

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA
DEL RIO PITUMARCA MEDIANTE EL USO DEL MODELO SWAT**

Tesis para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Civil**

AUTOR:

Mario Kevin Salas Quispe

ASESOR:

MSc. Mitchel Jimmy Jara García

Lima, Noviembre, 2019

Resumen

El sector agropecuario representa alrededor de 7% de nuestro PBI, donde la mayor cantidad se concentra en la costa peruana. Por otro lado, en la sierra y selva se perciben menor crecimiento y menor desarrollo en este sector. Sin embargo, el distrito de Pitumarca, como muchas otras comunidades del interior del Perú, tienen como principales actividades económicas la agricultura, la ganadería y la silvicultura. Tan solo entre estos sectores se emplea alrededor del 70% de la PEA de todo el distrito de Pitumarca. Para sustentar la economía local, existen diferentes tipos de cultivos, pastizales, bosques y ganado, dentro de los 736 km² de extensión de la cuenca.

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. La calibración y validación del modelo, mediante el uso de la herramienta SWAT-Cup, calculará la eficiencia del modelo, lográndose así generar un buen rendimiento en las simulaciones.

Para la elaboración del modelo fue necesario el registro de datos climáticos e hidrológicos, para completar los datos climáticos faltantes, se usaron redes neuronales junto con el uso del producto PISCO. Luego se interpolaron valores, para obtener estaciones simuladas dentro de la cuenca, con los que se elaboró una base de datos climáticos, usando Microsoft Access, usada para el modelo hidrológico. Además es necesario, también, imágenes satelitales y el uso de algún sistema de información geográfico (SIG). Los DEM fueron extraídos de la página del USGS y se usó programa QGIS.

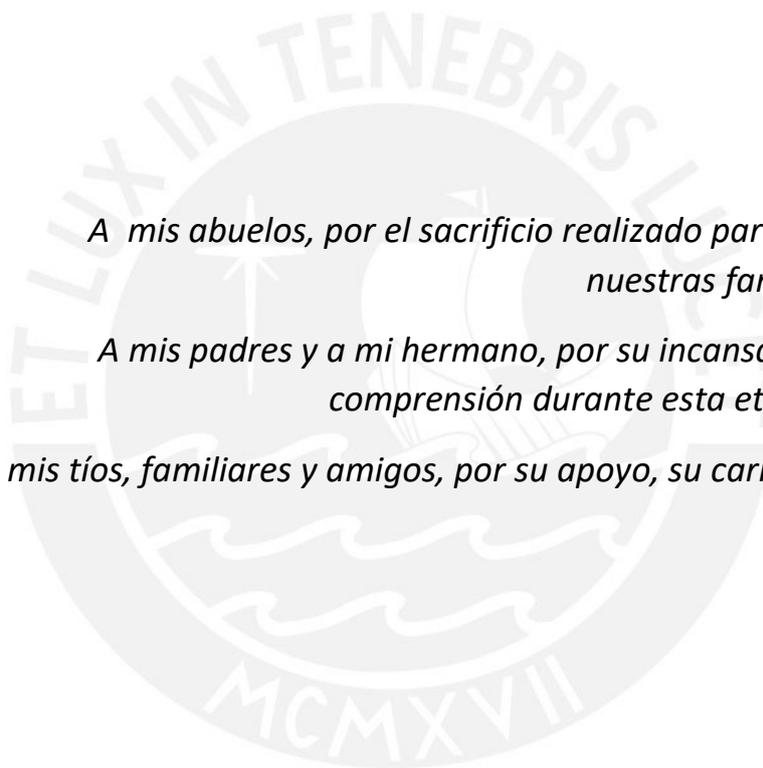
Con el uso del modelo, se ubican las zonas con un alto grado de erosión y a partir de ello, se proponen medidas de mitigación según sea las características de las zonas, tales como: reforestación, estructuras hidráulicas, tecnificación de cultivos, etc. Estas medidas, contemplan, además, el fomento del desarrollo local, mejorando la competitividad y crecimiento del distrito.

Dedicatoria

A mis abuelos, por el sacrificio realizado para poder sacar a nuestras familias adelante.

A mis padres y a mi hermano, por su incansable paciencia y comprensión durante esta etapa de mi vida.

A mis tíos, familiares y amigos, por su apoyo, su cariño y su aliento.



Agradecimientos

Agradezco a mi madre María y a mi padre Zenón por su apoyo, a pesar de las dificultades; por su confianza y aliento, en los momentos que más lo necesitaba.

A mi hermano Marcelo, por acompañarme y cuidarme durante esta etapa, en la que dejamos nuestra ciudad natal, para aventurarnos a perseguir nuestros sueños y ambiciones.

A mi enamorada Hillary, por su cariño y paciencia inagotable.

A los amigos, con los que compartí aulas y sueños.

A mi asesor Mitchel Jimmy Jara García por el apoyo y entusiasmo brindado, en aras de la culminación del presente proyecto.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| LISTA DE TABLAS | IV |
| LISTA DE FIGURAS | V |
| CAPITULO 1. GENERALIDADES | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.3. Justificación, evaluación y aplicación | 2 |
| 1.3.1. Justificación. | 2 |
| 1.3.2. Evaluación y aplicación. | 2 |
| CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO | 3 |
| 2.1. Antecedentes | 3 |
| 2.2. El Ciclo Hidrológico | 5 |
| 2.2.1. Evaporación y evapotranspiración. | 6 |
| 2.2.1.1. Método del balance de energía. | 7 |
| 2.2.1.2. Método basado en el balance hídrico del suelo. | 7 |
| 2.2.1.3. Métodos numéricos de estimación de la evapotranspiración de los cultivos. | 8 |
| 2.2.2. Escorrentía e infiltración. | 8 |
| 2.2.2.1. Escorrentía superficial o directa. | 9 |
| 2.2.2.2. Escorrentía sub-superficial o hipodérmica. | 9 |
| 2.2.2.3. Escorrentía subterránea. | 10 |
| 2.2.2.4. Calculo de la infiltración. | 10 |
| 2.3. Factores Climáticos | 12 |
| 2.3.1. Precipitación. | 12 |
| 2.3.2. Temperatura. | 12 |
| 2.3.3. Humedad atmosférica. | 13 |
| 2.3.4. Radiación solar. | 14 |
| 2.3.5. Viento. | 14 |
| 2.4. Erosión del Suelo y Transporte de Sedimentos | 15 |
| 2.4.1. Clasificación de suelos. | 16 |
| 2.4.1.1. Clasificación de la FAO. | 16 |
| 2.4.1.2. Clasificación taxonómica (USDA). | 18 |
| 2.4.2. Erosión. | 18 |
| 2.4.2.1. Ecuación de USLE. | 18 |
| 2.4.2.2. Ecuación de RUSLE. | 19 |
| 2.4.2.3. Ecuación de MUSLE. | 19 |
| 2.4.3. Teoría de transporte de sedimentos. | 20 |
| 2.5. Modelación Hidrológica | 21 |
| 2.5.1. Producto Grillado PISCO – SENAMHI. | 21 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.5.2. | Sistema de información geográfica. | 22 |
| 2.5.3. | Herramienta de evaluación del suelo y agua (SWAT). | 23 |
| 2.5.4. | Calibración y validación. | 24 |
| CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS | | 26 |
| 3.1. | Área de Estudio | 26 |
| 3.1.1. | Ubicación. | 26 |
| 3.1.2. | Características. | 26 |
| 3.1.3. | Geología y de taxonomía del suelo. | 32 |
| 3.1.4. | Vulnerabilidad y conflictos ambientales. | 35 |
| 3.2. | Información Hidrometeorológica Observada | 38 |
| 3.2.1. | Datos de Precipitación. | 38 |
| 3.2.1.1. | Estaciones existentes. | 38 |
| 3.2.1.2. | Completamiento de datos | 40 |
| 3.2.2. | Datos de aforo mensual. | 42 |
| 3.3. | Datos de Entrada Usados en el Modelo SWAT | 43 |
| 3.3.1. | Modelo digital de elevación (DEM). | 43 |
| 3.3.2. | Cobertura y uso de suelos. | 44 |
| 3.3.3. | Tipo de suelos y atributos. | 45 |
| 3.3.4. | Datos climáticos. | 46 |
| 3.4. | Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación del Modelo | 47 |
| CAPITULO 4. CALCULOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | | 49 |
| 4.1. | Generación de la Base de Datos Climáticos | 49 |
| 4.2. | Ejecución del Modelo QSWAT | 50 |
| 4.3. | Análisis de Sensibilidad | 53 |
| 4.4. | Calibración y Validación del Modelo | 53 |
| 4.5. | Producción de Sedimentos en la Cuenca | 57 |
| CAPITULO 5. MEDIDAS PARA LA REDUCCIÓN DE EROSIÓN | | 64 |
| 5.1. | Canales y Zanjas | 64 |
| 5.1.1. | Canales de coronación. | 64 |
| 5.1.2. | Zanjas de infiltración. | 65 |
| 5.1.3. | Ubicación de canales y zanjas. | 67 |
| 5.2. | Reforestación | 70 |
| 5.2.1. | Especies locales recomendadas. | 70 |
| 5.2.2. | Especies no nativas recomendadas. | 72 |
| 5.2.3. | Zonas de reforestación dentro de la cuenca. | 72 |
| 5.3. | Tecnificación de la Agricultura | 74 |
| 5.3.1. | Rotación de cultivos. | 74 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 5.3.2. | Cobertura de suelo. | 75 |
| 5.4. | Protección Ribereña y Estructuras de Control de Flujo en el Río | 76 |
| 5.4.1. | Protección ribereña. | 77 |
| 5.4.2. | Estructuras de control de flujo en el rio. | 78 |
| 5.4.3. | Ubicación de estructuras de control de flujo. | 79 |
| CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 82 |
| 6.1. | Conclusiones | 82 |
| 6.2. | Recomendaciones | 83 |
| REFERENCIAS | | 84 |
| ANEXOS | | 89 |



Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 1. Tabla de Prevert (1986)</i> | 9 |
| <i>Tabla 2. Valores de cantidad de radiación solar en calorías por día en un 1 cm²</i> | 14 |
| <i>Tabla 3. Escala de Beaufort</i> | 15 |
| <i>Tabla 4. Clasificación de suelos para América del Sur FAO</i> | 17 |
| <i>Tabla 5. Lagunas y presas dentro de la cuenca del río Salcca.</i> | 26 |
| <i>Tabla 6. Microcuencas que conforman la cuenca del río Pitumarca</i> | 27 |
| <i>Tabla 7. Clasificación climática de la subcuenca</i> | 28 |
| <i>Tabla 8. Cobertura Vegetal</i> | 30 |
| <i>Tabla 9. Capacidad de uso mayor de suelos</i> | 32 |
| <i>Tabla 10. Aforo mensual del río Pitumarca durante el 2010</i> | 42 |
| <i>Tabla 11 Caudales generados mediante el uso de la herramienta WEAP</i> | 42 |
| <i>Tabla 12. Caudales medios generados mensuales</i> | 43 |
| <i>Tabla 13. Tipos de suelo y atributos en la cuenca del río Pitumarca.</i> | 45 |
| <i>Tabla 14. Parámetros para el análisis de sensibilidad en el modelo</i> | 47 |
| <i>Tabla 15. Criterios de rendimiento del modelo hidrológico</i> | 47 |
| <i>Tabla 16. Rendimiento del modelo durante la calibración y validación</i> | 54 |
| <i>Tabla 17. Características de las Subcuencas</i> | 57 |
| <i>Tabla 18. Tasa de sedimentos generados por subcuenca</i> | 60 |
| <i>Tabla 19. Costo por metro lineal de canales de coronación</i> | 65 |
| <i>Tabla 20. Dimensiones de árboles de la especie pinus radiata con y sin empleo de zanjas</i> | 66 |
| <i>Tabla 21. Distancia entre zanjas según la pendiente</i> | 67 |
| <i>Tabla 22. Características de especies nativas de árboles y arbustos sugeridos para reforestación</i> | 70 |
| <i>Tabla 23. Sugerencias para la rotación de cultivos según la altitud</i> | 74 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1. Ocupación de la población económicamente activa según actividades económicas en el distrito de Pitumarca.</i> | 1 |
| <i>Figura 2. Mapa del uso de suelos 2007 (después de la construcción de la presa)</i> | 3 |
| <i>Figura 3. Representación esquemática del ciclo hidrológico</i> | 6 |
| <i>Figura 4. Evolución temporal de la escorrentía.</i> | 10 |
| <i>Figura 5. Histograma para la obtención de la escorrentía e infiltración</i> | 12 |
| <i>Figura 6. Distribución de velocidades, concentraciones y fuerza cortante.</i> | 21 |
| <i>Figura 7. Estaciones utilizadas para generar el producto PISCO</i> | 22 |
| <i>Figura 8. Pasos del uso de un DEM con el SWAT</i> | 24 |
| <i>Figura 9. Ejemplo de aplicación de la prueba de muestra dividida diferencial.</i> | 25 |
| <i>Figura 10. Mapa climático de la cuenca del río Pitumarca</i> | 29 |
| <i>Figura 11. Mapa de cobertura vegetal de la cuenca del río Pitumarca</i> | 31 |
| <i>Figura 12. Mapa geológico de la cuenca del río Pitumarca</i> | 33 |
| <i>Figura 13. Mapa de taxonomía de suelos de la cuenca del río Pitumarca</i> | 34 |
| <i>Figura 14. Mapa de vulnerabilidad de la cuenca del río Pitumarca</i> | 36 |
| <i>Figura 15. Mapa de conflictos ambientales en la cuenca del río Pitumarca</i> | 37 |
| <i>Figura 16. Ubicación de las estaciones meteorológicas</i> | 38 |
| <i>Figura 17. Histograma de la estación Combapata con datos proporcionados de SENAMHI</i> | 39 |
| <i>Figura 18. Histograma de la estación de Ccatcca con datos proporcionados por SENAMHI</i> | 39 |
| <i>Figura 19. Histograma de la estación de Pomacanchi con datos del SENAMHI.</i> | 40 |
| <i>Figura 20. Código para extraer información del producto PISCO</i> | 40 |
| <i>Figura 21. Formato para ingreso a pandas</i> | 41 |
| <i>Figura 22. Importación de datos a pandas</i> | 41 |
| <i>Figura 23. Construcción de la red neuronal</i> | 42 |
| <i>Figura 24. Caudales observados río Pitumarca</i> | 43 |
| <i>Figura 25. DEM de la zona de estudio.</i> | 44 |
| <i>Figura 26. Mapa de uso de suelos extraída de Earthdata Search</i> | 45 |
| <i>Figura 27. Tipo de suelos en la cuenca del río Pitumarca (Ver Tabla 13)</i> | 46 |
| <i>Figura 28. Punto de rocío para una estación usando dew02</i> | 49 |
| <i>Figura 29. Parámetros de precipitación para una estación usando pcpSTAT</i> | 49 |
| <i>Figura 30. Cuenca delimitada con cursos de agua</i> | 50 |
| <i>Figura 31. Subcuencas delimitadas por QSWAT</i> | 50 |
| <i>Figura 32. Creación de HRUs</i> | 51 |
| <i>Figura 33. Interface de bases de datos</i> | 51 |
| <i>Figura 34. Interface para correr el modelo SWAT</i> | 52 |
| <i>Figura 35. Interface para visualizar resultados</i> | 52 |
| <i>Figura 36. Resultados de análisis de sensibilidad.</i> | 53 |
| <i>Figura 37. Contraste de caudales observados y simulados durante la etapa de calibración y validación</i> | 55 |
| <i>Figura 38. Correlación de caudal observado y caudal simulado durante la calibración</i> | 56 |
| <i>Figura 39. Correlación de caudal observado y caudal simulado durante la validación</i> | 56 |
| <i>Figura 40. Grados de erosión por subcuencas</i> | 60 |
| <i>Figura 41. Producción de sedimentos a través del tiempo</i> | 61 |
| <i>Figura 42. Erosión del suelo en la cuenca del río Pitumarca</i> | 63 |
| <i>Figura 43. Zanjas de infiltración</i> | 65 |
| <i>Figura 44. Áreas de cultivo con problemas erosivos</i> | 66 |
| <i>Figura 45. Medidas de Protección - Zanjas de infiltración</i> | 68 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 46. Medidas de Protección - Canales de Coronación</i> | 69 |
| <i>Figura 47. Lugares factibles para reforestación</i> | 73 |
| <i>Figura 48. Efecto de la cantidad de cobertura de suelo en la escorrentía e infiltración del agua de lluvia</i> | 76 |
| <i>Figura 49. Colocación de los gaviones</i> | 78 |
| <i>Figura 50. Colocación y función de los espigones</i> | 79 |
| <i>Figura 51. Ubicación de Espigones</i> | 80 |
| <i>Figura 52. Ubicación de Gaviones</i> | 81 |



CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

La cuenca del río Vilcanota es una de las fuentes de agua superficial más importantes de Cusco y está a su vez conformada por 3 cuencas, 4 subcuencas y 1 microcuenca. Entre ellas se encuentra la cuenca del río Pitumarca, la cual tiene una extensión de 736.1 km², según información de INRENA y se ubica en la provincia de Canchis, en el distrito de Pitumarca.

Los habitantes de la provincia de Canchis, específicamente del distrito de Pitumarca, se ocupan mayoritariamente en actividades tales como la agricultura, ganadería, caza y silvicultura, siendo un 70% de la población económicamente activa (PEA) la que labora en estas áreas. El 30% restante se ocupa en industrias tales como manufactura y construcción o en actividades como comercio, enseñanza y administración (ver Figura 1).

