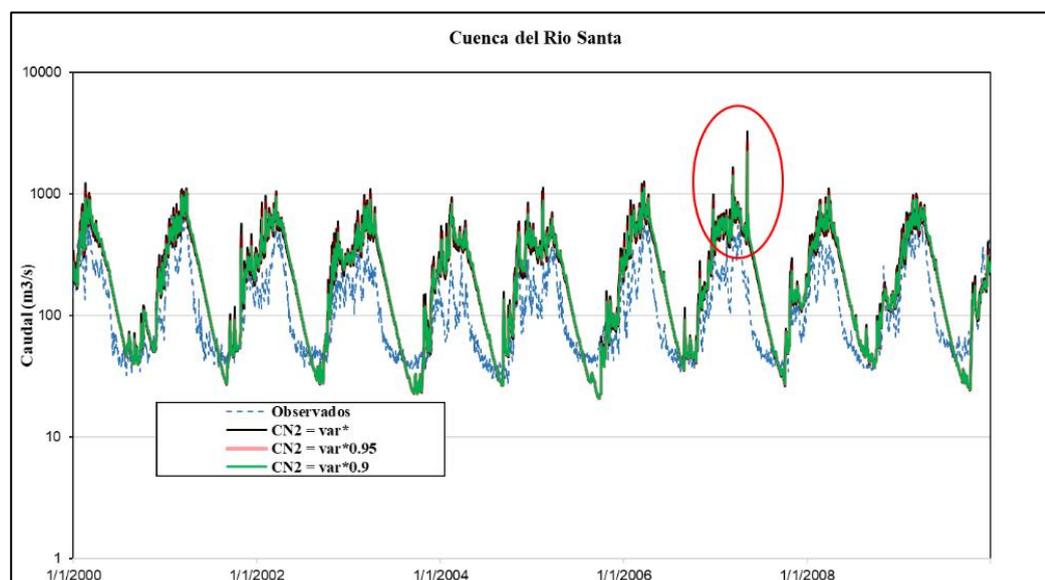
Nota. En el gráfico se muestra la comparación del caudal líquido observado vs el caudal líquido simulado sin calibrar.

Con esto en mente y siguiendo el esquema de calibración manual se ha procedido con la calibración siendo el primer parámetro a ser calibrado el denominado CN2 que está en función de la permeabilidad del suelo y tiene incidencia en los caudales altos.

Se realizaron varias simulaciones para ver el mejor ajuste, en la figura 41 a continuación se ilustra.

Figura 41

Ajuste del parámetro CN2, Caudal líquido observado vs caudal líquido simulado.



Nota. En el gráfico se muestra el ajuste más óptimo con el parámetro CN2.

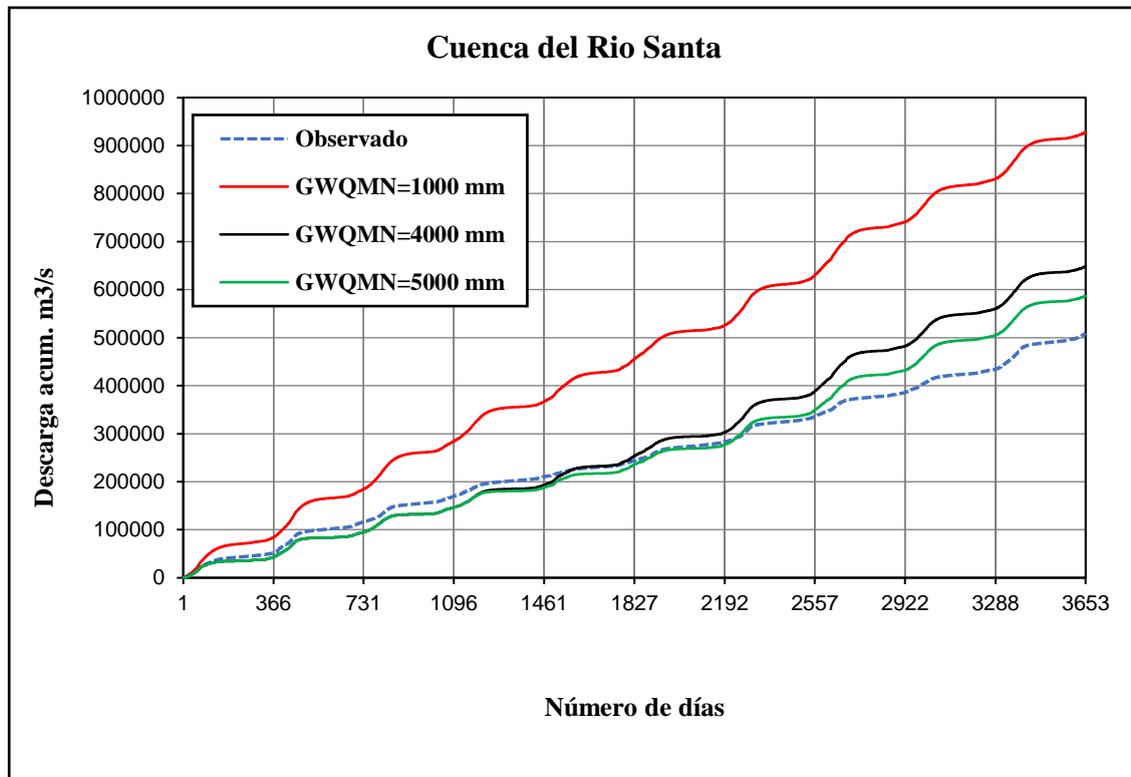
En este primer parámetro como se observa los valores de caudales en épocas lluviosas se han ido disminuyendo mientras el valor del CN2 se aproxima a su mínimo rango de calibración, si bien en este punto los estadísticos asociados al rendimiento del modelo han mostrado un avance aun no reflejan un valor aceptable por lo tanto se procedió a calibrar el segundo parámetro SOL_AWC, que se define como la capacidad del suelo para retener agua y depende de las características del suelo, por lo tanto, varía dentro del perfil del suelo, estos dos parámetros tienen influencia sobre el flujo superficial, su variación debe ser porcentual ya que dependen del tipo de cobertura y suelo presentes en cada unidad hidrográfica, estos parámetros son los que se deben manipular con más cuidado ya que si se altera en demasía estaría cambiando las propiedades físicas de la cuenca a las cuales influyen.

Al igual que con CN2 el rendimiento del modelo tuvo mejoras significativas a medida que este incrementaba su valor al 15% de su valor inicial, aun con el ajuste de estos parámetros el rendimiento del modelo siguió dentro de un rango inaceptable, por ello se procedió a calibrar el parámetro GWQMN que tiene incidencia sobre el volumen del caudal de salida.

Donde cómo se puede apreciar el valor óptimo de este parámetro es cuando ronda a su valor máximo admisible.

Figura 42

Calibración del parámetro GWQMN.



Nota. En el gráfico se muestra la calibración del parámetro GWQMN que influye en el volumen del caudal de salida de la cuenca, obteniendo una mejora en la calibración.

Como se puede apreciar en el gráfico, según el ajuste del parámetro GWQMN que regula la respuesta del agua superficial, teniendo unidades en mm, se realizó una comparación del parámetro cuando GWQMN = 1000 mm, GWQMN = 4000 mm y GWQMN = 5000 mm y el caudal observado, en el eje de las abscisas el número de días y en el eje de las ordenadas el caudal en m³/seg. Obteniendo que el parámetro GWQMN con el valor de 5000 mm se ajusta mejor a los caudales observado y estando dentro del Rango según la tabla 10.

Si bien una vez mejorado este parámetro se nota una mejora significativa en el rendimiento del modelo aun **no entra dentro del rango aceptable** ya que en ciertas épocas de estiaje el modelo no logra predecir de buena manera los caudales observados, por ello

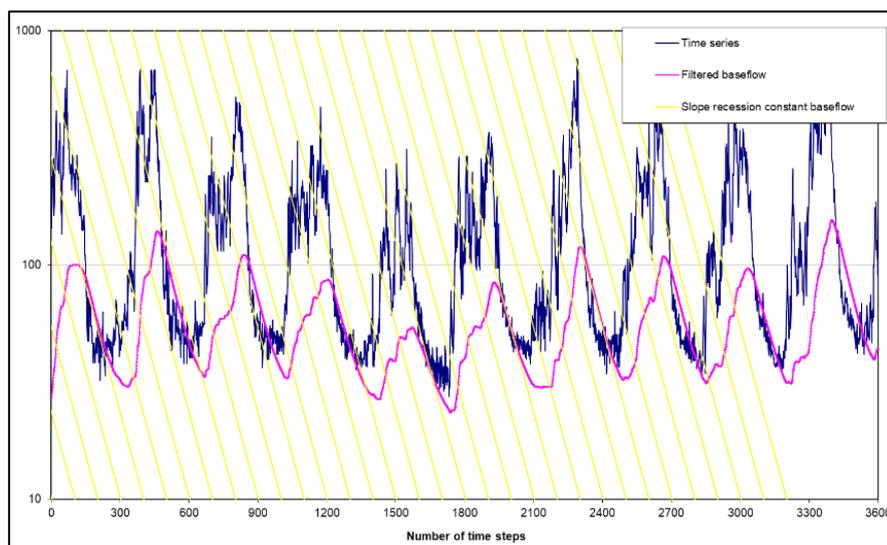
se calibrará parámetros que regulen los caudales bajos que usualmente están asociados a los caudales base al interior de la cuenca.

Uno de los primeros parámetros a calibrar para regular los caudales bajos es el denominado GW_DELAY, que representa el agua que se mueve más allá de la profundidad del perfil del suelo por filtración a través de la zona vadosa antes de convertirse en recarga de acuíferos poco profundos. El retraso entre el momento en que el agua sale del perfil del suelo y entra en el acuífero poco profundo dependerá de la profundidad hasta el nivel freático y de las propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas en las zonas vadosas y subterráneas.

Para calibrar este parámetro es necesario el filtrado del flujo base de los caudales observados para esto se usó el software WETSPRO, modelo que puede ser utilizado para la separación de flujos usando filtros numéricos y para la obtención de picos independientes (POT), este modelo permite comparar los volúmenes acumulados, así como el rendimiento del modelo en los eventos más extremos (Shakti, et al., 2010), este procedimiento ayudará a identificar la constante de recesión de flujo, valor que se comprobó como el más semejante al GW_DELAY (ver figura 43).

Figura 43

Calibración del parámetro GW_DELAY.



Nota. En el gráfico se muestra la calibración con el parámetro GW_DELAY, que sirve para regular los caudales bajos.

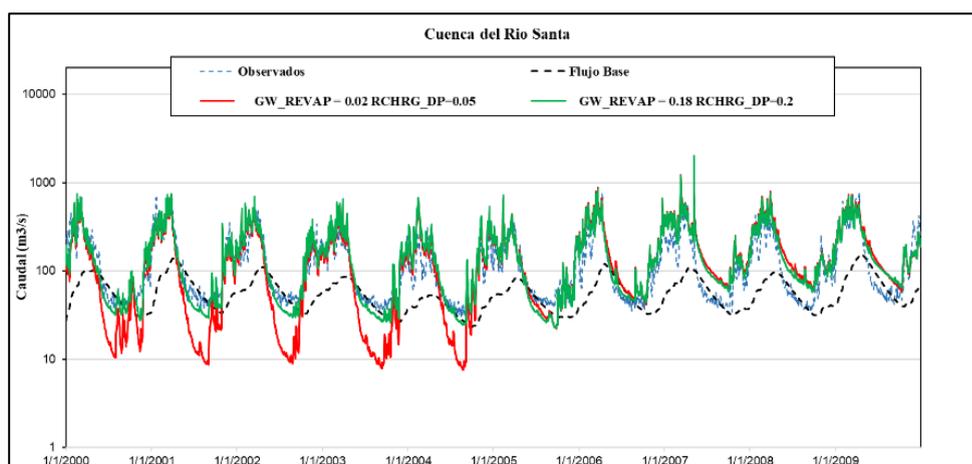
Esa constante de recesión tiene un valor de 120 días para la cuenca estudiada. Una vez calibrado este parámetro el rendimiento del modelo entra en el rango aceptable, pero

para ir ajustando el comportamiento de los caudales bajos de mejor manera se procederá a calibrar el parámetro GW_REVAP representa la cantidad de agua que se mueve desde el acuífero poco profundo hacia la zona insaturada suprayacente. En los períodos en que el material que recubre el acuífero está seco, el agua en la franja capilar que separa las zonas saturadas e insaturadas se evaporará y difundirá hacia arriba. A medida que el agua se elimina de la franja capilar por evaporación, se reemplaza por agua del acuífero subyacente. El agua también puede ser eliminada del acuífero por plantas de raíces profundas que pueden absorber agua directamente del acuífero.

Este proceso es significativo en las cuencas hidrográficas donde la zona saturada no está muy lejos debajo de la superficie o donde crecen plantas de raíces profundas, esto implica que el uso y cobertura de la tierra influirá en la variación de este parámetro. A medida que GW_REVAP se acerca a 0, el movimiento del agua desde el acuífero poco profundo hacia la zona radicular está restringido. A medida que GW_REVAP se acerca a 1, la tasa de transferencia del acuífero poco profundo a la zona de la raíz se aproxima a la tasa de evapotranspiración potencial. El valor para GW_REVAP debe estar entre 0.02 y 0.20. Por otro lado, el $RCHRG_DP$ representa la fracción de percolación de la zona de raíz de las plantas que recarga el acuífero profundo, razón por la que estos parámetros fueron evaluados al mismo tiempo.

Figura 44

Calibración del parámetro GW_REVAP y el parámetro $RCHRG_DP$.



Nota. En el gráfico se muestra la calibración con el parámetro GW_REVAP y $RCHRG_DP$, estos dos parámetros están directamente relacionados.

El mejor ajuste de estos dos parámetros es cuando GW_REVAP ronda su valor máximo admisible y RCRG_DP toma el valor de 0.2.

A continuación, se presenta un resumen de los parámetros calibrados para la cuenca del Río Santa a nivel diario.

Tabla 27

Parámetros calibrados para la cuenca del río Santa.

Parámetro	Unidad	Unidad Hidrográfica
		Cuenca Río Santa
Parámetros que regulan la respuesta del agua superficial		
CN2	-	* var 0.9
ESCO	-	0.95
SOL_AWC	mm/mm	* var 1.08
Parámetros que regulan la respuesta del agua subsuperficial		
GW_DELAY	días	120
GW_REVAP	-	0.18
REVAPMN	mm	750
GWQMN	mm	5000
ALPHA_BF	días	0.048
RCHRG_DP	fracción	0.2
SOL_K	mm/h	* var
Parámetros que regulan la respuesta del agua en la cuenca		
SURLAG	días	2
CH_K2	mm/h	-

Nota. En la tabla se muestra el resultado de los parámetros calibrados que regulan la respuesta del agua en la cuenca del río Santa.

El estadístico asociado a esta calibración a nivel diario viene presentado a continuación.

Tabla 28

Estadísticos asociados a la simulación, calibrados.

Cuenca	NSE	PBIAS	RSR
Cuenca del Rio Santa	0.6	17.2	0.673

Nota. En la tabla se muestra los resultados de los estadísticos, obteniendo que el rendimiento del modelo se encuentra en un rango satisfactorio.

Según la tabla 9 (Estadísticos recomendados para evaluar el desempeño del modelo hidrológico). El rendimiento del modelo entra en el rango **satisfactorio** tomando como referencia el parámetro de Nash Sutcliffe. Una vez realizada la calibración se volvió a correr el modelo para el periodo de validación periodo comprendido en los años 2010-2014 obteniendo los siguientes estadísticos a nivel diario:

Tabla 29

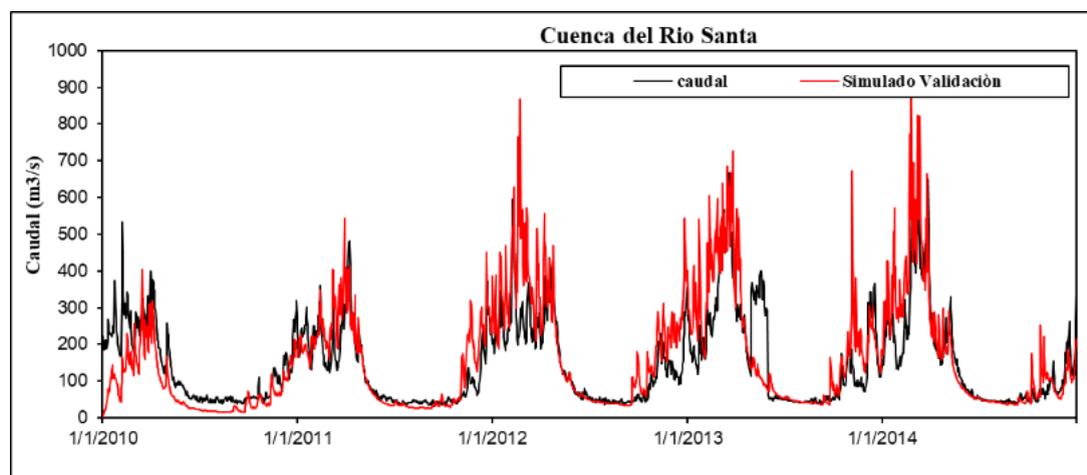
Estadísticos asociados a la simulación, validados.

Cuenca	NSE	PBIAS	RSR
Cuenca del Rio Santa	0.5	6.4	0.739

Nota. En la tabla se muestra los resultados de los estadísticos validados, siendo satisfactorios.

Figura 45

Caudal líquido observado vs caudal líquido validado.



Nota. En el grafico se muestra la comparación del caudal líquido observado vs caudal líquido validado, teniendo un comportamiento similar.

Al igual que en la etapa de calibración el rendimiento del modelo es satisfactorio por tanto se puede concluir que el modelo esta validado en términos del caudal líquido.

Calibración de sedimentos. Los parámetros más usados en la calibración manual son los que regulan el sedimento en el canal principal, partiendo de este análisis se procedió a calibrar dichos parámetros donde los que mayor influencia reflejaron fueron PFR, SPEX y CH_EROD calibrando los valores ilustrados a continuación.

Tabla 30

Parámetros que influyen en el caudal sólido.

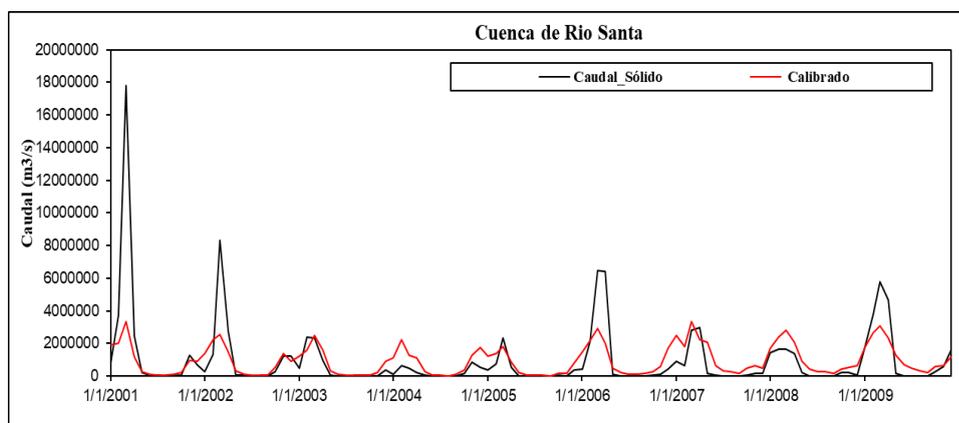
Cuenca	PFR	SPEX	CH_EROD
Cuenca del Rio Santa	2	2	1

Nota. En la tabla se muestra los valores de los parámetros que se utilizaron para calibrar los caudales solidos dentro de la cuenca del rio Santa.

Una vez realizada la modificación de estos parámetros se realizó la simulación para el periodo 2001-2009 donde como se aprecia en la figura 46.

Figura 46

Caudal sólido observado vs caudal sólido calibrado.



Nota. En la grafico se muestra el comportamiento del Caudal sólido observado vs caudal sólido calibrado.

Tabla 31

Estadísticos del desempeño hidrológico de la simulación calibrada para caudal sólido.

Cuenca	NSE	PBIAS	RSR
Cuenca del Río Santa	0.4	-4.23	0.788

Nota. En la tabla se muestra los valores de los estadísticos en la simulación calibrada para ver el desempeño hidrológico del caudal sólido.

En el periodo de validación del modelo 2010-2014 el modelo mostro un mejor comportamiento que en el de calibración como ya se había mencionado anteriormente, los estadísticos asociados a este periodo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 32

Estadísticos del desempeño hidrológico de la simulación validada para caudal sólido.

Cuenca	NSE	PBIAS	RSR
Cuenca del Río Santa	0.55	30.17	0.671

Nota. En la tabla se muestra los valores de los estadísticos en la simulación validada para ver el desempeño hidrológico del caudal sólido.

Tomando en cuenta los rangos propuestos por Moriasi para estos estadísticos puede concluirse que modelo está validado.

Al haber realizado la calibración y validación del modelo semi hidrológico SWAT, Se obtuvo la cantidad de sedimentos que produce la cuenca del río Santa, calculados en M.T/año. Se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 33

Cantidad promedio anual de sedimentos que produce la cuenca del río Santa, simulado con el modelo SWAT.

Año	Sedimentos (M.T/año)
1981	11.40295
1982	9.66664
1983	7.56042
1984	13.37567
1985	7.41397
1986	8.07707
1987	9.5365
1988	9.63904
1989	12.2741
1990	8.21906
1991	9.0775
1992	6.58607
1993	17.1357
1994	14.5058
1995	10.2848
1996	14.9639
1997	12.9171
1998	20.2911
1999	21.093
2000	15.8945
2001	18.9509
2002	19.3404
2003	16.2182
2004	16.5722
2005	13.563
2006	20.0908
2007	22.1638
2008	17.6376
2009	19.0336
2010	12.5725

2011	16.0512
2012	24.9201
2013	25.1345
2014	22.1692
Promedio	14.83332

Nota. En la tabla se muestra la cantidad de sedimentos anuales que produce la cuenca del río Santa con el modelo SWAT desde los años 1981 hasta el 2014. Se adjuntó los valores estimados mensuales de la producción de sedimentos en el Anexo F.

Tercera Etapa.

Respecto del objetivo general “Determinar cómo influye la Erosión Hídrica del Suelo para la producción de Sedimentos en la Cuenca del Río Santa en el Periodo: 1981 -2014.”

Se obtuvo como resultado de erosión hídrica con los datos de precipitaciones RAIN4PE, 19.342 M.T/año y un promedio de 14.833 M.T/año en producción de sedimentos, por lo tanto, la hipótesis planteada es afirmativa en virtud, a que existe una razón de proporcionalidad dentro del rango de 4 a 3 entre la erosión hídrica del suelo y la producción de sedimentos respectivamente dentro de la cuenca.

Cuarta Etapa.

Respecto del objetivo específico 5 “Determinar las zonas potencialmente críticas de la Erosión Hídrica del Suelo y Producción de Sedimentos”. En esta última etapa, se determinó las zonas potencialmente críticas de la Erosión Hídrica del Suelo y por ende la mayor Producción de Sedimentos.

Se estimó una media de erosión hídrica según cada Provincia, obteniendo en la Provincia de Huaylas una mayor cantidad de producción de sedimentos, 3.767 M.T/año que podría ser reflejada por la superficie que abarca dentro de la cuenca del Río Santa que es de 178312.355 Ha, siendo la mayor entre todas las provincias.

Tabla 34

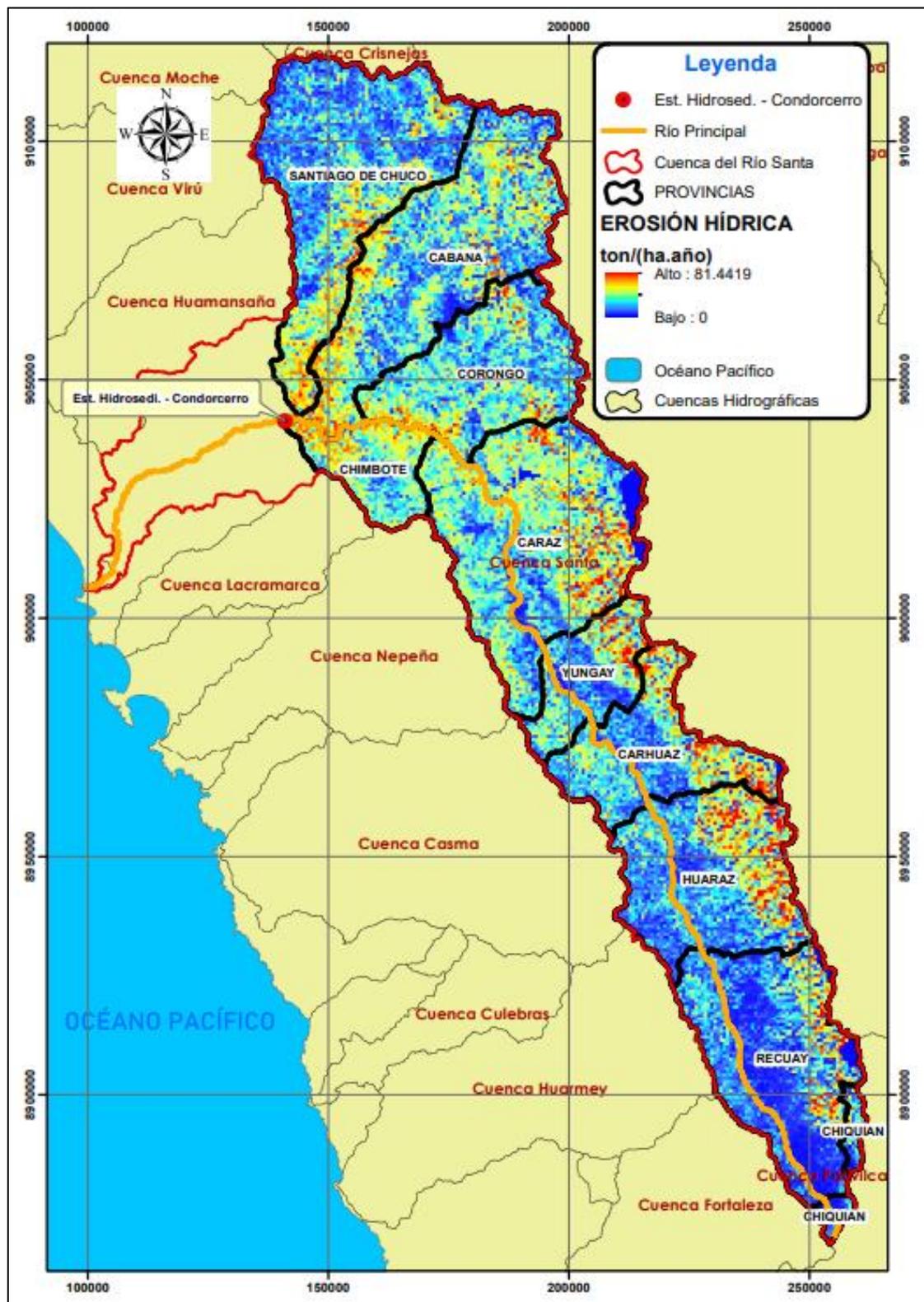
Provincias potencialmente más críticas por la Erosión Hídrica del Suelo y por ende la mayor Producción de Sedimentos.

Provincia	Área (Ha)	Sedimentos Promedio (T/Ha.Año)	Sedimentos Promedio (M.T/año)
HUARAZ	117826.272	18.886	2.225
BOLOGNESI	12645.779	12.609	0.159
CARHUAZ	81624.861	19.895	1.624
CORONGO	102538.873	19.387	1.988
HUAYLAS	178312.355	21.125	3.767
PALLASCA	162175.655	20.416	3.311
RECUAY	130804.638	11.418	1.494
SANTA	41813.925	24.241	1.014
YUNGAY	51448.171	19.179	0.987
SANTIAGO DE CHUCO	161724.465	17.214	2.784
Total y Promedios	1040915	18.437	1.935

Nota. En la tabla se muestra las provincias que se encuentran dentro de la cuenca del río Santa y los valores de la erosión hídrica de cada una de estas, siendo la provincia de Huaylas la que presenta mayor cantidad de producción de sedimentos.