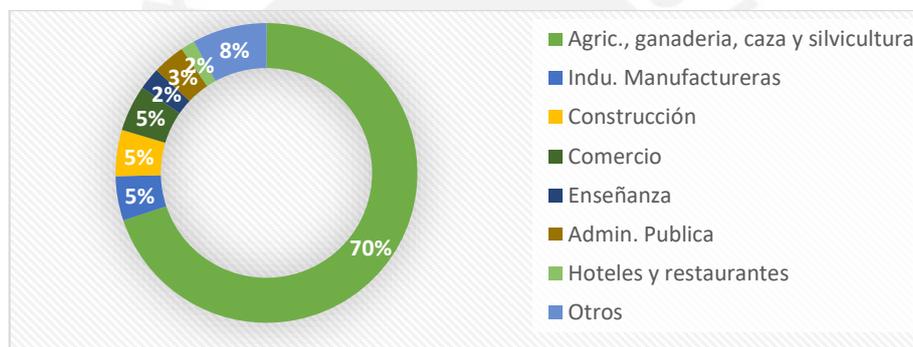


Figura 1. Ocupación de la población económicamente activa según actividades económicas en el distrito de Pitumarca.

Fuente: Programa BioAndes Perú (2009).

La gran mayoría de la población trabaja en temas relacionados a la agricultura, ganadería y silvicultura, por lo que resultan necesarios los estudios hidrológicos y geológicos. Ello con miras a lograr un desarrollo sostenible de la comunidad, especialmente el cálculo de la carga de sedimentos ayudara a contabilizar el volumen de sólidos generados en la cuenca, producto de los procesos erosivos. El volumen de sedimento se traduce, en pérdida de tierra cultivable y, por ende, repercuten en la capacidad productiva del distrito. Además los efectos producidos por el cambio climático hacen vulnerable a la comunidad y a su entorno, generando precipitaciones anormales y sequias severas que se traducen en una mayor velocidad de erosión. La necesidad de conocer el estado actual, así como los factores que más repercuten, brindara información relevante para planificar medidas de control y prevención.

1.2. Objetivos

El Objetivo General de la presente tesis es 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.

Los objetivos específicos que se alcanzarán durante el desarrollo de esta tesis, son:

- i) Analizar los factores climáticos como: la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, horas de sol y el viento para introducir estos datos al modelo.
- ii) Obtener y analizar mapas de la topografía, cobertura vegetal y tipo de suelo según su extensión, su uso, actividad económica, morfología, composición, cobertura vegetal, vulnerabilidad, clima, su red hídrica y conflictos ambientales.
- iii) Generar, calibrar y validar el modelo SWAT en la cuenca de estudio con información recolectada.
- iv) Proponer medidas de protección en la zona de erosión.

1.3. Justificación, evaluación y aplicación

1.3.1. Justificación.

La erosión excesiva es un problema relevante e importante que ocasiona pérdidas materiales a mediano y largo plazo, pone en peligro el estilo de vida de los pobladores ubicados en la cuenca y aumenta el riesgo de desastres naturales en las áreas cercanas a los cursos de agua. También, representa un problema ambiental, provocando el empobrecimiento de las tierras y alterando los ecosistemas, es por ello que un estudio de erosión que nos ayude a entender la dinámica que existe entre los elementos de la cuenca y un análisis del grado de erosión ya existente sería beneficiosos, en tanto permitirían generar información pertinente para el planteamiento de soluciones al problema de la creciente erosión. El estudio de la carga de sedimentos contará con herramientas versátiles que permitirán elaborar estimaciones en la cuenca y para ello se recolectarán diversos datos que luego serán presentados en tablas, mapas, base de datos y gráficos.

1.3.2. Evaluación y aplicación.

Para la evaluación de la carga de sedimentos se usará información meteorológica, de uso de suelos, tipo de suelos y topográfica mediante la herramienta Q-SWAT que utiliza la ecuación de MUSLE (ver Ecuación 14) para el cálculo de producción de sedimento. Para la validación se usará la herramienta SUFI-2 de SWAT-CUP, herramienta para calibrar y validar el modelo. Finalmente, se propondrán medidas de protección adecuadas para reducir la erosión y la carga de sedimentos en la cuenca.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En los últimos años se realizaron investigaciones con fines similares alrededor del mundo empleando la herramienta SWAT, algunas de ellas serán presentadas brevemente.

En Irán, se ha utilizado el modelo hidrológico para estudiar el uso de suelo. En este país se emplean alrededor de 510,000 Km² de tierra para la agricultura, lo que representa un 29% del área total del país, de tal manera, que la agricultura es uno de los sectores económicos más significativos de Irán. Durante las últimas dos décadas, este sector se ha expandido y ahora representa el 23% del total del PBI, lo que es un 9% más de lo que representaba en 1992 (FAO, 2008). Se analizó el efecto que ocasiona el uso del suelo en el balance hídrico y en el transporte de sedimentos y finalmente se aplicó el modelo SWAT con datos geológicos, morfológicos, climáticos, el tipo de suelo y su clasificación. Tras el uso del modelo SWAT, se analizó y se comparó el estado de la zona de estudio en diferentes años (1987, 2001 y 2007), la peculiaridad de este estudio radica en la existencia de una presa que para el año 2007 (ver Figura 2) cambió las características de la zona de estudio. La estructura de la presa generó un cambio radical en el uso del suelo en sus cercanías y también afectó el volumen de transporte de sedimentos (Hosseini & Aqeel Ashraf, 2015).

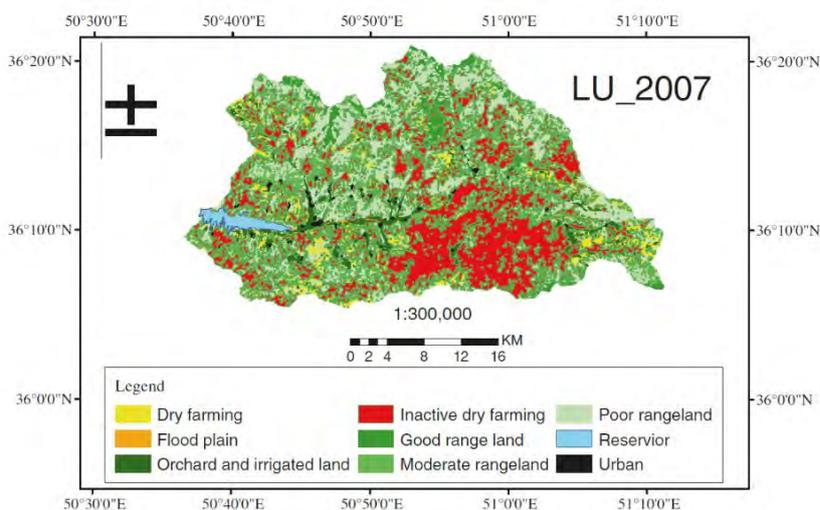


Figura 2. Mapa del uso de suelos 2007 (después de la construcción de la Fuente: Hosseini & Aqeel Ashraf (2008).

En Vietnam, se ha utilizado el modelo SWAT, conjuntamente con el Sistema de Información Geográfico (SIG), para calcular la erosión de una pequeña cuenca en las montañas del centro de este país, con la finalidad de medir la explotación humana de los

recursos, así como los impactos naturales que causan un cambio significativo sobre la superficie del suelo y degradan la calidad de las tierras (Nguyen Sinh, 2007).

Este estudio se realizó en la región montañosa de la provincia de Thuan Thien Hue, una zona propensa a sufrir desastres naturales, tales como inundaciones, deslizamientos de tierras o granizo. Como dato adicional, el 89% de la población pertenece a minorías étnicas, grupo altamente vulnerable. Los investigadores usaron el ArcSWAT 2009 y el primer paso del análisis fue hallar la configuración de las cuencas y subcuencas de la zona de estudio, para lo que se utilizó un DEM (modelo digital del terreno) y el programa ArcMap. Para la calibración y la validación del modelo se usaron las ecuaciones del coeficiente NSE - Nash - Sutcliffe (ver Ecuación **(Ecuación 1)** y de percentiles (PBIAS) ver Ecuación 2) que se usaron para evaluar cuantitativamente la capacidad del modelo SWAT para reproducir tendencias temporales (Phuong, Thong, Ngoc, & Chuong, 2014).

Mientras más cercano a 1 sea el valor del NSE, más preciso es el modelo mientras que, valores menores a 0.2 son inadmisibles y muestran que el modelo no es válido. El coeficiente de NSE se calcula con la ecuación 1.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

- n** es el número de puntos de información registrados.
- Q_{obs}^i es la Información observada.
- Q_{sim}^i es la Información simulada.
- i** es el lapso de tiempo
- \bar{Q}^{obs} es la media de los datos observados en los n lapsos de tiempo de evaluación.