Figura 47

Mapa de las Provincias potencialmente más críticas por la Erosión Hídrica del Suelo.



Nota. En la figura se muestra el mapa de las provincias que están más afectadas por la Erosión Hídrica del suelo y por ende mayor producción de sedimentos.

4.2. Prueba de Hipótesis.

La hipótesis planteada es afirmativa en virtud, a que existe una razón admisible de proporcionalidad de 4 a 3 entre la erosión hídrica del suelo y la producción de sedimentos respectivamente dentro de la cuenca del río Santa.

4.3. Discusión.

Para el objetivo específico 1, “Determinar los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Santa”:

En la tabla 11,12 Y 13 se presentó los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Santa, entre los que destacan son: Área total de la cuenca del río Santa con 10409.15 km², perímetro de la cuenca igual a 1074.52 km, longitud del río principal iguala a 274.90 km, altitud media de la cuenca igual a 3805.37 m.s.n.m, altitud máxima de la cuenca igual a 6768 m.s.n.m, altitud mínima de la cuenca igual a 468 m.s.n.m y número total de ríos igual a 7989, todos estos parámetros mencionados son muy importantes porque tienen influencia sobre la respuesta hidrológica de la cuenca. Se comparó con el antecedente de Valladares (2017) quien determinó un área de la cuenca del río Santa de 10419.26 km², quien utilizó como formato el modelo digital del terreno ASTERGDEM cuya resolución es de 30 x 30m. Mientras en que en esta tesis se desarrolló con el modelo digital de terreno ALOS PALSAR que tiene una resolución de 12.5 x 12.5m, la cual se estimó la superficie de la cuenca del Río Santa un área de 10409.15 km². Esta ligera diferencia se debe al tamaño de los pixeles del raster, habiendo utilizado un formato más actualizado y con una mayor precisión para esta tesis.

Para el objetivo específico 2, “Estimar la erosión hídrica utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)”:

En la figura 21 se mostró la subdivisión de la cuenca del río Santa en 31 subcuencas siendo muy necesario para el análisis hídrico de cada unidad hidrológica. En la figura 22 se mostró el mapa de las estaciones virtuales donde se especifica la ubicación de cada estación considerada en el centroide de la subcuenca para que pueda representar de mejor manera la precipitación de cada unidad hidrológica. En la figura 23 se mostró la ventana de secuencia o guion de comandos de lenguaje de programación en el entorno de desarrollo integrado RStudio que es una excelente opción hoy en día para el manejo automatizado de grandes datos. En la figura 24 se muestra el mapa de erosividad del suelo (R) en la que se tiene un

valor máximo de 5715.37 $Mj*mm/ha*hr*año$, un valor mínimo de 4242.73 $Mj*mm/ha*hr*año$ con un promedio de: 5057.84 $Mj*mm/ha*hr*año$ y según los rangos típicos de la tabla 3 representa una clase Alta entre un rango de 3000 a 6000 $Mj*mm/ha*hr*año$. En la figura 25 se muestra el mapa del factor topográfico (LS) en la que se calculó un valor máximo de 20.724, un valor mínimo 0.030 con un promedio de: 7.457, que según la tabla 5 se encuentra dentro del grupo de pendientes de 24 – 30 %. Para el cálculo de erodabilidad se muestra la tabla 17 donde detalla la cantidad porcentual de la arena, arcilla, limo y carbono según la nomenclatura armonizada de suelos del mundo dentro de la cuenca del río Santa en la cual fue representada como se muestra en la figura 26 considerando los tres tipos de suelos: GL (Glaciares), HL (Phaeozem Luvic) y I (Litosol), estos se promediaron con el mapa de suelos SoilGrids que muestran la cantidad porcentual de arena, limo, arcilla y carbono como se detalla en la figura 27 para la arena, figura 28 para la arcilla, figura 29 para el limo y figura 30 para el carbono orgánico, obteniendo la tabla 19, utilizando la ecuación 4 para la obtención del factor de erodabilidad se obtuvieron valores de 0.015741 $((t.ha.hr)/(ha.MJ.mm))$ para el área de Phaeozem Luvic y 0.015716 $((t.ha.hr)/(ha.MJ.mm))$ para el área de Litosol como se muestra en la tabla 20, estos dos resultados son valores que se encuentran dentro de la naturaleza de suelos bien drenados en material libre arenoso clasificado con una clase de erodabilidad moderado como indica en la tabla 4. Se realizó el cálculo de la cobertura vegetal teniendo en consideración las temporada húmeda y temporada seca como muestra la tabla 21. En la figura 31 se muestra el mapa de cobertura vegetal (C) con un valor mínimo de 0.0117, un valor máximo de 0.0541 y un valor promedio de 0.0334, según la tabla 6 se encuentra dentro del rango de cultivo y práctica, Maíz, sorgo, bajo rendimiento, laboreo con chisel. Se calculó el factor de prácticas de apoyo de manejo de suelos (P) obteniendo el mapa que se muestra en la figura 32 con un valor bajo de 0.55, valor máximo de 1 y valor promedio de 0.8573 encontrándose como contorno según muestra la tabla 7. Por último, interpretando la figura 33 y la tabla 23 donde menciona un valor estimado mínimo de 0 M.T/año, un valor máximo igual a 84.774 M.T/año y un promedio de 19.341 M.T/año, se discutió con la tabla 8, para los datos grillados de precipitación RAIN4PE, los niveles de erosión promedio se encuentran dentro de las zonas con procesos erosivos leves. Existe erosión, aunque no es apreciable a simple vista, pero también hay zonas donde se representa procesos erosivos muy graves. Existe erosión y es manifiesta a simple vista.

Para el objetivo específico 3, “Estimar la producción de sedimentos mediante la utilización del modelo Hidrológico semi-distribuido, herramienta de evaluación de suelos y aguas SWAT (Soil and Water Assessment Tool)” y para el objetivo específico 4, “Calibrar y validar la estimación de la Producción de Sedimentos”:

Se utilizó la precipitación, temperatura y los mapas que se muestran en la figura 35, figura 37 y figura 39 para realizar la primera simulación, obteniendo valores iniciales de parámetros asignados a la primera simulación como muestra en la tabla 25, se comparó con la tabla 10 que son los parámetros que regulan la respuesta del agua y cumplen con los rangos admisibles. Algo que destacar respecto a modelación de sedimentos en SWAT es que los resultados en términos de sedimentos dependen de varios factores que pueden estar relacionados a la entrada de datos o simplemente a la forma en que procesa la información el modelo o también fallos en la lectura de datos en campo. Respecto a la entrada de datos se refiere a la utilización de datos para SWAT, como son la cobertura vegetal, uso de suelo, pendientes, temperaturas y precipitaciones; como la cuenca del río Santa es bastante extensa aumenta la dificultad para el modelamiento, debiendo contar con una inmensa información para precisar la obtención de resultados y en la lectura de campo se refiere a los fallos por parte del personal encargado de la toma de datos en la estación hidrosedimentológica, otro factor que se puede mencionar son los fenómenos naturales que puedan suscitar dentro de la cuenca, generando así valores atípicos observados. Al haber realizado la calibración y validación del modelo semi hidrológico SWAT en caudales líquidos y sólidos como detalla en los resultados. Con la tabla 9 que muestra los estadísticos recomendados para evaluar el desempeño del modelo hidrológico y según Douglas et al. (2010) que indica que cerca de 20 estudios realizados con SWAT determinan que un valor satisfactorio de aceptación estadística para calibración de acuerdo con los datos reales es de 0,5 para el cálculo de NSE, teniendo en consideración lo mencionado se obtuvo: en la calibración del caudal líquido desde los años 2000 hasta 2009 con estadísticos igual a NSE (Nash Sutcliffe)= 0.6, PBIAS (Persistencia de la eficiencia del modelo)=17.2 y RSR (Relación de Desviación de Observaciones)=0.673, la validación del caudal líquido desde los años 2010 hasta 2014 con estadísticos igual a NSE= 0.5, PBIAS= 6.4 y RSR=0.739 encontrándose dentro del rango satisfactorio tanto en la calibración como en la validación, la calibración de caudal sólido (sedimentos) desde los años 2001 hasta 2009 con estadísticos igual a NSE=0.4, PBIAS=-4.23 y RSR=0.788, la validación del caudal sólido desde los años 2010 hasta 2014 con estadísticos igual a NSE= 0.55, PBIAS= 30.17 y RSR=0.671 encontrándose dentro del rango

satisfactorio tanto en la calibración como en la validación. La cantidad de sedimentos que produce la cuenca del río Santa, calculados un promedio de 14.833 M.T/año, la cual se puede comparar con los resultados del ingeniero mencionado en los antecedentes, Morera, 2010 quién estimó 15.1 M.T/año de producción de sedimento dentro de la cuenca del río Santa, la cual la diferencia pueda deberse a diferentes factores como el uso de la herramienta que utilizó la que fue Hydraccess.

Para el objetivo específico 5, “Determinar las zonas potencialmente críticas de la Erosión Hídrica del Suelo y Producción de Sedimentos”:

La provincia donde se estimó menos producción de sedimentos es la Provincia de Bolognesi con 0.159M.T/año, y abarca una superficie de 12645.779, siendo la menor de todas las provincias; entonces, se podría decir que es proporcional la producción de sedimentos según la superficie para la cuenca del río Santa. Como muestra en la tabla 34 y figura 39.

Para el objetivo general, “Determinar cómo influye la Erosión Hídrica del Suelo para la producción de Sedimentos en la Cuenca del Río Santa en el Periodo: 1981 – 2014”:

Se tuvo como hipótesis, la erosión hídrica del suelo influye considerablemente en la producción de sedimentos en relación proporcional de 4 a 3 respectivamente, esto quiere decir que la erosión hídrica influye en 0.333 veces más en la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa y en los resultados ejecutados de la tesis para una relación proporcional de erosión hídrica y producción de sedimentos; para los datos de precipitaciones RAIN4PE, la erosión hídrica influye 0.3040 veces más en la producción de sedimentos, aceptando la hipótesis ya que se encuentra dentro de un rango aceptable.

V. CONCLUSIONES.

Respecto del objetivo general, la Erosión Hídrica del Suelo influye considerablemente en la producción de Sedimentos en la Cuenca del Río Santa para el Periodo: 1981 - 2014. Estimando que la erosión hídrica influye en 0.3040 veces más en la producción de sedimentos.

Respecto del objetivo específico 1, se determinó los parámetros Fisiográficos que nos ayudaran a conocer mejor el comportamiento hidrogeológico de la Cuenca del Río Santa, teniendo como parámetros más resaltantes: Área total de la cuenca igual a 10409.15 km², perímetro igual a 1074.52 km.

Respecto del objetivo específico 2, los resultados de la investigación en la estimación de la media por erosión hídrica con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) fue de: 19.342 M.T/año.

Respecto del objetivo específico 3 y 4, los resultados de la investigación en la estimación de la producción de sedimentos mediante la utilización del modelo Hidrológico semi – distribuido (SWAT) fueron calibrados manualmente desde 2000-2009 y luego validados 2010-2014. Primeramente, se calibró el caudal líquido con el estadístico asociado a la calibración a nivel diario, obteniendo para la cuenca del río Santa, NSE= 0.6, PBIAS=17.2 y RSR=0.673, tomando un rendimiento del modelo dentro del rango satisfactorio. Después se realizó la validación, obteniendo, NSE= 0.5, PBIAS= 6.4 y RSR=0.739 llegando a concluir que el modelo está validado en términos del caudal líquido. Seguidamente se realizó la calibración y validación de sedimentos comprendidos entre los años 2001-2009 y 2010-2014 respectivamente. La calibración fue mensual, obteniendo: NSE=0.4, PBIAS=-4.23 y RSR=0.788, encontrándose en un rango satisfactorio con excepción del parámetro NSE y RSR, pero este fenómeno puede atribuirse al pico observado en el periodo de enero 2001-2002, tratándose de un dato atípico, por ello se aceptó la calibración como válida. Para el periodo de validación del modelo 2010-2014, el modelo mostró un mejor comportamiento obteniendo: NSE=0.55, PBIAS=30.17 y RSR=0.671, se encuentra en un rango satisfactorio, concluyendo que el modelo fue validado. La cantidad de sedimentos por año desde 1981 hasta 2014 que produce la cuenca del río Santa, con un promedio de 14.833 (M.T/año).

Respecto del objetivo específico 5, la provincia más afectada y potencialmente más crítica de la Erosión Hídrica del Suelo y por ende mayor Producción de Sedimentos es la

Provincia de Huaylas con 3.767 M.T/año y abarca una gran superficie dentro de la cuenca del río Santa.

VI. RECOMENDACIONES.

Se recomienda el manejo integral de las cuencas hidrográficas para el control de la erosión hídrica del suelo ejerciendo prácticas de apoyo al suelo como: Mantener la cobertura vegetal, reforestación, zanjas de infiltración, terrazas y buenas prácticas agrícolas.

Se recomienda optimizar la utilización de los sedimentos (limos y arcillas) captadas de los proyectos CHAVIMOCHIC Y CHINECAS en la elaboración de ladrillos cerámicos para la construcción.

Se recomienda utilizar los datos grillados de precipitación RAIN4PE, debido a que es un producto corregido hidrológicamente que fue publicado en el diario Sociedad Meteorológica Americana (AMS) como artículo científico, cabe mencionar que se realizó una comparación de precipitaciones, como muestra en la tabla 15, siendo las precipitaciones RAIN4PE las que se asemejan más a las precipitaciones observadas, también se demostró estadísticamente que estos datos son muy confiables para el uso en esta tesis como se detalla en el anexo E, por la que se concluye que estos datos son adecuados para el uso del modelamiento hidrológico.

Se recomienda construir más puntos de observación hidrosedimentológicas para el control de caudales líquidos y sólidos dentro de la Cuenca del río Santa.

En la modelación con SWAT se recomienda tomar dos años para el periodo de calentamiento de la simulación y así mitigar las condiciones iniciales del modelo, como también se recomienda la calibración manual para poder tener mayor control y criterio en elegir los parámetros que se van utilizar.