El PBIAS es usado para determinar si la tendencia promedio de los datos simulados es mayor o menor que sus contrapartes observadas (Gupta, P.O., & A., 1999) (ver Ecuación 2). El valor cero representa precisión perfecta del modelo, mientras que valores negativos representan que el modelo está subestimando el efecto real y, por otro lado, valores positivos representan una sobreestimación. Por último, si el valor absoluto del PBIAS es mayor o igual a 25, $|PBIAS| \geq 25$, el valor se considera defectuoso.

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs}^i - Q_{sim}^i \times 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}^i} \right) \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde los parámetros anteriores son los mismos para el NSE.

También se han realizado investigaciones usando el modelo SWAT en Latinoamérica, por ejemplo, una de ellas se realizó específicamente en la cuenca del río Tecolutla ubicado en México. En ella se estimó la carga de sedimentos, para posteriormente recomendar

prácticas de conservación, con la finalidad de reducir el transporte de sedimentos. La extensión de la cuenca estudiada es de 7,446 Km², mientras que su altitud oscila entre los -10 msnm y los 3502 msnm y dada su extensión, presenta también una gran diversidad de climas (INEGI, 2005).

En este trabajo se calcularon los datos de evapotranspiración por separado y para el cálculo de la evaporación se usaron funciones exponenciales de la profundidad del suelo y el contenido de agua, mientras que la transpiración se calculó mediante una función lineal de la evapotranspiración potencial (ETP). Así mismo, menciona los tres métodos que el modelo SWAT posee para calcular la ETP, que son los siguientes: Hargreaves, Priestley-Taylor y Penman – Monteith. Por último, el estudio utiliza la ecuación de pérdida de suelo modificada (MUSLE) (ver Ecuación 3), uno de los aspectos más importantes del modelo SWAT (Osuna-Osuna, et al., 2015).

$$sed = 11.8(Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times CFRG \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

| | |
|--------------------------------|---|
| sed | es la producción de sedimentos. |
| Q_{surf} | es el volumen de escorrentía superficial. |
| q_{peak} | es tasa de escorrentía pico. |
| $area_{hru}$ | es el área de la Unidad de Respuesta Hidrológica. |
| K | es el factor de erosibilidad. |
| C | es el factor de cobertura vegetal (proviene de USLE). |
| P | es el factor USLE para manejo de cultivos. |
| LS | es el factor topográfico de USLE. |
| $CFRG$ | es el factor de fragmento macro. |

Además de la ecuación MUSLE (ecuación 3), existen otras dos ecuaciones conocidas para la estimación de sedimentos: las ecuaciones RUSLE y USLE. RUSLE es la ecuación universal revisada de la pérdida de suelo, mientras que USLE es la ecuación universal de pérdida de suelo. La metodología RUSLE es, en general, superior a la USLE, aunque también tiene limitaciones y tanto RUSLE como MUSLE resultan de modificaciones a la ecuación USLE y ello será explicado más ampliamente en la sección 2.4.2 Erosión.

2.2. El Ciclo Hidrológico

Durante siglos, el ciclo hidrológico no fue comprendido por filósofos y científicos, quienes no creían que fuera posible que los ríos fueran producidos solo por las lluvias, teniendo teorías bastantes alejadas de la realidad (Sánchez San Román, 2004).

El ciclo hidrológico puede verse como un sistema con diversos componentes que lo conforman como son la precipitación, la evaporación, escorrentía y otras partes conectadas entre sí (Chow, Maidment, & Mays, 1994) (ver Figura 3).

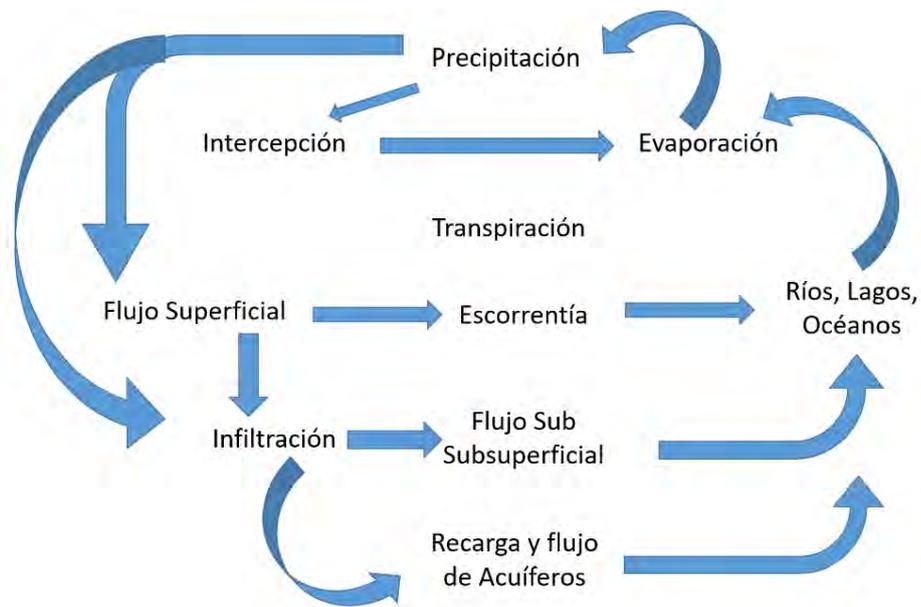


Figura 3. Representación esquemática del ciclo hidrológico

2.2.1. Evaporación y evapotranspiración.

La evaporación es una etapa permanente del ciclo del agua, ello ocurre en todo momento y desde toda la superficie terrestre. Mientras que la evaporación es considerada un proceso puramente físico, existe otro tipo de evaporación, denominado transpiración, que se produce por las plantas ubicadas en la cuenca (Chereque Mórán, 1989).

La evaporación suele estar afectada por factores como la radiación solar, la humedad del aire, la temperatura, el viento, la presión atmosférica y la altitud. El cálculo de la evaporación que se produce en una cuenca depende de las extensiones de la misma, así como de las condiciones climáticas, debido a su gran variabilidad, se suele calcular experimentalmente en periodos de tiempo determinado con el uso de aparatos de medición, tales como los tanques y el evaporímetro.

La evaporación en embalses o cuerpos de agua (lagunas) se suele calcular usando el balance hídrico, este método consiste en cuantificar las entradas y salidas de agua, de tal manera que la evaporación sea una variable más (ver Ecuación 4).

$$V1 + E + P - S - I - Ev = V2 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

- V1** es el volumen de agua almacenado inicialmente.
- E** es el volumen de entrada.
- P** es el volumen producto de la precipitación.
- S** es el volumen de salida.
- I** es el volumen que depende de la infiltración.
- Ev** es el volumen evaporado.
- V2** es el volumen de agua almacenado final.

Para el cálculo de la evaporación se puede usar el monograma de Penman, el cual se basa en un balance de energía, en este cálculo se emplea la cantidad de radiación solar, que depende de la latitud en la que se encuentre la zona de estudio y el mes de estudio. Por otro lado, los métodos computacionales suelen calcular la evaporación siempre y cuando se tenga los registros climatológicos necesarios, como radiación solar, precipitación, temperatura y humedad.

Dado que estudiar los procesos de evaporación y transpiración por separado resultaría en cálculos engorrosos, se calculan ambos de manera conjunta. Este efecto combinado es conocido como evapotranspiración. Existen diversos métodos para su cálculo, pero todos dependen tanto del tipo de cultivo o vegetación existente, como de la latitud de la zona de estudio y el lapso de tiempo en el que se realiza. Los métodos más populares basados en experiencias son los de Thornthwaite y el método de Blaney – Criddle.

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: la evaporación del cultivo de referencia (ET_o), la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$). El ET_o se relaciona con el poder evaporante de la atmósfera, mientras que el ET_c está relacionado con la evapotranspiración en condiciones óptimas de cuidado según las condiciones climáticas, y por último el $ET_{c_{aj}}$ es la evapotranspiración bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a las de ET_c debido a factores o condiciones de campo que afectan el correcto crecimiento del cultivo (Allen, 2006).

2.2.1.1. Método del balance de energía.

Este método consiste en cuantificar el intercambio de energía entre la atmósfera y la superficie (ver Ecuación 5) y para su aplicación, es necesario conocer todas las fuentes de energía y medir la cantidad de energía que se transfiere de la atmósfera a la superficie y viceversa dentro de un lapso de tiempo.

$$R_n = G + \lambda ET + H \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde:

| | |
|--------------------------------|---|
| R_n | es la radiación neta a la superficie. |
| G | es el flujo de energía intercambiado en forma de calor. |
| λET | es el calor latente, calor requerido para que una unidad de agua se evapore. |
| H | es el calor sensible, calor transmitido por la diferencia de temperaturas entre la atmósfera y la superficie. |

2.2.1.2. Método basado en el balance hídrico del suelo.

La evapotranspiración se puede calcular mediante una expresión similar a la del balance hídrico (ver Ecuación 6). Para la aplicación de este método, es necesario cuantificar las

entradas y salidas de agua en la zona del cultivo que será examinada. En otras palabras, se mide el contenido de agua durante un lapso de tiempo.