VII. REFERENCIAS.

- Agriculture, U. S. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - A guide to Conservation Planning. Washigton D.C., USA.
<https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>
- Andreazzini, M. J., Degiovanni, S., Spalletti, P. D., & Irigoyen, M. (2014). Producción de sedimentos en una cuenca de Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina: Estimación para distintos escenarios. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/34904>
- Angulo-Martínez, M., & Beguería, S. (2013). Análisis de la erosividad de la lluvia: procesos, índices y fronteras de conocimiento. <http://hdl.handle.net/10261/82876>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. doi: 10.13031/2013.42256
- ASTURIAS, R. (1986). Determinación del índice de erosividad de las lluvias para las estaciones pluviográficas de la zona Noroccidental de Guatemala. Tesis Ing. Ag. Guatemala. Universidad de San Carlos. Facultad de Agronomía 48p.
<http://biblioteca.usac.edu.gt/>
- Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos.
https://apiha.org.pe/wp-content/uploads/2021/03/modhidro_1_compressed.pdf
- Cabrejos Valdivia, M. N. (2016). Modelamiento geoespacial en la determinación del riesgo, vulnerabilidad y de la cuantificación de la erosión hídrica en la microcuenca del río Atuén - Amazonas. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1951>
- Ccorahua Lara, G. F. (2021). Estimación de transporte total de sedimentos para el embalse Torata, Región Moquegua.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4654>
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero Gutiérrez, A., Gonzáles, J., Reynero, M., Diez, A., & Bergesio, L. (2012). Erosión Hídrica, Principios y Técnicas de Manejo. Córdoba, Argentina: UNRC.
https://www.researchgate.net/profile/JosCisneros/publication/261950035_Erosion_Hidrica_Principios_y_Tecnicas_de_Manejo/links/0deec5360142db3b03000000/Erosion-Hidrica-Principios-y-Tecnicas-de-Manejo.pdf

- Cruz-Arevalo, B., Gavi-Reyes, F., Martínez-Menes, M. R., & Juárez-Méndez, J. (2021). Uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 12(2), 157-206. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-04>
- Douglas-Mankin, K. R., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2010). Soil and water assessment tool (swat) model: current developments and applications. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 53(5), 1423–1431.
doi: 10.13031/2013.34915
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2018). ¿Qué es ModelBuilder?
Obtenido de ArcGIS Desktop:
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.5/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm>
- Fernández de Villarán. San Juan, R. (2017). Utilización del Programa “SWAT” para la Estimación de la Emisión de Sedimentos en Cuencas (Vol. 12, pp. 21-32). TRIM.
<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8197>
- Fernandez Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., ... & Bronstert, A. (2021). Rain for Peru and Ecuador (RAIN4PE). V. 1.0. <https://doi.org/10.5880/pik.2020.010>
- Flores Villanueva, Á. L. (2015). Aproximación de riesgo por erosión hídrica aplicando un sistema de información geográfica en la subcuenca shambillo, distrito de Padre Abad. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1477>
- García, D. S. C., López, C. F. N., & Arévalo, J. L. D. IAHR AIIH XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Lima, Perú, 28 al 30 de setiembre de 2016.
DOI:10.13140/RG.2.2.35438.61763
- Garro Espinoza, N. D. (2019). Perdida de suelos por acción hídrica en la microcuenca: Inpan-Yacunac, subcuenca Quilcay, periodo: 2005 – 2015, Huaraz, 2.
<http://www.repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/3464>
- Giraldo, R. (2002). Introducción a la Geoestadística. Teoría y Aplicación. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística, Bogotá, DC.
<https://pdfslide.net/documents/libro-de-geoestadistica-r-giraldo.html?page=1>

- Huayan Benites, H. D., & Urtecho Bautista, I. (2020). Estudio del proceso de erosión y sedimentación en un cauce de suelos granular con perfil tipo indio y creager en el canal de procesos morfológicos - UPAO.
<http://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/6643>
- IDER Ingeniería y Desarrollo Rural, S.A. (2005). Mapa de erosión de suelos de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Dirección de Biodiversidad y Participación Ambiental. País Vasco: CEIDA.
https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/mapa_erosion/es_erosion/adjuantos/memoria.pdf
- Kerlinger F. N. (1979). Behavioral Research: A Conceptual Approach. New York: Holt, Rinehart and Winston.
<https://doi.org/10.3102/0013189X008010022>
- Mancebo Quintana, S., Ortega Pérez, E., Valentín Criado, A. C., Martín Ramos, B., & Martín Fernández, L. (2008). LibroSIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental. <https://oa.upm.es/1244/>
- Marengo, S. J., & Pereyra, R. (2019). Automatización de planta de producción de biodiesel. <http://ojs.urbe.edu/index.php/telematique/article/view/2694>
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas, Perú). 1998. Estudio de evaluación ambiental territorial y de planeamiento para reducción o eliminación de la contaminación de origen minero en la cuenca del río Santa. (En línea). Perú. Disponible en www.minem.gob.pe/archivos/dgaam/publicaciones/evats/santa/santa.htm.
- Monsalve Saéñz, Germán (1997). Transporte de sedimentos. En Hidrología en la Ingeniería (pp.343-382).(2° ed.). Colombia:Alfaomega.
<https://dspace.scz.ucb.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/22854/1/11988.pdf>
- Morera, S. B. (2010). Dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa. Magíster Scientiae en Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 98.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1707>

- Morera Julca, S. B. (2014). Erosión y transporte de sedimentos durante eventos El Niño a lo largo de los Andes occidentales.
<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5048>
- Morgan, R., Quinton, J. y Rickson, R. (1994). Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: the EUROSEM approach. *Outlook in Agriculture* 23. <https://doi.org/10.1177/003072709402300103>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(39), 885-900.
 doi: 10.13031/2013.23153
- Nash, J. E., and J. E. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10(3): 282-290.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., & Williams, J. R. (2002). Soil and water assessment tool user's manual version 2000. GSWRL report, 202(02-06).
<https://swat.tamu.edu/media/1294/swatuserman.pdf>
- Núñez, M. A. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Virtual*, 5(1).
<https://cebem.org/revistaredesma/vol11/articulo1.php?id=c1>
- Núñez Prado, K. C. (2021). Modelo hidráulico de transportes de sedimentos e influencia de los parámetros fluviales, en la confluencia de los ríos Tarma y Tulumayo.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7908>
- Ñaupas Paitán, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Vilela, J. J., & Romero Delgado, H. E. (2018). Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Quinta edi, Vol. 53, Issue 9). Ediciones de la U. <https://corladancash.com/wp-content/uploads/2020/01/Metodologia-de-la-inv-cuanti-y-cuali-Humberto-Naupas-Paitan.pdf>
- Lozano, M. P., & Lozano, A. C. (2015). Pensamiento crítico y rendimiento académico de estudiantes de la Facultad de Educación de la Universidad Nacional del Centro del Perú. *Horizonte de la Ciencia*, 5(8), 105-110.

- <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5420484>
- Ochoa Cueva, P. A. (2015). Manejo y conservación del suelo y agua en los Andes del Sur de Ecuador. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/11961>
- Osti, C. L., López, S. B., Sánchez, F. M., & Domínguez, M. C. (2007). Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí (No. 333.73097244 R5).
<https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre31.pdf>
- Parveen, R., & Kumar, U. (2012). Integrated approach of universal soil loss equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil loss risk assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand. DOI:10.4236/jgis.2012.46061
- Portuguez, M. 2015. Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la Cuenca del río Siguas utilizando Geoinformatica. *Anales Científicos*, 76(2), 324.
<https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>
- Quintero, A. F. C., Salazar, L. A. L., & Melo, O. R. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 8(1), 17-26.
<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1828>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. y Porter, J.P. 1991. Revised Universal Soil Loss Equation. *J. of Soil and Water Conservation* 46: 30-33.
<https://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/pdffiles/775.pdf>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water. *Agriculture handbook*, 703.
https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/64080530/RUSLE/AH_703.pdf
- Rocha, A. 2006. La Problemática de la Sedimentación de Embalses en el Aprovechamiento de los ríos Peruanos, Aplicada al Embalse de Poechos. I Congreso Internacional de Hidráulica, Hidrología, Saneamiento y Medio Ambiente. Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG). Li. <http://www.imefen.uni.edu.pe/>
- Rodríguez, J. G., & Suárez, M. G. (2008). Determinación del factor topográfico LS en los modelos Rusle y Rusle3d mediante el sig sextante. *Cuadernos del CURIHAM*, (14), 67-74. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7308558>

- Rouse, J. J. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Technical Reports Server, 317. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- RStudio (2020). Sobre RStudio Obtenido de: <https://rstudio.com/about/>
- Salas Quispe, M. K. (2019). Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo Swat. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16823>
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Menes, M., Rubio-Granados, E., & Ríos-Berber, J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(5), 141-156. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10>
- Sánchez Tiznado, P. C. (2009). Caracterización de los sedimentos para mejorar el criterio de diseño de los sedimentadores en el ámbito del Proyecto Especial Chavimochic. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9881>
- Melgarejo Montano, B. J. C., & Roldan Olivares, L. A. (2019). Influencia de la adición del cloruro de sodio como estabilizante de los sedimentos extraídos del Proyecto Especial CHINECAS, con fines de pavimentación, Nuevo Chimbote 2019. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/46781>
- Ministerio de Economía y Finanzas – MEF (2010). Declaración de Viabilidad del Proyecto "Chavimochic Tercera Etapa - Primera Fase" con código SNIP 90449. https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/instrumentos_metod/agricultura/Informe_de_Viabilidad-ChavimochicABR2010.pdf
- Sendra, J. B. (1994). Sistema de información geográfica. *Estudios Geográficos*, 55(214), 201. <https://www.proquest.com/openview/bfdbecc241534d13b9de322d6f6b7321/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1818083>
- Shakti, P. C., Shrestha, N. K., & Gurung, P. (2010). Step wise multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models using WETSPRO. *Journal of Hydrology and Meteorology*, 7(1), 18-29. <https://doi.org/10.3126/jhm.v7i1.5613>
- Subramanya. (2008). *Engineering Hydrology* (third ed.). Kanpur, India: McGraw - Hill. https://nahusenai.files.wordpress.com/2015/05/b_hydrology-subramany.pdf

- Tamayo García, G. G. (2017). Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos estimados con el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados (Master's thesis, Quito, 2017.). <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17067>
- Toryila, tiza. (2016). a review of soil erodibility; Case Study of UGBOJU Settlement of OTURKPO Local Government Area of Benue State Nigeria. *EPR International Journal of Multidisciplinary Research.. 2*.
<https://eprajournals.com/IJMR/article/166/abstract>
- UNESCO (2010). Atlas de zonas áridas de América Latina y El Caribe.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000216333>
- USDA. (1978). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo.
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051284.pdf
- Valladares Martel, E. A. (2017). Respuesta hidrológica de la cuenca del río Santa en condiciones de cambio climático.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3367>
- Valverde-Gamboa, E. D. (2018). Modelación hidrológica para cuantificar la producción de agua y sedimento actual y futuro a partir de cambios de cobertura forestal, sector Prusia, Parque Nacional Volacán Irazú.
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/10335>
- Vásquez V., A., Mejía M., A., Faustino M., J., Terán A., R., Vásquez R., I., Díaz R., J., . . . Alcántara R., J. (2016). Manejo y Gestión de Cuenca Hidrográficas. Lima, Perú: UNALM. 2016; 646 p.
<https://www.fondoeditorialunalm.com/wp-content/uploads/2020/09/CUENCAS-HIDROGRAFICAS.pdf>
- Yali Samaniego, R. M. (2018). Modelo de erosión Rusle y coeficiente de aporte de sedimentos (SDR) para la estimación del volumen muerto de reservorios, caso de estudio: Reservorio Gallito Ciego.
<http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/10078>

VIII. ANEXOS.

Anexo A. Datos utilizados para estimar la Erosión Hídrica y Producción de Sedimentos de la cuenca del río Santa.

Tabla A1

Datos de Índice Modificado de Fourier y Factor de Erosividad - Procesamiento con la ecuación RUSLE.

Nombre	Precipitación	IMF (mm/año)	R(Erosividad) ((MJ.mm)/(ha.hr.año))
	RAIN4PE (mm/año)		
Estación 01	1025.043	128.544	7195.806
Estación 02	919.827	114.463	5649.281
Estación 03	978.177	128.321	7169.909
Estación 04	792.179	108.046	5007.229
Estación 05	883.442	112.441	5442.727
Estación 06	858.845	114.679	5671.536
Estación 07	827.461	112.621	5460.974
Estación 08	871.874	115.195	5724.997
Estación 09	761.464	104.569	4675.770
Estación 10	881.922	114.200	5622.175
Estación 11	773.876	104.635	4681.902
Estación 12	596.276	85.041	3028.252
Estación 13	922.443	115.532	5760.091
Estación 14	829.003	110.055	5203.955
Estación 15	482.323	70.794	2055.917
Estación 16	706.401	95.583	3872.488
Estación 17	529.205	75.840	2378.129
Estación 18	961.969	122.467	6505.157
Estación 19	659.959	90.219	3429.648
Estación 20	759.226	100.900	4338.469
Estación 21	1007.869	129.549	7313.475
Estación 22	822.075	105.113	4726.850

Estación 23	755.821	100.857	4334.607
Estación 24	900.208	116.201	5829.909
Estación 25	917.057	122.108	6465.427
Estación 26	941.827	116.935	5907.074
Estación 27	826.538	105.389	4752.819
Estación 28	838.689	106.332	4842.388
Estación 29	637.251	92.133	3584.491
Estación 30	986.562	123.033	6568.041
Estación 31	767.012	113.606	5561.248
Promedio	820.059	108.239	5121.314

Nota. En la tabla se muestra los valores determinados del índice modificado de Fourier con un promedio de 108.239 mm/año y según la tabla 2 está dentro de una agresividad climática moderada y el factor de erosividad con un promedio de 5121.314 (MJ.mm)/(ha.hr.año) y según la tabla 3 se encuentra dentro de la clase alta.

Tabla A2

Registro de precipitaciones mensuales promedio de las 31 estaciones virtuales dentro de la cuenca del río Santa – RAIN4PE - Procesamiento con la ecuación RUSLE y Procesamiento SWAT.

AÑO	PRECIPITACIÓN PROMEDIO DIARIA DE LAS 31 ESTACIONES VIRTUALES - RAIN4PE(mm/mes)											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1981	103.51	186.20	169.72	46.15	13.99	5.53	1.13	11.82	12.72	77.33	90.17	107.72
1982	97.70	111.12	94.53	75.73	26.77	3.84	4.15	4.02	18.80	126.93	112.40	121.86
1983	139.39	85.36	176.25	151.66	36.41	16.64	1.77	2.89	21.12	67.23	70.09	152.87
1984	101.64	250.12	205.70	81.20	54.98	15.72	5.55	2.98	22.48	87.46	74.11	58.46
1985	56.23	84.45	107.23	58.97	28.39	2.47	1.69	5.36	53.18	37.50	29.98	85.59
1986	145.10	99.86	131.48	112.48	20.60	2.77	2.35	9.53	25.14	31.28	62.16	105.68
1987	167.27	137.33	127.01	72.23	22.83	1.57	4.93	7.17	26.93	39.76	68.22	100.00
1988	159.54	144.84	89.95	105.62	34.57	5.51	1.67	4.81	29.44	55.38	56.43	74.72
1989	130.75	163.99	160.46	81.74	35.66	8.63	2.99	12.70	33.24	90.82	36.05	21.49
1990	84.79	74.86	83.67	59.10	23.72	11.31	2.92	1.41	20.26	68.29	81.25	47.24
1991	46.74	59.02	130.39	66.25	35.33	2.13	1.27	1.37	8.42	62.95	54.94	70.08
1992	48.13	52.59	104.75	77.68	28.50	8.92	3.84	6.28	17.92	44.53	25.46	30.11
1993	161.55	230.12	315.08	179.63	40.28	21.04	6.32	5.74	50.89	108.97	117.61	205.45
1994	160.14	188.02	215.66	138.33	36.21	10.42	1.09	2.08	14.59	33.91	51.59	87.30
1995	80.39	90.39	103.18	80.45	27.54	5.93	3.29	2.80	12.82	52.98	74.18	101.76
1996	130.68	170.08	185.22	93.94	21.39	5.60	1.06	3.71	15.56	81.87	48.85	46.58
1997	74.11	139.96	66.84	70.85	24.13	8.74	2.23	5.49	30.86	63.36	94.37	197.82
1998	220.68	217.46	256.12	123.05	16.97	9.82	1.13	7.15	26.44	99.33	52.33	69.76
1999	140.61	281.85	132.16	86.32	63.84	22.35	7.85	6.14	73.25	42.66	58.26	99.34
2000	82.52	163.37	161.25	98.04	52.44	6.84	2.15	20.19	28.30	28.77	38.56	143.00
2001	219.84	130.59	248.79	64.97	31.71	7.52	5.75	0.56	59.84	65.74	107.68	83.43
2002	61.03	119.18	185.25	89.12	13.85	5.20	5.25	0.72	17.01	104.93	139.22	88.64
2003	88.44	100.39	122.30	75.62	22.96	10.52	2.72	2.20	16.28	40.94	42.43	117.05
2004	51.28	107.71	91.56	58.23	25.50	4.78	11.73	1.70	45.86	94.29	103.62	98.43
2005	81.37	88.58	180.69	62.00	8.29	1.25	0.93	7.74	11.88	57.91	23.20	99.48
2006	105.53	126.03	237.54	109.76	11.08	20.59	2.34	7.26	24.70	50.40	79.61	136.27
2007	136.74	65.14	219.81	130.60	35.72	2.73	6.44	5.45	15.93	92.24	76.85	71.35
2008	147.97	142.78	161.41	103.06	19.66	12.63	4.03	7.98	26.10	97.62	61.72	44.57
2009	195.31	165.99	206.09	121.53	33.75	12.27	9.19	8.88	10.46	124.65	97.32	114.12
2010	91.34	110.07	138.69	80.04	39.38	6.18	4.03	3.14	24.75	33.08	66.34	121.25
2011	106.49	81.49	127.21	140.45	7.36	2.39	8.11	1.80	30.56	25.96	79.74	146.22
2012	145.89	160.53	175.25	139.32	40.92	6.64	0.71	3.59	22.48	73.54	103.39	107.97
2013	87.08	156.23	229.38	74.53	34.02	7.35	3.43	13.63	16.74	98.61	50.43	99.93
2014	109.82	127.95	181.51	82.99	57.98	3.81	3.95	3.86	30.80	52.00	52.75	122.76

Nota. En la tabla se muestra el registro de precipitaciones promedio dentro de la cuenca del río Santa de las 31 estaciones virtuales desde los años 1981 hasta el 2014.

Tabla A3

Registro de temperaturas máximas promedio diarias de las 31 estaciones virtuales dentro de la cuenca del río Santa – PISCO – procesamiento SWAT.

AÑO	TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO DIARIA DE LAS 31 ESTACIONES VIRTUALES - PISCO (°C)											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1981	19.5	18.8	18.6	19.7	20.3	20.0	19.9	20.2	21.4	20.4	20.0	19.7
1982	19.4	19.0	19.1	19.7	20.8	20.8	21.0	21.4	21.2	19.9	20.5	20.1
1983	21.2	21.1	20.5	21.1	22.3	21.5	21.9	21.7	21.0	20.4	20.7	18.9
1984	18.8	18.2	18.4	19.0	20.3	19.7	19.6	20.5	20.5	20.6	20.0	20.1
1985	18.7	18.9	19.0	19.6	20.8	20.9	20.0	20.7	21.1	20.8	20.8	19.2
1986	19.5	18.5	18.6	20.0	21.1	20.8	20.4	20.7	21.5	21.1	21.2	20.5
1987	20.3	21.1	20.2	20.7	21.3	21.9	21.8	21.9	22.2	21.8	20.9	20.5
1988	19.9	19.9	19.4	19.8	21.2	20.8	20.8	21.5	21.3	21.0	20.2	19.2
1989	18.8	18.1	17.7	19.1	20.5	19.8	20.2	20.9	20.8	20.2	21.3	21.1
1990	20.1	19.9	20.1	20.4	21.2	20.7	20.9	21.3	21.6	20.3	20.4	20.2
1991	20.0	20.1	18.9	20.3	21.6	21.9	21.4	21.2	21.6	21.0	20.7	20.5
1992	20.4	20.0	20.3	20.6	21.9	20.9	20.6	21.1	20.9	21.0	20.7	20.7
1993	19.7	19.4	18.6	19.7	20.9	21.3	21.0	20.9	20.9	20.6	19.8	19.1
1994	19.0	18.9	18.9	19.7	21.2	20.7	20.8	21.2	21.9	21.3	20.5	20.1
1995	20.6	19.6	19.0	20.5	21.5	21.2	21.1	21.5	21.5	21.0	20.5	20.2
1996	18.7	18.9	18.5	19.4	20.9	20.6	20.6	20.7	21.8	20.5	21.0	20.4
1997	19.5	19.2	20.1	20.3	22.0	21.4	22.1	21.9	22.0	21.7	20.9	20.3
1998	20.8	20.6	20.1	21.3	22.1	21.1	21.4	21.1	21.6	21.1	21.0	20.3
1999	19.2	17.8	18.2	19.5	20.0	20.0	19.8	20.8	20.3	20.5	20.5	18.8
2000	18.6	17.8	18.0	19.2	20.5	20.0	19.9	20.9	20.5	21.6	21.3	19.5
2001	18.2	18.9	18.2	20.0	20.4	20.2	20.4	21.2	20.5	20.9	19.6	20.3
2002	20.4	19.2	19.1	19.4	21.3	20.7	20.3	21.2	21.4	20.5	20.0	19.9
2003	20.3	20.3	19.1	20.1	21.2	20.9	20.9	21.1	21.3	21.6	21.6	20.0
2004	21.0	19.7	20.1	20.7	21.7	20.9	20.3	21.1	20.9	20.5	20.7	20.4
2005	20.7	20.4	19.2	21.0	21.8	21.6	21.6	21.7	21.6	20.3	21.4	19.9
2006	20.3	19.5	18.9	19.8	21.5	20.7	21.4	21.4	21.5	21.3	20.8	19.9
2007	20.5	20.0	19.0	19.7	20.9	21.0	20.6	20.5	20.9	20.3	20.2	20.2
2008	19.0	18.9	18.2	19.1	20.4	20.4	20.5	20.8	21.2	20.0	20.6	20.3
2009	19.2	18.6	18.7	19.6	20.6	20.7	20.7	21.5	22.0	21.0	20.6	19.7
2010	20.6	20.9	20.3	21.3	21.8	21.3	21.2	21.6	21.3	21.0	20.5	19.0
2011	19.2	18.8	18.4	19.5	21.2	21.3	20.7	21.2	20.9	20.5	20.7	19.5
2012	19.5	18.9	19.7	19.8	21.3	21.4	21.7	21.5	21.8	20.5	20.9	20.2
2013	21.1	19.8	19.3	20.8	20.9	20.7	20.5	20.9	22.0	20.4	21.1	20.4
2014	20.3	19.9	18.9	20.6	20.9	21.9	21.5	21.2	21.2	21.1	20.9	20.2

Nota. En la tabla se muestra el registro de temperaturas máximas promedio diarias de las 31 estaciones virtuales dentro de la cuenca del río Santa de las 31 estaciones virtuales desde los años 1981 hasta el 2014. Fuente: SENAMHI.

Tabla A4

Registro de temperaturas mínima promedio diarias de las 31 estaciones virtuales dentro de la cuenca del río Santa – PISCO – procesamiento SWAT.

AÑO	TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO DIARIA DE LAS 31 ESTACIONES VIRTUALES - PISCO (°C)											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1981	7.4	8.8	8.1	7.6	6.1	4.8	4.3	4.8	5.7	7.1	7.1	8.2
1982	7.5	8.2	8.2	7.3	5.9	5.1	4.3	5.2	6.5	7.3	8.1	8.7
1983	9.5	9.0	9.5	9.1	8.0	6.1	5.4	6.1	6.5	6.7	6.9	7.6
1984	6.8	8.4	8.3	7.7	6.1	5.6	3.8	4.4	5.1	6.9	5.9	7.4
1985	7.4	7.7	8.0	7.4	5.8	4.4	3.2	4.6	6.1	5.5	5.4	7.6
1986	8.1	7.8	7.7	8.0	5.3	4.0	3.5	5.2	5.9	5.7	6.3	7.8
1987	8.9	8.9	7.8	7.9	5.7	4.5	4.6	5.0	6.9	6.6	7.8	8.3
1988	8.7	8.8	8.3	8.2	6.7	3.9	3.5	4.0	6.2	6.5	7.2	7.0
1989	7.9	8.1	7.8	7.5	5.3	4.8	3.2	4.7	5.9	7.1	5.4	5.4
1990	8.1	7.4	7.9	7.7	6.5	6.1	4.3	4.7	6.0	7.4	8.2	7.5
1991	8.2	8.2	8.8	7.5	6.6	5.0	3.8	4.2	5.5	6.8	6.5	7.3
1992	8.0	8.0	8.7	8.4	6.9	5.7	4.0	4.9	6.0	6.7	6.7	6.9
1993	7.7	8.0	8.0	8.3	6.9	4.9	4.6	4.5	6.1	7.3	7.3	8.8
1994	8.6	8.7	8.1	8.0	6.4	4.5	4.1	4.4	6.5	6.2	6.9	8.2
1995	8.0	8.1	8.3	7.4	6.1	5.1	4.8	5.0	6.2	6.8	7.3	7.0
1996	7.4	8.0	8.4	7.7	6.4	4.6	3.9	5.0	6.3	6.8	5.5	7.4
1997	7.1	8.2	7.1	7.2	6.7	4.7	5.3	6.3	7.3	7.8	8.5	9.7
1998	10.0	10.2	10.1	9.5	7.0	5.9	4.6	5.6	5.9	7.6	6.5	6.7
1999	7.6	8.5	8.1	8.0	6.6	5.3	4.1	4.1	6.3	6.4	6.3	7.6
2000	7.1	7.9	8.1	7.9	6.8	5.7	4.5	5.3	6.3	6.6	5.0	7.7
2001	8.2	8.5	8.8	7.5	6.9	5.1	5.0	4.8	6.7	7.7	7.8	8.1
2002	7.6	9.0	9.0	8.3	7.0	5.2	5.3	5.1	6.4	7.8	7.9	8.7
2003	8.7	8.5	8.3	8.2	7.2	5.2	4.5	5.2	5.9	6.8	6.9	8.0
2004	6.9	8.6	8.6	7.5	6.6	5.0	5.4	5.2	6.6	7.7	7.7	8.4
2005	7.6	9.2	9.0	8.4	5.8	4.9	4.2	4.6	6.4	7.2	6.2	7.7
2006	7.9	9.1	8.9	7.9	5.5	5.7	4.6	6.1	6.5	6.9	7.7	8.6
2007	9.3	8.1	8.9	8.3	6.9	4.8	5.1	5.1	6.0	6.7	7.6	6.9
2008	8.4	8.1	7.7	7.5	5.8	5.1	4.3	5.4	6.4	7.6	7.6	7.0
2009	8.4	8.7	8.5	8.3	6.7	5.5	5.7	5.7	6.7	7.6	7.9	8.8
2010	9.0	9.5	9.6	8.8	7.4	5.7	4.8	4.8	6.1	6.2	6.2	7.6
2011	7.7	7.8	7.7	7.9	6.1	5.4	4.9	5.2	6.6	6.2	7.6	8.1
2012	8.3	8.0	8.5	8.2	6.6	5.1	4.5	4.8	6.3	7.5	8.1	8.0
2013	8.8	8.6	9.2	7.7	7.3	6.0	4.9	5.4	5.9	7.9	6.8	8.1
2014	8.4	8.5	8.3	7.8	7.3	5.8	5.6	5.2	6.9	7.4	7.2	8.3

Nota. En la tabla se muestra el registro de temperaturas mínimas promedio diarias de las 31 estaciones virtuales dentro de la cuenca del río Santa de las 31 estaciones virtuales desde los años 1981 hasta el 2014. Fuente: SENAMHI.