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

| | |
|-------------------------------|--|
| ET | Es la evapotranspiración. |
| R | es el riego. |
| P | es la precipitación. |
| ES | es el escurrimiento superficial. |
| D | es la percolación profunda |
| C | es la capilaridad |
| ΔFS | son los flujos subsuperficiales |
| ΔSW | es el cambio de almacenamiento del suelo |

Este balance hídrico del suelo suele emplearse para estimar la evapotranspiración en periodos semanales o superiores (Allen, et al., 1998)

2.2.1.3. Métodos numéricos de estimación de la evapotranspiración de los cultivos.

La complejidad del cálculo de la evapotranspiración empujó el desarrollo de metodologías más simples y más precisas, como la metodología basada en la evapotranspiración de referencia, que utiliza parámetros climáticos y un coeficiente de cultivo (ver Ecuación 7).

Este modelo es empleado por gran variedad de softwares existentes en el mercado debido a su gran versatilidad, sin embargo, es necesario calibrar y validar los modelos antes de usarlos. Este método de estimación es el que utiliza la herramienta SWAT como parte de su proceso de simulación.

$$ET_{act} = K_c \times K_s \times ET_{ref} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

| | |
|------------------------------|---|
| ET_{act} | es la evapotranspiración real. |
| K_c | es el coeficiente de cultivo. |
| K_s | es el coeficiente de estrés sobre los cultivos. |
| ET_{ref} | es la evapotranspiración de referencia. |

2.2.2. Escorrentía e infiltración.

La escorrentía es un producto de la precipitación que se caracteriza por alimentar las corrientes superficiales y se presenta en tres formas: escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial y escorrentía subterránea. El cálculo de la escorrentía se realiza tomando en cuenta factores como la precipitación, la temperatura, la geografía, la morfología, la

profundidad de la capa freática y la permeabilidad del suelo, esta última depende del tipo de suelo, la cobertura vegetal y las actividades antrópicas.

Definimos a la infiltración como el proceso por el cual el agua de escorrentía se introduce en el suelo por su superficie. El agua infiltrada llega al subsuelo para introducirse a los flujos subterráneos, que conforman el flujo base de las cuencas.

Muchos factores influyen en el volumen de agua que se infiltra, entre estos la cobertura vegetal, el estado del suelo, la pendiente, la conductividad hidráulica, el contenido de humedad, entre otras (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Para su cálculo, existe una gran variedad de coeficientes de escorrentía producto de experimentos de investigadores según la textura de suelo (ver Tabla 1), en condiciones pre-definidas. Los factores más determinantes en el valor del coeficiente son el uso de suelo, la pendiente, la textura, la extensión y la lluvia anual.

Tabla 1. Tabla de Prevert (1986)

| Uso de suelo | Pendiente (%) | Arenoso – Limoso | | Limoso |
|------------------|---------------|------------------|------------------|-----------|
| | | Limoso – arenoso | Limoso – arenoso | Arcilloso |
| Bosque | 0 – 5 | 0.10 | 0.30 | 0.40 |
| | 5 – 10 | 0.25 | 0.35 | 0.50 |
| | 10 – 30 | 0.30 | 0.40 | 0.60 |
| | >30 | 0.32 | 0.42 | 0.63 |
| Pastizal | 0 – 5 | 0.15 | 0.35 | 0.45 |
| | 5 – 10 | 0.30 | 0.40 | 0.55 |
| | 10 – 30 | 0.35 | 0.45 | 0.65 |
| | >30 | 0.37 | 0.47 | 0.68 |
| Cultivo agrícola | 0 – 5 | 0.30 | 0.50 | 0.60 |
| | 5 – 10 | 0.40 | 0.66 | 0.70 |
| | 10 – 30 | 0.50 | 0.70 | 0.80 |
| | >30 | 0.53 | 0.74 | 0.84 |

Fuente: Rivera, 2013

2.2.2.1. Escorrentía superficial o directa.

Es la escorrentía que no se infiltra en ningún punto y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno. Cuando la capacidad de infiltración es inferior a la intensidad de la lluvia, el agua comienza a moverse por la superficie del terreno y se forma, entonces, una capa delgada de agua. Ésta se mueve por la acción de la gravedad según la pendiente del terreno y es frenada por las irregularidades del suelo y por la presencia de vegetación, hasta incorporarse a la red de drenaje, donde se junta con los otros componentes que constituyen la escorrentía total (Rivera, 2013).

2.2.2.2. Escorrentía sub-superficial o hipodérmica.

Es el agua que se infiltra en el suelo, pero no permanece por debajo de este. El flujo se mueve sub-horizontalmente para luego reaparecer súbitamente en la superficie como

manantial para terminar en microsurcos superficiales que lo conducirán a la red de drenaje (Rivera, 2013).

2.2.2.3. Escorrentía subterránea.

Cuando la precipitación se infiltra y el agua llega al nivel freático, se queda atrapada dentro del flujo subterráneo, la velocidad de los flujos subterráneos es bastante lenta, por lo que la velocidad se puede calcular con la Ley de Darcy (ver Ecuación 8).

$$V = K_p \times i \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde:

- V es la velocidad aparente del agua.
- K_p es el coeficiente de conductividad hidráulica o coeficiente de Darcy.
- i es el gradiente hidráulico.

En síntesis, la escorrentía es un proceso que tiene una duración larga y no se limita al tiempo en el que ocurre la precipitación, sino que tiene una evolución temporal aún después de que ella termine (ver Figura 4).

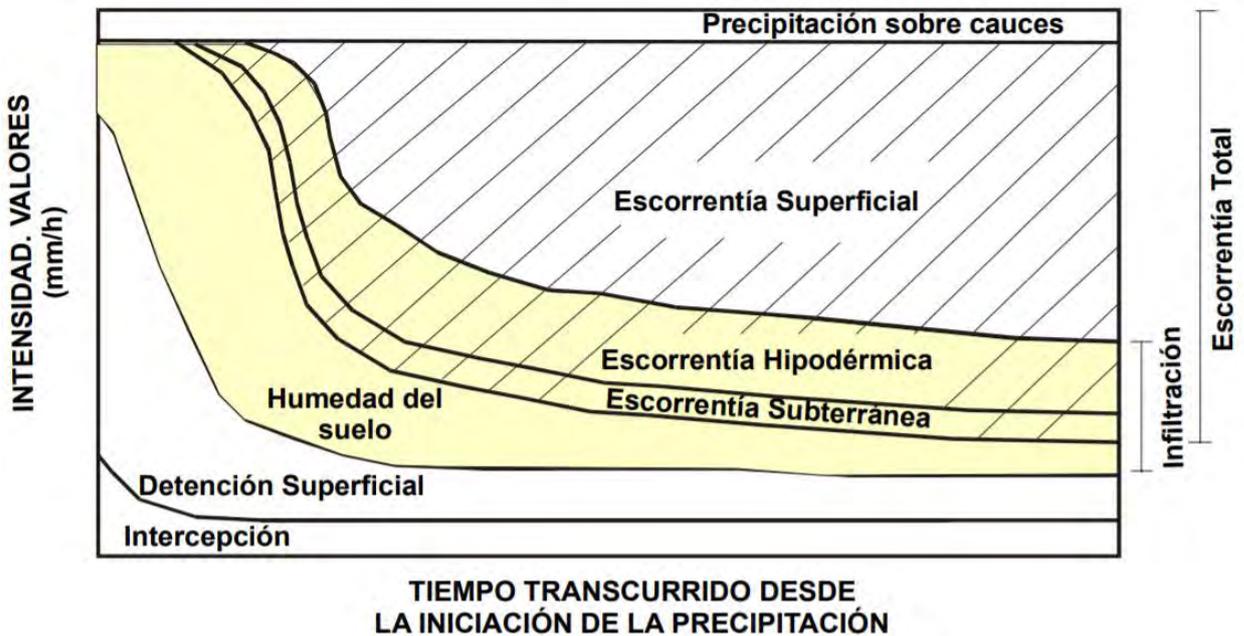


Figura 4. Evolución temporal de la escorrentía.

Fuente: Rivera (2013).

2.2.2.4. Cálculo de la infiltración.

El cálculo de la infiltración se puede llevar a cabo de varias maneras. Una de ellas es el modelo Horton, que aproxima las curvas de infiltración mediante una expresión exponencial (ver Ecuación 9).

La infiltración es el proceso del paso del agua hacia el suelo a través de su superficie, este proceso está relacionado a la percolación, la percolación es el movimiento del agua dentro del suelo, de tal manera, que el agua de las capas superiores del suelo se desplazan hacia las inferiores, además ocurre en simultaneo con el proceso de infiltración (Rivera, 2013).