Anexo B. Datos de registros Históricos Observados de caudal líquido y caudal sólido.

Tabla B1

Registro histórico de sedimentos (M.T/mes) – Estación Hidrosedimentológica Condorcerro.

AÑO	REGISTRO HISTÓRICO DE SIDEMENTOS OBSERVADOS (millones.ton/mes)											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2001	8.576	3.695	17.787	2.440	0.219	0.059	0.055	0.038	0.053	0.079	1.284	0.700
2002	0.266	1.334	8.317	2.755	0.058	0.050	0.030	0.032	0.025	0.298	1.213	1.239
2003	0.465	2.376	2.330	0.981	0.079	0.035	0.023	0.028	0.027	0.040	0.038	0.397
2004	0.120	0.632	0.510	0.229	0.049	0.028	0.026	0.024	0.030	0.197	0.838	0.529
2005	0.381	0.761	2.356	0.535	0.039	0.016	0.013	0.013	0.028	0.057	0.028	0.364
2006	0.447	2.105	6.466	6.419	0.127	0.029	0.011	0.014	0.018	0.053	0.106	0.427
2007	0.919	0.634	2.820	2.994	0.183	0.040	0.021	0.017	0.016	0.092	0.174	0.180
2008	1.451	1.648	1.646	1.409	0.251	0.036	0.021	0.018	0.021	0.248	0.249	0.091
2009	1.750	3.795	5.771	4.671	0.165	0.034	0.022	0.018	0.022	0.265	0.595	1.583
2010	0.497	1.206	1.173	1.704	0.457	0.029	0.031	0.029	0.033	0.056	0.142	0.793
2011	0.840	0.677	0.892	2.847	0.108	0.023	0.023	0.024	0.019	0.031	0.098	0.906
2012	0.975	3.850	1.767	2.263	0.209	0.029	0.015	0.015	0.016	0.064	0.332	0.340
2013	0.279	1.117	7.787	0.822	0.251	0.039	0.025	0.036	0.026	0.247	0.081	0.707
2014	0.322	1.924	4.233	0.452	0.417	0.016	0.017	0.016	0.019	0.037	0.053	0.373

Nota. En la tabla se muestra el registro histórico de sedimentos observados desde los años 2001 hasta el 2014, las cuales se utilizaron para calibrar y validar el modelamiento con SWAT. Fuente: Estación Hidrosedimentológica Condorcerro.

Tabla B2

Registro histórico de caudales promedio (m³/día) – Estación Hidrosedimentológica Condorcerro.

AÑO	REGISTRO HISTÓRICO DE CAUDALES PROMEDIO (m ³ /día)											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2000	264.058	291.921	343.145	241.387	148.529	60.873	44.752	44.974	45.377	52.877	59.267	91.326
2001	375.261	313.854	528.542	231.552	79.324	57.232	50.855	46.887	50.262	57.677	175.580	180.816
2002	152.855	200.811	401.252	288.158	90.268	54.971	48.400	49.023	47.527	75.065	164.380	184.240
2003	164.926	226.296	264.142	193.250	78.568	52.710	45.371	43.042	40.680	50.423	49.180	128.152
2004	94.500	167.114	132.706	117.060	64.281	45.043	37.242	36.484	33.863	78.426	147.458	166.974
2005	144.245	163.364	286.268	179.920	78.415	54.986	47.114	44.971	47.298	61.453	65.660	120.628
2006	123.417	218.129	402.925	372.485	97.584	61.465	47.554	43.866	46.810	58.289	88.276	180.034
2007	217.461	196.646	322.721	327.748	115.286	59.974	46.611	44.439	40.162	63.520	106.789	90.751
2008	228.378	250.362	282.379	246.955	103.313	61.125	47.908	39.361	39.773	81.586	114.144	102.216
2009	247.913	412.795	491.735	442.299	129.617	68.300	56.311	51.216	51.837	95.197	148.158	276.763
2010	232.272	267.306	265.915	226.783	124.029	60.112	48.157	48.971	45.882	57.691	91.028	169.368
2011	211.015	212.872	205.933	278.802	97.445	53.484	41.159	43.868	40.094	44.690	83.874	184.495
2012	230.724	317.712	252.769	301.905	137.866	65.298	47.791	45.005	44.924	68.174	155.959	156.851
2013	187.727	261.750	488.152	233.520	337.940	53.564	45.950	45.082	46.660	99.167	105.818	219.102
2014	211.508	280.466	461.154	204.081	183.687	68.794	48.686	45.082	49.438	59.771	84.126	157.680

Nota. En la tabla se muestra el registro histórico de caudales promedio desde los años 2001 hasta el 2014, las cuales se utilizaron para calibrar y validar el modelamiento con SWAT. Fuente: Estación Hidrosedimentológica Condorcerro.

Anexo C. Análisis estadísticos de los datos Observados

Tabla C1

Análisis de consistencia, prueba T de Student de las precipitaciones – Estación Yungay.

Prueba de T de STUDENT - Yungay		
Prueba T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	73.08	66.32
Desviación Estándar	89.48	73.56
Varianza	8006.18	5410.4
Número de Datos	66	63
Varianza Agrupada	6697.83	
Grados de Libertad	127	
T calculado con (2 colas)	0.46	
Texcel	-	
Tatbla	1.96	
Resultado	Consistente	

Tabla C2

Análisis de consistencia, prueba F de FISHER de las precipitaciones – Estación Yungay.

Prueba de F de FISHER - Yungay		
Prueba F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	73.08	66.32
Desviación Estándar	89.48	73.56
Varianza	8006.18	5410.4
Observaciones	66	63
Varianza Agrupada	6697.83	
Diferencia Hipotética de las Medias	0	
Grados de Libertad	65	62
F calculado	1.48	
F tabla	1.52	

Resultado	Consistente
-----------	-------------

Tabla C3

Análisis de consistencia, prueba T de Student de las precipitaciones – Estación Santiago Antúnez de Mayolo.

Prueba de T de STUDENT – Santiago Antúnez de Mayolo		
Prueba T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	71.61	70.16
Desviación Estándar	67.75	63.44
Varianza	4590.19	4024.83
Número de Datos	66	57
Varianza Agrupada	4293.58	
Grados de Libertad	121	
T calculado con (2 colas)	0.46	
Texcel	-	
Tatbla	1.96	
Resultado	Consistente	

Tabla C4

Análisis de consistencia, prueba F de FISHER de las precipitaciones – Estación Santiago Antúnez de Mayolo.

Prueba de F de FISHER – Santiago Antúnez de Mayolo		
Prueba F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	71.61	70.16
Desviación Estándar	67.75	63.44
Varianza	4590.19	4024.83
Observaciones	66	57
Varianza Agrupada	4293.58	
Diferencia Hipotética de las Medias	0	
Grados de Libertad	65	56
F calculado	1.14	

F tabla	1.54
Resultado	Consistente

Tabla C5

Análisis de consistencia, prueba T de Student de las precipitaciones – Estación Cachicadan.

Prueba de T de STUDENT – Cachicadan		
Prueba T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	85.88	84.42
Desviación Estándar	86.43	86.87
Varianza	7469.83	7546.65
Número de Datos	66	66
Varianza Agrupada	7451.46	
Grados de Libertad	130	
T calculado con (2 colas)	0.10	
Texcel	-	
Tatbla	1.96	
Resultado	Consistente	

Tabla C6

Análisis de consistencia, prueba F de FISHER de las precipitaciones – Estación Cachicadan.

Prueba de F de FISHER – Cachicadan		
Prueba F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	85.88	84.42
Desviación Estándar	86.43	86.87
Varianza	7469.83	7546.65
Observaciones	66	66
Varianza Agrupada	7451.46	
Diferencia Hipotética de las Medias	0	
Grados de Libertad	65	65
F calculado	1.01	
	120	

F tabla	1.51
Resultado	Consistente

Tabla C7

Análisis de consistencia, prueba T de Student de las precipitaciones – Estación Cabana.

Prueba de T de STUDENT – Cabana		
Prueba T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	74	77.69
Desviación Estándar	75.92	70.50
Varianza	5764.41	4970.22
Número de Datos	66	63
Varianza Agrupada	5338.13	
Grados de Libertad	127	
T calculado con (2 colas)	0.28	
Texcel	-	
Tatbla	1.96	
Resultado	Consistente	

Tabla C8

Análisis de consistencia, prueba F de FISHER de las precipitaciones – Estación Cabana.

Prueba de F de FISHER – Cabana		
Prueba F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	74	77.69
Desviación Estándar	75.92	70.50
Varianza	5764.41	4970.22
Observaciones	66	63
Varianza Agrupada	5338.13	
Diferencia Hipotética de las Medias	0	
Grados de Libertad	65	62
F calculado	1.16	
F tabla	1.52	

Resultado

Consistente

Figura C1

Histograma de los caudales anuales en m³/Seg. de la estación Condorcerro.

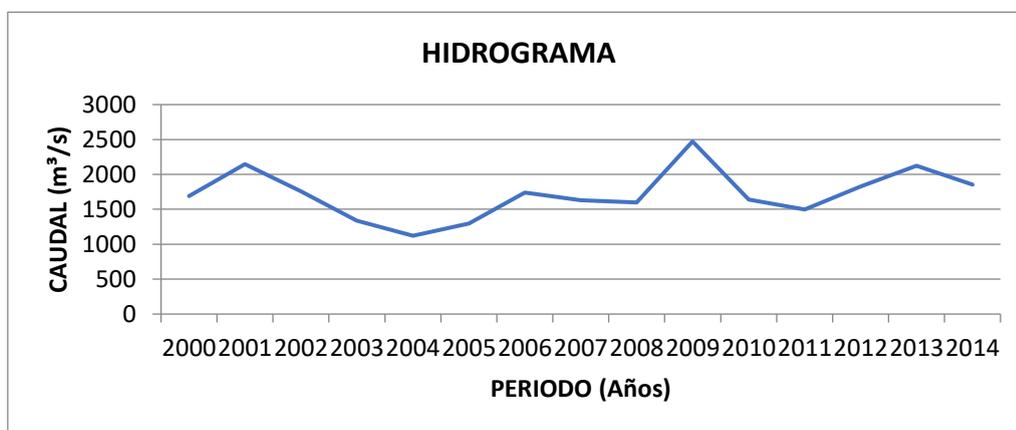


Tabla C9

Análisis estadístico de Saltos para los caudales observados.

Análisis estadísticos de	
Saltos	
Sp =	355.529175
Sd =	207.584316
Tc =	-0.7242828
GL =	13
Tt =	2.1604
Decisión =	Ok
Fc =	2.19434359
GLN =	10
GLD =	3
Ft =	8.785
Decisión =	Ok

Nota. En la tabla se muestra que mediante la prueba estadístico de T- student los caudales son consistentes en la media y mediante la prueba de F de Fisher los caudales con consistentes en la varianza.

Tabla C10

Análisis estadístico de Tendencia para los caudales observados.

Análisis Estadístico de Tendencia en la Media	
(Anual)	
Promedio Año (t)	2007
Promedio Caudal (m ³ /s) (Tm)	1715.147
Promedio (t . Tm)	3442683.709
S (Desv -Año)	4.472
S (Desv. Caudal)	349.44
R	0.24601852
Bm	19.22321463
Am	-36865.84515
Tm (Ec.) =	-36865.845 + 19.223.t
Tc =	0.915159707
GL =	13
Tt =	1.7709
Decisión =	Ok

Nota. En la tabla se puede concluir que la muestra no tiene tendencia en la media por la cual no se corrige, se utilizó la prueba estadística de T- student.

Anexo D. Datos de precipitación mensual utilizadas de los datos grillados PISCO, RAIN4PE y datos observados.

Tabla D1

Datos de precipitación en mm de los datos grillados PISCO, RAIN4PE y datos de precipitaciones de la estación Yungay.

Mes/Año	2005 - RAIN4PE	2005 - PISCO	2005 - OBSERVADOS	2006 - RAIN4PE	2006 - PISCO	2006 - OBSERVADOS	2007 - RAIN4PE	2007 - PISCO	2007 - OBSERVADOS	2008 - RAIN4PE
Enero	82.792	45.270	39.500	100.762	45.917	60.400	114.402	42.687	78.300	128.628
Febrero	79.550	18.106	93.900	106.211	29.347	157.700	58.778	14.443	27.300	121.224
Marzo	188.282	132.199	179.500	224.690	119.846	291.000	201.012	118.974	474.200	166.787
Abril	50.203	24.427	64.700	108.934	40.800	188.200	124.770	43.628	182.900	94.675
Mayo	3.456	2.316	2.000	7.070	4.403	0.000	29.411	6.943	38.400	10.245
Junio	0.463	0.000	0.000	12.672	0.199	3.400	1.271	0.000	0.000	6.823
Julio	0.286	0.000	0.000	1.233	0.000	0.000	3.552	0.000	0.000	2.197
Agosto	8.411	0.765	0.000	5.837	0.895	2.600	3.413	1.139	3.100	2.653
Setiembre	14.024	2.176	13.800	17.798	7.557	4.300	18.560	5.284	5.500	23.098
Octubre	47.859	33.502	22.000	54.160	35.426	13.600	80.202	42.539	75.300	99.970
Noviembre	21.552	13.377	0.000	74.185	28.618	59.900	91.740	21.969	78.800	62.881
Diciembre	107.083	37.176	113.000	139.290	46.253	240.000	65.001	36.065	46.200	49.701
Total	603.959	309.315	528.400	852.841	359.261	1021.100	792.113	333.673	1010.000	768.883