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde:

- f_p es la capacidad de infiltración.
- f_c es la tasa mínima de precipitación.
- f_0 es la tasa máxima de precipitación al comienzo de la tormenta.
- k es una constante empírica.
- t es el tiempo transcurrido desde el inicio de la lluvia.

La cantidad acumulada de infiltración F al cabo del tiempo t se calcula integrando la capacidad de infiltración, lo que resulta en una ecuación que, combinada con la ecuación de Philip, (ver Ecuación 10) lo cual da la ecuación de infiltración acumulada (ver Ecuación 11)

$$f_p = \frac{bt^{-1/2}}{2} + a \quad \text{(Ecuación 10)} \quad F = bt^{1/2} + at \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Donde las variables a y b son constantes empíricas que dependen de la capacidad de absorción y de la conductividad hidráulica respectivamente.

Otra forma de obtener la infiltración y la escorrentía es mediante el análisis de un histograma (ver Figura 5), obtenido utilizando un pluviógrafo, sin embargo, este método tiene dos desventajas. La primera es que, para obtener los valores buscados, se necesita además realizar una estimación de la retención, lo que resulta complicado en sí mismo y la segunda, que este método puede resultar impreciso debido a que de antemano se basa en una suposición muchas veces falsa: que el suelo de la cuenca es homogéneo (Chereque Mórán, 1989).

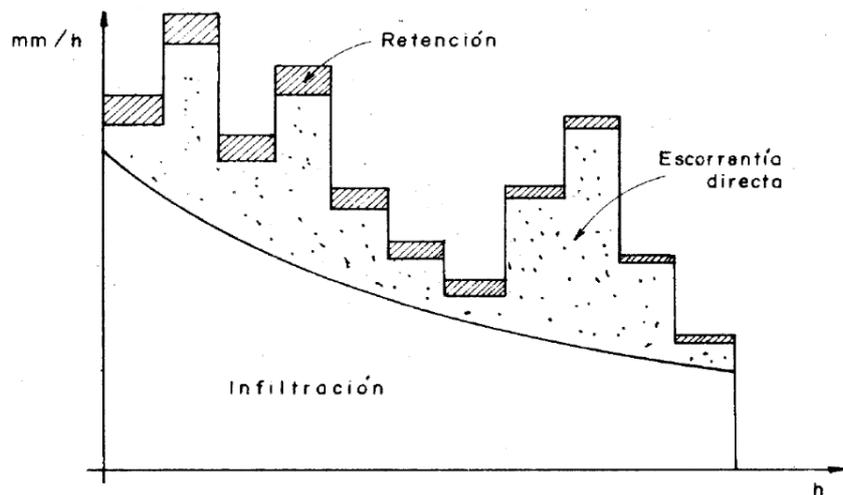


Figura 5. Histograma para la obtención de la escorrentía e infiltración

Fuente: Chereque Mórán (1989).

2.3. Factores Climáticos

La precipitación, la temperatura, la altitud, el viento, la radiación solar y la humedad relativa interactúan en una cuenca para dar origen al ciclo hidrológico. Por un lado, la precipitación depende fuertemente de la humedad, el viento y la altitud, pues es dependiendo de estos factores que las lluvias se presentan en sus diferentes tipos. Por otro lado, la magnitud de la evapotranspiración depende de la radiación solar y la temperatura, por lo tanto, para entender la dinámica en las cuencas se deben analizar los factores climáticos y factores antrópicos de manera conjunta, como parte de un todo en sinergia.

2.3.1. Precipitación.

Las precipitaciones son el factor más importante en los procesos erosivos. La ausencia de lluvias ocasiona la pérdida de cobertura vegetal y vuelve más vulnerable al suelo ante otros factores climáticos (viento, humedad, actividades económicas, etc.) y/o a una futura precipitación. Por otro lado, las precipitaciones de gran magnitud ocasionan avenidas, que hacen que el flujo del agua en el río tenga una mayor fuerza de arrastre de sólidos, provocando que partículas de mayor diámetro sean transportadas.

2.3.2. Temperatura.

La temperatura es un factor importante y fácilmente evaluable. Sus valores varían según la hora en que se realiza la medición y la estación del año. La temperatura es un parámetro tomado en cuenta para el cálculo de la evapotranspiración que resulta bastante conveniente, puesto que existen registros de temperaturas de casi cualquier lugar.

El ciclo hidrológico es un sistema abierto, donde la radiación solar otorga energía, generando el cambio de estado físico del agua y produciendo su circulación en la Tierra. Una parte de la energía queda dispersa en forma de calor lo que definimos como temperatura y está relacionada a la cantidad de humedad presente en el aire. A mayores temperaturas se presentará una mayor humedad en el aire, mientras que, a menor temperatura se presentara menor contenido de humedad en el aire.

La inversión de temperatura, o inversión térmica, se da al existir una diferencia de temperatura entre la superficie terrestre y las capas superiores. La inmersión térmica por lo general sucede después de una noche despejada con poco viento, provocando que al día siguiente el suelo tenga una temperatura baja, lo que da lugar al fenómeno conocido como "helada". Este fenómeno ocurre en la sierra peruana durante noches despejadas, que son comunes en la época de estiaje.

2.3.3. Humedad atmosférica.

La humedad es la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el ambiente, ella proviene de la evaporación en los cuerpos de agua, de la tierra húmeda o de las plantas.

El agua en la atmosfera existe en forma de vapor, la cantidad del agua en forma de vapor es pequeña y solo equivale a una parte en 100,000 del agua total en la tierra. La propiedad intensiva $\beta = dB/dm$ es la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire húmedo y se conoce como humedad específica (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

La abundancia de vapor de agua en la atmósfera se mide en términos de la humedad relativa (ver Ecuación 12), que mide la proporción de la cantidad de vapor de agua presente en el aire a una cierta temperatura, respecto a la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener la atmósfera a esa temperatura (Inzunza B., 2006).

Para obtener la humedad relativa, se emplean instrumentos de medición llamados higrómetros, el más simple de estos instrumentos es el sicrómetro. Tanto la humedad absoluta como la saturación máxima son fácilmente calculables una vez medida la humedad relativa.

$$hr = \frac{e_a}{e_s} \times 100\% \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Donde:

- h_r es la humedad relativa.
- e_a es la presión de vapor del agua.
- e_s es la presión de vapor de saturación a la misma temperatura.

La humedad relativa y la temperatura son valores esenciales para calcular el punto de rocío y se define el punto de rocío como la temperatura mínima a la que la humedad empieza a condensarse.

2.3.4. Radiación solar.

La radiación solar tiene un rol importante en el clima, puesto que la evapotranspiración depende principalmente de este factor. Existen dos tipos de radiación: la radiación difusa, que proviene de la radiación dispersa en la atmósfera y la radiación directa, que llega directamente a la superficie terrestre.

De toda la radiación solar que llega a la atmósfera, solo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra, mientras que un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa hacia la superficie. Es decir, un 51% de la radiación solar que llega a la atmósfera llega a la superficie terrestre, por otro lado, un 19% es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El 30% restante se pierde hacia el espacio de diferentes maneras: atmósfera dispersa un 6%, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4%. Entonces, la radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes (Inzunza B., 2006).

Para conseguir datos de la radiación solar, se suele recurrir a aparatos de medición como los radiómetros y heliógrafos. Sin embargo, en el Perú existe poca o nula información de la radiación solar, por lo que es necesario usar valores generales basados en la posición geográfica y en el mes de análisis (ver Tabla 2).

Tabla 2. Valores de cantidad de radiación solar en calorías por día en un 1 cm²

| Latitud Sur | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 0° | 885 | 915 | 925 | 900 | 850 | 820 | 830 | 870 | 905 | 910 | 890 | 875 |
| 10° | 965 | 960 | 915 | 840 | 755 | 710 | 730 | 795 | 875 | 935 | 955 | 960 |
| 20° | 1020 | 975 | 885 | 765 | 650 | 590 | 615 | 705 | 820 | 930 | 1000 | 1025 |
| 30° | 1050 | 965 | 830 | 665 | 525 | 460 | 480 | 595 | 750 | 900 | 1020 | 1065 |
| 40° | 1055 | 925 | 740 | 545 | 390 | 315 | 345 | 465 | 650 | 840 | 995 | 1080 |
| 50° | 1035 | 865 | 640 | 415 | 250 | 180 | 205 | 325 | 525 | 760 | 975 | 1075 |

Fuente: (Allen R. G., Pereira, Raes, & Smith, 2006)

2.3.5. Viento.

El viento es otro factor a tomar en cuenta, dado que influye en el clima transportando la humedad, el calor y las nubes. Este factor es muy susceptible a la geografía de cada lugar y a su ubicación geográfica. En Perú, por ejemplo, los vientos fuertes ocurren con mayor intensidad en el litoral, alrededor de Chiclayo y Piura, debido a que se encuentra en una saliente, también se pueden encontrar fuertes vientos en el sur peruano, sobre todo

alrededor de Puno y el sur de Cusco. El orden de magnitud de la velocidad del viento se clasifica en una escala de 13 grados (ver Tabla 3).

Debido al efecto Coriolis, en el hemisferio sur el viento se desvía hacia la izquierda, haciendo que gire en sentido antihorario (horario) alrededor de los centros de altas (bajas) presiones, y por efecto de la fricción se desvía respecto a las isobaras, adquiriendo una componente de velocidad desde las altas hacia las bajas presiones. El aire siempre se mueve desde la alta hacia la baja presión (se puede ver por ejemplo cuando se desinfla un globo) (Inzunza B., 2006).

Tabla 3. Escala de Beaufort

| Grados | Velocidad del viento (km/h) |
|---------------------|------------------------------------|
| Calma | 0 – 1 |
| Ventolina | 2 – 6 |
| Viento suave | 7 – 12 |
| Viento leve | 13 – 18 |
| Viento moderado | 19 – 26 |
| Viento regular | 27 – 35 |
| Viento fuerte | 36 – 44 |
| Viento muy fuerte | 45 – 54 |
| Temporal | 55 – 65 |
| Temporal fuerte | 66 – 77 |
| Temporal muy fuerte | 78 – 90 |
| Tempestad | 91 – 104 |
| Huracán | > 104 |

Fuente: Chereque Mórán, 1989

2.4. Erosión del Suelo y Transporte de Sedimentos

La erosión es la principal causa de pérdida de suelos alrededor del mundo. Este problema se ha visto agravado por el incesante uso del suelo para actividades productivas (agricultura, ganadería, silvicultura, etc.), lo que hace necesario tomar medidas de mitigación. Para poder plantear medidas efectivas, la estimación del grado de erosión, para lo que se usan ecuaciones como RUSLE, USLE y MUSLE, resulta indispensable.

La pérdida de suelos debido a la erosión hídrica es un problema aún más grave en países en vías desarrollo, debido a la falta de información actualizada que podría utilizarse para tomar medidas preventivas. Este es el caso en Perú, en efecto, los últimos estudios al respecto fueron realizados por el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) en 1996 y solo proveen información cualitativa de los procesos erosivos. (Rosas Barturén, 2016).

El transporte de sedimentos estudia cómo los sedimentos, producto de la erosión, viajan a través de las corrientes y ríos. El movimiento de las partículas en un curso de agua se

presenta de tres formas: sedimentos suspendidos, que debido a su menor tamaño o a las altas velocidades del río se encuentran en movimiento junto con el flujo, y sedimentos transportados en el lecho móvil, que son de mayor tamaño y son llevadas por la fuerza de arrastre de la corriente de agua, y una forma intermedia entre las dos anteriores, en la que los sedimentos se mueven dando saltos, que sin embargo son casi imperceptibles en el agua.

2.4.1. Clasificación de suelos.

La clasificación de los suelos no es uniforme en todo el mundo, sino que difieren dependiendo del lugar en que fueron creadas o por el uso que se le da al suelo. Por ejemplo, para la ingeniería civil las clasificaciones más comunes y usadas son las planteadas por el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) y el AASTHO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes por sus siglas en inglés), sin embargo, estas clasificaciones no son útiles para un estudio hidrológico. Para este tipo de estudios se utilizan más bien clasificaciones propuestas por los departamentos o ministerios de agricultura.

El suelo es un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de la tierra, que ocupa un espacio y que se caracteriza por tener al menos una de las siguientes características: 1) cuenta con capas que se distinguen del material inicial, como respuesta de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o 2) tiene la habilidad de soportar vegetación en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 1999).

2.4.1.1. Clasificación de la FAO.

La clasificación propuesta por la FAO se realizó a nivel mundial y para cada continente. El volumen IV es el que hace referencia a América del Sur. Lamentablemente, la precisión de la clasificación propuesta es baja, debido a la considerable extensión territorial del continente.

Las unidades de Suelo en América del Sur (ver Tabla 4) están representadas por símbolos correspondientes a una letra mayúscula, mientras que las subunidades correspondientes se representan por una letra minúscula adyacente. Luego, se colocan números 1, 2 o 3 para la textura del suelo (grueso, medio o fino, respectivamente), y por último, se agrega una letra “a”, “b” o “c” dependiendo del grado de inclinación de la superficie (llana a suavemente ondulada, fuertemente ondulada a colinosa o fuertemente socavada a montañosa, respectivamente) (FAO - Unesco, 1971).

Tabla 4. Clasificación de suelos para América del Sur FAO

| | |
|--|---|
| <p>A – ACRISOLES Af Acrisoles férricos Ag Acrisoles gléyicos Ah Acrisoles húmicos Ao Acrisoles árticos Ap Acrisoles plinticos</p> | <p>P - PODSOLES Pg Podsoles gléyicos Ph Podsoles htmicos XI Xerosoles Po Podsoles árticos</p> |
| <p>B – CAMBISOLES Bd Cambisoles districos Be Cambisoles éútricos Bf Cambisoles ferrálicos Bh Cambisoles húmicos Bk Cambisoles cálcico</p> | <p>Q - ARENOSILES Qa Arenosoles albicos Qf Arenosoles ferrálicos</p> |
| <p>E - RENDZINAS</p> | <p>R – REGOSILES Rd Regosoles districos Re Regosoles eútricos</p> |
| <p>F – FERRALSILES Fa Ferralsoles drcicos Fh Ferralsoles húmicos Fo Ferralsoles órticos Fp Ferralsoles plinticos Fr Ferralsoles ródicos Fx Ferralsoles xdticos</p> | <p>S – SOLONETZ Sm Solonetz málico So Solonetz ártico</p> |
| <p>G – GLEYSILES Gc Gleysoles calcáreos Gd Gleysoles districos Ge Gleysoles éútricos Gh Gleysoles húmicos Gm Gleysoles mólicos Gp Gleysoles plinticos</p> | <p>T - ANDOSILES Th Andosoles htmicos Tm Andosoles mélicos To Andosoles ócricos Tv Andosoles vitricos</p> |
| <p>H – PHAEZEMS Hh Phaeozems hdplicos HI Phaeozems lúvicos</p> | <p>U - RANKERS</p> |
| <p>I – LITOSILES</p> | <p>V – VERTISILES Ve Vertisoles crámicos Vp Vertisoles pélicos</p> |
| <p>J – FLUVISILES Je Fluvisoles calcaricos Jd Fluvisoles districos Je Fluvisoles éútricos Jt Fluvisoles tienicos</p> | <p>W – PLANOSILES Wd Planosoles districos We Planosoles eútricos Wh Planosoles hilmicos Wm Planosoles málicos Ws Planosoles solóclicos</p> |
| <p>K – KASTANOZEMS Kh Kastanozems háplicos Kk Kastanozems cálcicos KI Kastanozems l úvicos</p> | <p>X – XEROSILES Xh Xerosoles háplicos Xk Xerosoles cálcicos XI Xerosoles lúvicos</p> |
| <p>L - LUVISILES Le Luvisoles crámicos Lf Luvisoles férricos Lo Luvisoles árticos Lp Luvisoles plinticos</p> | <p>Y - YERMOSILES Yh Yermosoles háplicos Yk Yermosoles cálcicos YI Yermosoles lfivicos</p> |
| <p>N - NITOSILES Nd Nitosoles distrieos Ne Nitosoles éútricos</p> | <p>Z – SOLONCHAKS Zg Solonchaks gleyieos Zo Solonchaks árticos</p> |
| <p>O - HISTOSILES Od Histosoles districos</p> | |

Fuente: (FAO - Unesco, 1971)

2.4.1.2. Clasificación taxonómica (USDA).

La clasificación taxonómica propuesta y usada por la USDA toma en cuenta ciertas consideraciones, entre ellas las siguientes: si la superficie está siempre cubierta por agua a una profundidad mayor que 2.5 m, no se considera suelo, los suelos están delimitados por capas horizontales paralelas a la superficie en sus estratos, ya que, debido a la complejidad de los suelos, resulta difícil saber cuál es el límite inferior de cada capa, se considera, de manera arbitraria, el valor de 200 cm como el límite inferior de cada capa, etc. (Soil Survey Staff, 2014).

Para la clasificación taxonómica, se consideran, primero, los horizontes según su profundidad (superficiales o subsuperficiales) y segundo, las características de diagnóstico de suelos (suelos minerales o suelos orgánicos), y tercero, las características de diagnóstico de suelos alterados y transportados por el ser humano.

La diferencia entre suelos minerales y suelos orgánicos es, por lo tanto, extremadamente importante para la clasificación. Para su identificación, es necesario observar tanto las características como el contenido de minerales que tiene un suelo. Las definiciones son bastante específicas y diferencian entre uno y otro de manera eficiente. Para un mayor detalle acerca de las respectivas definiciones, se recomienda revisar la documentación de la USDA.