2008 - PISCO	2008 - OBSERVADOS	2009 - RAIN4PE	2009 - PISCO	2009 - OBSERVADOS	2010 - RAIN4PE	2010 - PISCO	2010 - OBSERVADOS	2011 - RAIN4PE	2011 - PISCO	2011 - OBSERVADOS
50.177	119.900	178.688	128.063	212.900	104.554	41.450	63.700	114.559	59.718	133.600
28.466	119.800	164.484	27.356	131.400	83.825	35.464	120.400	87.135	17.556	27.900
102.112	235.200	182.628	155.774	207.500	148.374	116.771	137.800	125.755	87.884	183.600
35.975	98.100	124.419	47.034	107.400	91.844	28.904	74.600	151.746	38.457	236.400
3.346	9.200	26.673	6.495	12.800	36.518	7.857	26.100	4.759	1.860	0.000
0.203	15.400	7.351	0.817	0.000	2.913	0.155	4.200	0.722	0.000	0.000
0.000	0.000	3.048	0.000	0.000	0.532	0.000	0.000	2.519	0.058	0.000
1.526	0.000	4.207	1.820	1.800	2.276	0.666	0.000	0.945	0.190	0.000
7.817	1.100	9.587	2.106	0.000	20.091	6.155	4.200	21.804	6.476	12.100
40.531	119.400	133.946	51.803	172.500	26.615	37.422	23.500	16.005	24.699	3.600
22.165	71.200	108.617	28.989	110.200	57.238	35.761	159.300	78.726	30.225	58.000
24.508	19.400	140.383	42.071	71.900	133.739	52.608	191.100	142.518	50.949	281.700
316.828	808.700	1084.031	492.326	1028.400	708.518	363.212	804.900	747.193	318.071	936.900

2012 - RAIN4PE	2012 - PISCO	2012 - OBSERVADOS	2013 - RAIN4PE	2013 - PISCO	2013 - OBSERVADOS	2014 - RAIN4PE	2014 - PISCO	2014 - OBSERVADOS
143.290	44.544	91.200	82.365	29.895	24.400	106.186	43.709	132.800
139.233	33.324	136.600	176.844	46.422	135.800	110.038	29.426	150.400
180.150	100.755	146.000	202.158	260.274	213.100	202.578	146.499	181.100
154.024	54.777	108.100	61.412	24.417	48.600	80.105	27.912	55.100
39.471	6.420	20.400	28.941	10.063	24.300	48.079	13.197	45.900
3.072	0.391	0.000	1.835	0.123	0.000	1.465	0.000	10.400
0.411	0.000	0.000	0.753	0.000	0.000	1.284	0.000	0.000
1.810	0.417	0.000	6.228	3.267	2.800	5.118	0.710	0.000
16.062	6.548	26.900	12.334	4.679	5.200	18.535	8.175	27.100

61.834	33.942	60.500	93.957	44.523	85.400	56.001	34.420	22.000
95.503	31.749	87.000	67.041	18.755	14.100	63.012	25.224	56.200
100.197	46.996	116.200	101.847	36.518	97.800	117.296	47.462	166.900
935.057	359.864	792.900	835.715	478.935	651.500	809.696	376.733	847.900

Tabla D2

Datos de precipitación de los datos grillados PISCO, RAIN4PE y datos de precipitaciones de la estación Santiago Antúnez de Mayolo.

Mes/Año	2005 - RAIN4PE	2005 - PISCO	2005 - OBSERVADOS	2006 - RAIN4PE	2006 - PISCO	2006 - OBSERVADOS	2007 - RAIN4PE	2007 - PISCO	2007 - OBSERVADOS	2008 - RAIN4PE
Enero	119.021	140.201	151.100	118.868	106.222	48.700	122.726	94.441	96.200	178.258
Febrero	91.476	76.726	87.700	110.791	107.593	100.800	77.477	72.943	87.000	161.234
Marzo	174.870	188.752	210.100	240.005	229.006	236.900	202.258	178.974	170.100	169.791
Abril	59.729	38.398	34.600	126.521	115.013	146.100	152.053	161.270	186.900	99.794
Mayo	9.981	3.035	2.900	16.336	4.805	4.800	35.924	25.385	31.800	14.733
Junio	0.311	0.000	0.000	15.386	6.514	17.200	1.348	0.351	0.700	6.381
Julio	0.228	0.000	0.000	1.838	0.936	1.600	3.526	0.000	6.900	3.979
Agosto	7.237	4.120	8.700	8.232	3.037	5.200	1.557	0.793	0.900	4.825
Setiembre	16.189	3.454	3.800	21.681	12.995	14.400	18.433	6.613	8.000	19.271
Octubre	39.619	41.751	44.900	67.323	45.826	49.500	99.814	81.230	102.200	119.433
Noviembre	18.983	20.804	20.100	86.019	72.549	56.000	88.745	54.864	57.800	65.629
Diciembre	105.559	107.114	111.300	148.963	138.107	159.000	62.267	60.769	62.100	56.096
Total	643.204	624.355	675.200	961.963	842.604	840.200	866.127	737.633	810.600	899.425

2008 - PISCO	2008 - OBSERVADOS	2009 - RAIN4PE	2009 - PISCO	2009 - OBSERVADOS	2010 - RAIN4PE	2010 - PISCO	2010 - OBSERVADOS	2011 - RAIN4PE	2011 - PISCO	2011 - OBSERVADOS
149.575	160.800	198.850	194.766	178.500	108.176	102.842	101.700	127.783	103.251	90.400
150.353	148.200	168.571	135.049	141.600	78.773	70.383	49.400	88.695	63.349	68.200

115.762	108.000	260.071	234.244	225.600	147.483	133.198	124.500	144.990	104.777	108.100
72.941	86.100	129.391	108.993	118.400	70.856	66.089	71.900	143.743	113.288	0.000
2.195	2.200	39.845	26.349	30.200	37.455	30.479	46.200	8.444	0.931	0.700
3.765	7.400	2.768	3.687	9.100	2.905	2.725	6.100	0.539	0.000	0.000
5.317	9.800	1.064	0.000	0.300	0.488	0.000	0.000	2.719	2.003	4.100
2.032	3.100	3.798	1.544	2.200	3.168	2.665	3.400	1.857	0.847	1.100
15.266	23.700	8.035	2.039	2.000	30.745	20.655	27.800	19.570	9.344	11.000
85.812	133.100	134.982	100.673	146.900	28.003	32.977	29.200	26.532	24.783	28.200
40.733	43.900	136.224	113.189	137.400	73.348	100.230	109.000	83.345	99.219	98.900
67.118	94.900	154.808	132.697	187.000	162.141	151.864	191.500	156.261	160.226	168.000
710.869	821.200	1238.409	1053.232	1179.200	743.540	714.107	760.700	804.478	682.019	578.700

2012 - RAIN4PE	2012 - PISCO	2012 - OBSERVADOS	2013 - RAIN4PE	2013 - PISCO	2013 - OBSERVADOS	2014 - RAIN4PE	2014 - PISCO	2014 - OBSERVADOS
146.377	109.906	104.000	88.283	67.009	88.700	129.997	110.221	124.500
170.810	140.241	142.600	159.951	137.833	137.600	159.674	170.087	186.100
193.636	174.019	193.200	204.291	177.443	170.500	209.774	173.668	170.300
176.081	149.729	180.200	65.691	37.208	39.800	121.932	65.318	91.100
23.189	12.790	17.800	25.767	16.465	21.400	58.536	43.413	74.400
2.625	3.197	5.900	0.801	0.000	0.000	3.190	3.096	7.100
0.219	0.000	0.000	0.570	0.223	0.400	0.761	0.000	0.000
0.505	0.000	0.000	4.946	4.346	4.700	7.109	3.194	3.900
31.509	25.075	26.400	16.886	6.281	5.900	27.692	25.020	34.900
63.547	41.265	42.600	107.930	80.908	97.600	53.639	40.761	47.700
96.283	81.945	0.000	74.065	61.934	67.600	70.969	56.063	53.000
106.997	105.315	110.300	123.776	109.114	146.600	147.783	163.292	196.300
1011.777	843.483	823.000	872.958	698.764	780.800	991.057	854.133	989.300



Tabla D3

Datos de precipitación de los datos grillados PISCO, RAIN4PE y datos de precipitaciones de la estación Cachicadan,

Mes/Año	2005 - RAIN4PE	2005 - PISCO	2005 - OBSERVADOS	2006 - RAIN4PE	2006 - PISCO	2006 - OBSERVADOS	2007 - RAIN4PE	2007 - PISCO	2007 - OBSERVADOS	2008 - RAIN4PE
Enero	96.688	137.603	88.900	146.486	265.888	197.200	209.742	365.110	286.700	160.054
Febrero	132.550	223.325	98.300	161.608	264.804	130.600	77.160	140.422	86.300	154.628
Marzo	237.871	380.205	246.900	318.521	495.712	379.700	284.113	453.100	297.200	174.494
Abril	91.785	132.962	108.900	127.079	195.182	153.800	172.351	279.510	193.900	129.232
Mayo	8.648	11.070	2.100	22.914	22.930	19.800	47.253	57.570	46.500	32.207
Junio	4.185	3.219	0.000	36.540	71.339	32.900	2.842	6.648	2.200	18.230
Julio	1.544	0.203	0.000	7.821	3.626	1.000	14.312	12.842	8.200	7.323
Agosto	7.918	2.471	0.000	9.220	5.678	0.500	10.720	15.999	9.900	11.687
Setiembre	13.557	2.735	0.000	31.564	32.348	17.600	22.020	30.850	24.100	34.154
Octubre	93.251	131.375	61.000	61.247	58.716	26.000	130.821	187.966	81.400	139.133
Noviembre	28.845	40.377	25.500	102.504	140.084	84.200	81.512	113.128	50.100	76.185
Diciembre	108.856	134.197	76.600	155.257	207.718	134.900	109.971	150.000	115.100	38.667
Total	825.699	1199.740	708.200	1180.761	1764.026	1178.200	1162.816	1813.145	1201.600	975.994

2008 - PISCO	2008 - OBSERVADOS	2009 - RAIN4PE	2009 - PISCO	2009 - OBSERVADOS	2010 - RAIN4PE	2010 - PISCO	2010 - OBSERVADOS	2011 - RAIN4PE	2011 - PISCO	2011 - OBSERVADOS
267.141	135.500	265.222	470.388	259.900	98.154	173.683	120.900	139.499	227.006	176.500
248.705	130.900	175.726	300.915	191.000	157.364	287.931	192.600	76.024	137.016	69.400
257.448	147.400	219.932	262.348	176.800	171.457	242.839	118.900	155.392	228.801	142.000
187.767	130.300	151.048	223.772	141.400	95.341	145.968	73.700	203.818	276.320	207.600
37.510	16.500	61.042	73.279	55.400	49.733	70.693	36.800	11.110	13.935	5.700



28.962	7.800	17.949	25.169	9.300	10.393	13.113	1.200	6.591	15.894	10.600
3.234	1.200	20.543	15.227	13.100	9.982	4.825	3.200	10.406	2.566	0.000
13.840	11.000	9.133	7.024	2.000	5.667	0.896	0.000	2.024	0.619	0.000
33.558	8.100	9.395	11.809	5.500	29.904	31.395	16.000	36.135	39.696	20.500
191.006	132.700	168.853	240.670	150.100	40.784	54.980	30.900	36.304	48.429	30.100
84.120	24.300	133.003	207.935	112.500	81.166	102.716	50.300	91.287	122.163	51.000
50.083	37.000	136.756	185.585	136.000	117.362	169.141	99.000	197.153	281.707	224.000
1403.375	782.700	1368.603	2024.121	1253.000	867.307	1298.178	743.500	965.743	1394.152	937.400

2012 - RAIN4PE	2012 - PISCO	2012 - OBSERVADOS	2013 - RAIN4PE	2013 - PISCO	2013 - OBSERVADOS	2014 - RAIN4PE	2014 - PISCO	2014 - OBSERVADOS
211.859	391.313	229.400	95.545	187.643	119.800	127.755	254.190	167.700
182.669	335.066	174.800	191.183	366.439	215.400	144.455	329.785	173.100
206.400	315.834	244.900	316.583	516.862	367.900	204.721	411.111	227.400
155.266	237.418	140.600	96.496	130.764	87.800	96.523	164.525	104.900
58.021	78.077	55.800	46.790	40.765	8.300	99.964	165.369	155.900
7.321	9.668	1.200	11.886	27.967	17.500	6.678	6.327	1.600
0.262	0.054	0.000	5.811	1.501	0.000	10.157	9.561	6.400
9.837	10.237	1.700	19.248	32.207	16.600	1.700	0.468	0.000
18.392	26.691	18.100	12.376	5.367	1.800	49.454	70.970	50.100
111.525	172.777	87.000	124.330	214.866	140.900	53.565	62.663	28.800
136.290	223.447	106.200	19.214	21.448	7.900	58.052	100.105	53.100
103.951	155.843	103.800	113.109	182.660	126.200	138.877	212.918	136.900
1201.792	1956.423	1163.500	1052.570	1728.488	1110.100	991.903	1787.992	1105.900

Tabla D4

Datos de precipitación de los datos grillados PISCO, RAIN4PE y datos de precipitaciones de la estación Cabana.

Mes/Año	2005 - RAIN4PE	2005 - PISCO	2005 - OBSERVADOS	2006 - RAIN4PE	2006 - PISCO	2006 - OBSERVADOS	2007 - RAIN4PE	2007 - PISCO	2007 - OBSERVADOS	2008 - RAIN4PE
Enero	65.125	55.775	52.900	119.268	119.726	117.000	143.158	137.367	149.500	158.741
Febrero	98.781	94.587	90.100	130.029	137.508	125.300	62.276	65.028	65.000	151.731
Marzo	181.676	172.535	166.800	277.283	325.419	304.000	230.770	246.375	247.500	158.619
Abril	62.117	53.973	58.000	114.384	107.865	118.500	132.948	133.905	134.500	116.882
Mayo	3.562	1.807	0.600	9.437	4.430	2.300	38.651	12.186	45.700	21.849
Junio	1.181	0.000	0.000	27.401	3.723	33.500	2.391	0.000	2.300	10.655
Julio	0.476	0.000	0.000	1.671	0.000	0.000	6.034	0.203	0.000	2.010
Agosto	6.136	2.900	5.100	4.341	0.405	2.500	7.940	0.278	9.300	5.809
Setiembre	6.690	1.151	1.300	15.720	1.988	0.000	10.852	0.275	0.000	21.261
Octubre	44.851	28.597	24.900	32.141	31.365	31.100	83.026	61.015	63.800	91.353
Noviembre	17.658	11.637	11.500	69.695	47.860	50.000	65.437	45.416	54.900	65.210
Diciembre	93.189	86.889	102.400	128.567	103.737	116.500	85.070	75.535	89.000	32.730
Total	581.443	509.850	513.600	929.936	884.025	900.700	868.552	777.584	861.500	836.853

2008 - PISCO	2008 - OBSERVADOS	2009 - RAIN4PE	2009 - PISCO	2009 - OBSERVADOS	2010 - RAIN4PE	2010 - PISCO	2010 - OBSERVADOS	2011 - RAIN4PE	2011 - PISCO	2011 - OBSERVADOS
157.437	184.000	212.904	236.522	213.000	101.150	49.834	130.400	103.413	99.454	83.500
158.337	165.100	187.940	206.570	235.100	134.660	151.590	141.100	80.266	46.794	115.500
151.147	146.300	213.531	210.997	233.200	146.861	172.201	178.300	135.825	157.290	164.000
100.114	123.200	124.713	120.329	126.000	86.258	81.415	81.000	152.769	145.903	148.300
20.442	22.600	33.147	16.675	22.500	39.232	30.457	35.000	4.614	0.656	0.000



0.618	0.000	9.280	0.251	1.700	4.079	0.076	0.000	3.963	1.850	2.000
0.000	0.000	10.039	1.716	1.500	6.571	2.260	5.700	9.865	4.075	13.000
0.548	0.000	6.243	0.608	1.800	1.812	0.010	0.000	0.884	0.008	0.000
10.015	11.300	8.597	1.560	9.300	24.630	19.055	28.000	29.926	19.304	33.500
74.579	85.000	143.299	115.566	166.500	26.950	24.695	29.000	19.871	15.914	14.000
48.571	68.000	99.622	78.684	97.300	72.004	73.242	90.700	86.414	39.504	0.000
28.685	33.500	100.961	88.629	95.500	123.290	113.234	151.800	150.243	135.813	146.000
750.493	839.000	1150.276	1078.108	1203.400	767.499	718.069	871.000	778.053	666.565	719.800

2012 - RAIN4PE	2012 - PISCO	2012 - OBSERVADOS	2013 - RAIN4PE	2013 - PISCO	2013 - OBSERVADOS	2014 - RAIN4PE	2014 - PISCO	2014 - OBSERVADOS
146.767	141.471	159.800	85.228	74.817	81.500	107.439	106.059	122.200
162.846	179.091	172.200	156.340	187.968	172.500	121.809	142.357	144.000
190.430	193.139	203.200	263.874	284.611	269.000	163.878	195.043	183.000
150.774	195.103	187.500	75.862	33.879	86.500	82.376	78.990	97.500
47.066	12.512	40.500	37.680	28.924	46.000	64.544	50.688	58.000
7.010	3.329	6.000	11.333	2.429	12.500	1.938	0.000	0.000
0.307	0.000	0.000	2.386	0.002	0.000	4.945	0.088	5.000
3.031	0.082	0.000	21.926	8.832	34.500	2.979	3.172	4.500
12.229	10.258	11.000	11.763	6.898	10.500	40.348	13.510	47.000
79.605	70.946	76.000	93.892	75.084	84.000	47.599	40.435	53.500
107.653	81.519	110.000	25.183	12.830	38.000	47.253	34.595	43.000
97.686	87.610	107.000	99.503	89.266	108.500	133.482	138.945	168.500
1005.404	975.060	1073.200	884.969	805.541	943.500	818.590	803.881	926.200



Anexo E. Pruebas estadísticas para determinar la semejanza de los datos grillados PISCO y RAIN4PE con los datos Observado y las mediadas de bondad de ajuste de los datos de precipitación.

Tabla E1

Coefficiente de correlación r de Pearson, datos grillados y la estación Yungay..

Coefficiente de correlación: RAIN4PE vs Est. Yungay y PISCO vs Est. Yungay		
Año	C.c.RAIN4PE	C.c.PISCO
2005	0.95689	0.85092
2006	0.93981	0.83284
2007	0.89305	0.94993
2008	0.9602	0.9515
2009	0.9373	0.88118
2010	0.82742	0.70489
2011	0.91946	0.77965
2012	0.95237	0.8816
2013	0.94427	0.86883
2014	0.92761	0.75929

Tabla E2

Coefficiente de determinación r^2 , datos grillados y la estación Yungay.

Coefficiente de determinación: RAIN4PE vs Est. Yungay y PISCO vs Est. Yungay		
Año	C.d. RAIN4PE	C.d. PISCO
2005	0.91563	0.72407
2006	0.88324	0.69363
2007	0.79754	0.90236
2008	0.92199	0.90535
2009	0.87854	0.77648
2010	0.68463	0.49687
2011	0.84541	0.60785
2012	0.90700	0.77723
2013	0.89164	0.75486
2014	0.86046	0.57652

Tabla E3*Cálculos los estadísticos Hidrológicos – Estación Yungay.*

Parámetro	Resultados
NSE (Nash Sutcliffe)	0.751
PBIAS (Persistencia de la eficiencia del modelo)	-3.47
RSR (Relación de Desviación de Observaciones)	0.499

Tabla E4*Coefficiente de correlación r de Pearson, datos grillados y la estación Santiago Antúnez de Mayolo.*

Coeficiente de correlación: RAIN4PE vs Est. Sant. A. y PISCO vs Est. Sant. A.

Año	C.c. RAIN4PE	C.c. PISCO
2005	0.9835	0.9987
2006	0.9534	0.9574
2007	0.9572	0.9889
2008	0.9381	0.9691
2009	0.9803	0.9681
2010	0.9504	0.9706
2011	0.7534	0.8290
2012	0.9212	0.9315
2013	0.9763	0.9804
2014	0.9431	0.9851

Tabla E5*Coefficiente de determinación r^2 , datos grillados y la estación Santiago Antúnez de Mayolo.*

Coeficiente de determinación: RAIN4PE vs Est. Sant. A. y PISCO vs Est. Sant. A.

Año	C.d. RAIN4PE	C.d. PISCO
2005	0.9672	0.9973
2006	0.9090	0.9166
2007	0.9162	0.9779
2008	0.8799	0.9391
2009	0.9610	0.9372
2010	0.9032	0.9422

2011	0.5676	0.6873
2012	0.8486	0.8676
2013	0.9532	0.9613
2014	0.8895	0.9704

Tabla E6

Cálculos los estadísticos Hidrológicos – Estación Santiago Antúnez de Mayolo.

Parámetro	Resultados
NSE (Nash Sutcliffe)	0.859
PBIAS (Persistencia de la eficiencia del modelo)	9.37
RSR (Relación de Desviación de Observaciones)	0.376

Tabla E7

Coefficiente de correlación r de Pearson, datos grillados y la estación Cachicadan.

Coeficiente de correlación: RAIN4PE vs Est. Cachicadan y PISCO vs Est. Cachicadan		
Año	C.c. RAIN4PE	C.c. PISCO
2005	0.97543	0.97561
2006	0.97426	0.98265
2007	0.96470	0.98052
2008	0.97184	0.97274
2009	0.98778	0.98859
2010	0.92745	0.97889
2011	0.97670	0.98104
2012	0.98027	0.96909
2013	0.99216	0.99420
2014	0.97065	0.96650

Tabla E8

Coefficiente de determinación r^2 , datos grillados y la estación Cachicadan.

Coeficiente de determinación: RAIN4PE vs Est. Cachicadan y PISCO vs Est. Cachicadan		
Año	C.d. RAIN4PE	C.d. PISCO

2005	0.9515	0.9518
2006	0.9492	0.9656
2007	0.9306	0.9614
2008	0.9445	0.9462
2009	0.9757	0.9773
2010	0.8602	0.9582
2011	0.9539	0.9624
2012	0.9609	0.9391
2013	0.9844	0.9884
2014	0.9422	0.9341

Tabla E9

Cálculos los estadísticos Hidrológicos – Estación Cachicadan.

Parámetro	Resultados
NSE (Nash Sutcliffe)	0.93
PBIAS (Persistencia de la eficiencia del modelo)	4.02
RSR (Relación de Desviación de Observaciones)	0.264

Tabla E10

Coefficiente de correlación r de Pearson, datos grillados y la estación Cabana.

Coefficiente de correlación: RAIN4PE
vs Est. Cabana y PISCO vs Est.
Cabana

Año	C.c. RAIN4PE	C.c. PISCO
2005	0.99085	0.99466
2006	0.99395	0.99302
2007	0.99387	0.99164
2008	0.99095	0.99101
2009	0.99063	0.98130
2010	0.98879	0.92571
2011	0.89481	0.92844
2012	0.99397	0.98708
2013	0.99472	0.98122
2014	0.99317	0.98043

Tabla E11

Coefficiente de determinación r2, datos grillados y la estación Cabana.

Coeficiente de determinación: RAIN4PE vs Est. Cabana y PISCO vs Est. Cabana		
Año	C.d. RAIN4PE	C.d. PISCO
2005	0.9818	0.9893
2006	0.9879	0.9861
2007	0.9878	0.9833
2008	0.9820	0.9821
2009	0.9814	0.9630
2010	0.9777	0.8569
2011	0.8007	0.8620
2012	0.9880	0.9743
2013	0.9895	0.9628
2014	0.9864	0.9612

Tabla E12

Cálculos los estadísticos Hidrológicos – Estación Cabana.

Parámetro	Resultados
NSE (Nash Sutcliffe)	0.957
PBIAS (Persistencia de la eficiencia del modelo)	-2.6
RSR (Relación de Desviación de Observaciones)	0.208

Anexo F. Producción de Sedimentos mensuales.

Tabla F1

Cantidad mensual de sedimentos que produce la cuenca del río Santa simulado con el modelo SWAT con unidades de M.T/mes.

Año	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Enero	0.702	1.313	1.244	2.155	1.041	1.562	1.748	1.707	1.364
Febrero	2.911	2.409	1.419	2.703	1.457	1.755	2.265	2.261	2.920
Marzo	2.929	1.796	1.088	2.933	1.784	1.583	1.302	1.502	2.603
Abril	1.232	0.879	1.789	1.739	1.247	1.631	1.222	1.675	1.709
Mayo	0.275	0.368	0.714	0.693	0.465	0.343	0.564	0.867	1.232
Junio	0.069	0.147	0.167	0.201	0.098	0.080	0.089	0.220	0.267

Julio	0.046	0.067	0.058	0.088	0.053	0.046	0.050	0.078	0.148
Agosto	0.094	0.051	0.041	0.069	0.040	0.039	0.039	0.055	0.153
Setiembre	0.079	0.062	0.043	0.091	0.291	0.058	0.041	0.051	0.120
Octubre	0.453	0.413	0.087	0.704	0.134	0.042	0.132	0.242	0.754
Noviembre	1.281	1.086	0.138	0.975	0.101	0.261	0.376	0.238	0.775
Diciembre	1.332	1.075	0.772	1.025	0.703	0.678	1.709	0.744	0.229
Año	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Enero	1.305	1.103	1.004	0.888	1.739	1.067	2.039	1.563	2.669
Febrero	0.997	1.293	1.364	2.564	1.790	1.533	2.530	2.386	3.222
Marzo	1.189	2.377	1.611	3.080	3.567	2.063	2.998	2.001	4.140
Abril	0.772	1.313	0.851	2.715	2.803	1.875	2.142	1.351	2.643
Mayo	0.231	1.162	0.358	1.762	1.584	0.941	1.324	1.556	1.608
Junio	0.147	0.323	0.172	0.889	0.890	0.433	0.704	0.584	1.139
Julio	0.082	0.182	0.105	0.502	0.563	0.292	0.459	0.381	0.779
Agosto	0.055	0.141	0.081	0.355	0.390	0.213	0.314	0.255	0.535
Setiembre	0.082	0.101	0.057	0.329	0.313	0.150	0.226	0.249	0.386
Octubre	0.856	0.527	0.210	0.507	0.252	0.205	0.462	0.272	1.025
Noviembre	1.417	0.336	0.479	1.948	0.278	0.520	0.777	0.498	0.970
Diciembre	1.087	0.220	0.293	1.598	0.338	0.993	0.988	1.821	1.176
Año	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Enero	2.090	1.619	2.333	1.936	1.863	1.657	1.946	1.909	2.964
Febrero	3.637	2.955	2.595	2.812	2.246	2.798	2.109	2.752	2.375
Marzo	3.287	3.187	4.186	3.415	3.313	2.058	2.649	3.754	4.047
Abril	2.297	2.017	2.269	2.541	2.571	1.991	1.849	3.066	3.047
Mayo	2.802	1.504	1.495	1.562	1.545	1.285	1.284	1.697	2.913
Junio	1.364	0.909	1.027	1.070	1.008	0.725	0.737	1.235	1.531
Julio	0.969	0.595	0.712	0.719	0.691	0.502	0.503	0.851	1.176
Agosto	0.647	0.507	0.473	0.484	0.464	0.327	0.342	0.601	0.822
Setiembre	0.767	0.405	0.484	0.399	0.316	0.432	0.234	0.547	0.560
Octubre	1.148	0.526	0.530	0.982	0.332	0.743	0.412	0.582	0.818
Noviembre	0.810	0.324	1.368	1.840	0.500	1.728	0.414	1.029	1.070
Diciembre	1.274	1.348	1.479	1.581	1.369	2.326	1.084	2.068	0.841
Año	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014		

Enero	2.040	2.004	1.672	1.654	2.693	2.703	2.754
Febrero	2.770	2.966	1.867	1.869	3.759	3.228	3.331
Marzo	3.311	3.534	2.337	2.640	3.531	4.556	4.473
Abril	2.634	2.862	1.867	2.512	3.368	3.233	2.661
Mayo	1.628	1.793	1.195	1.467	2.085	2.062	2.196
Junio	1.083	1.198	0.672	0.832	1.418	1.514	1.417
Julio	0.778	0.834	0.436	0.599	1.087	1.176	1.103
Agosto	0.602	0.567	0.288	0.391	0.736	0.809	0.752
Setiembre	0.412	0.402	0.274	0.335	0.753	0.685	0.561
Octubre	0.673	0.733	0.328	0.314	1.106	1.215	0.900
Noviembre	0.795	0.799	0.463	1.364	1.867	1.996	0.909
Diciembre	0.912	1.342	1.173	2.075	2.517	1.958	1.113