Existen 12 órdenes diferentes (Alfisols, Andisols, Aridisols, Entisols, Gelisols, Histosols, Inceptisols, Mollisols, Oxisols, Spodosols, Ultisols y Vertisols), 63 subórdenes, aproximadamente 300 grandes grupos, más de 1400 subgrupos, familias y series. La clasificación, por lo tanto tiene 6 niveles y resulta altamente compleja.

2.4.2. Erosión.

La erosión se calcula usualmente por medio de fórmulas desarrolladas por la USDA, la agencia de agricultura de Estados Unidos, por otra parte, la erosión se presenta en distintas formas según el Glosario de Términos de la Comisión Latinoamericana de Irrigación y Drenaje (CLAID). Ellas son: la erosión en cárcavas, la erosión laminar, la erosión en surcos y la erosión eólica (Rocha, 1998).

2.4.2.1. Ecuación de USLE.

La ecuación de USLE (ver Ecuación 13) fue desarrollada por W. H. Wischmeier, D. D. Smith y otros junto con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el Servicio de Investigación Agrícola (ARS), el Servicio de Conservación del Suelo y la

Universidad Purdue a finales de la década de los 50 (Renard, Foster, Weesies, & Porter, 1991).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad \text{(Ecuación 13)}$$

Donde:

- A** es la pérdida de suelo en toneladas por hectárea y año.
- R** es el factor de escorrentía pluvial en toneladas por hectárea.
- K** es el factor de erosionabilidad del suelo.
- LS** es el factor de topografía.
- C** es el factor de cobertura y manejo.
- P** es el factor de soporte práctico.

La ecuación básicamente expresa la pérdida de suelo por unidad de área debido a la lluvia, pero no incluye la erosión eólica y no da estimaciones directas de generación de sedimentos (Novotny & Olem, 1994).

2.4.2.2. Ecuación de RUSLE.

La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) es una herramienta poderosa empleada para la conservación de suelos en Estados Unidos y en otros países alrededor del mundo. La investigación y la experiencia con esta herramienta desde la década de 1970 han proporcionado una tecnología mejorada, que fue incorporada a la ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE) (Renard, Foster, Weesies, & Porter, 1991).

La ecuación RUSLE es un modelo de erosión diseñado para predecir la cantidad promedio anual de las pérdidas de suelo transportadas por la escorrentía en campos y laderas específicos. El uso generalizado ha corroborado la utilidad y la validez de RUSLE para este fin (Renard, 1997).

2.4.2.3. Ecuación de MUSLE.

La ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE) se deriva de la ecuación USLE (ver Ecuación 13). La diferencia radica en la adición de la escorrentía media y la escorrentía máxima como valores independientes (ver Ecuación 14), además, la adición de estos factores genera una mejor precisión respecto a la ecuación universal en su versión original (USLE) y en su versión revisada (RUSLE).

La ecuación MUSLE es aplicable en puntos en los que el flujo sobre el suelo ingresa a cursos de agua. Luego, estos puntos se juntan y dan como resultado la cantidad de sedimento transportado en la cuenca (Williams, 1975).

$$SY = 11.8 \times (Q \times q_p)^{0.56} \times K \times LS \times C \times P \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

| | |
|----------------------|---|
| SY | es la pérdida de suelo en toneladas por hectárea y año. |
| Q | es el escurrimiento medio. |
| q_p | es el escurrimiento máximo. |
| K | es el factor de erosionabilidad del suelo. |
| LS | es el factor de topografía. |
| C | es el factor de cobertura y manejo. |
| P | es el factor de soporte práctico. |

2.4.3. Teoría de transporte de sedimentos.

Se mencionó anteriormente que existen 3 tipos de movimiento, ello se debe a la distribución de velocidades, a la distribución de las concentraciones y a la fuerza de corte (ver Figura 6). Existen dos formas de analizar la iniciación del movimiento: por medio del cálculo de la fuerza tractiva o por medio del cálculo de la velocidad crítica.

La fuerza tractiva es la fuerza que ejerce la corriente de agua sobre el fondo y el movimiento de las partículas en el fondo comienza cuando la fuerza tractiva iguala a la fuerza tractiva crítica.

La iniciación del movimiento no sólo es difícil de determinarse, sino también de definirse, por ejemplo, en un lecho natural hay partículas de la más diversa granulometría. En principio, cada partícula tiene su propia velocidad crítica, en un lecho constituido por un material de granulometría uniforme, por ejemplo, todas las partículas no son exactamente iguales, ni sufren de la misma forma la acción de la turbulencia, por lo que la iniciación del movimiento es un fenómeno esencialmente probabilístico (Rocha, 1998).

Por otra parte, el transporte sólido en suspensión se genera cuando la velocidad de corte es mayor que la velocidad de caída. No obstante, no es necesario que la velocidad de corte sea idéntica a la de caída, según Engelund, basta que la velocidad de corte sea un cuarto de la velocidad de caída para iniciar el movimiento en suspensión.

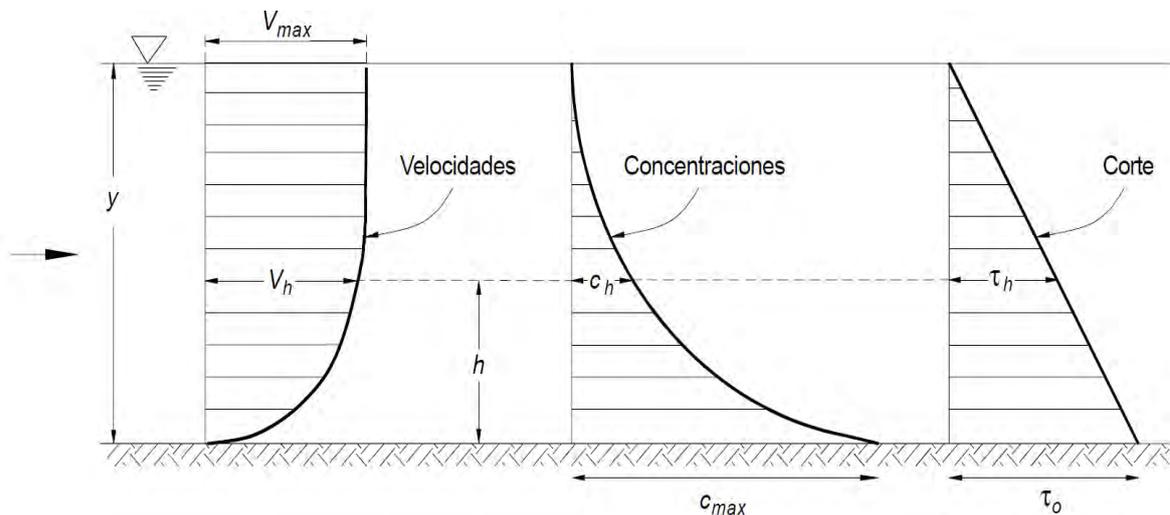


Figura 6. Distribución de velocidades, concentraciones y fuerza cortante.

Fuente: Rocha, 1998.

2.5. Modelación Hidrológica

Un modelo se define como la representación de un sistema que conceptualiza las interrelaciones y respuestas de las condiciones reales, y que además es capaz de hacer pronósticos bajo un conjunto de presuposiciones. En el ámbito de la modelación hidrológica, los modelos representan los fenómenos hidrológicos que hay en el ciclo del agua. Éstos, como aproximaciones de la realidad, pueden usarse para predecir el comportamiento real del sistema con cierto grado de confianza (Salgado R. & Güitrón de los Reyes, 2012).

Para obtener datos de precipitaciones más exactos, es preferible usar datos provistos por las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca de interés o en las cercanías de ella. En caso haya ausencia de datos, existen programas, tales como el producto PISCO, que pueden usarse para completar datos, lo que puede resultar muy útil para el análisis de periodos en que la información disponible es escasa.

Una vez que se tengan los datos, la modelación hidrológica para el cálculo de la carga de sedimentos se puede llevar a cabo mediante el uso del Sistema de Información Geográfica (SIG, en adelante; GIS, por sus siglas en inglés) y la Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua (SWAT, por sus siglas en inglés), además del programa SWAT-CUP para la calibración y validación de datos.

2.5.1. Producto Grillado PISCO – SENAMHI.

La baja densidad de las estaciones meteorológicas en el país amerita la utilización de procedimientos de regionalización e interpolación espacial para generar información en

sitios no instrumentados. Ello conlleva al uso de diferentes metodologías de acuerdo a los objetivos y criterios de cada investigador, lo cual adiciona un sesgo debido al uso de diferentes fuentes de datos y al diferente tratamiento de los mismos (Aybar Camacho, y otros, 2017).

El grillado PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) es un producto elaborado por SENAMHI (ver Figura 7. Estaciones utilizadas para generar el producto PISCO) con el fin de suministrar datos hidrológicos tales como la precipitación y la temperatura máxima y mínima. Este grillado cuenta con información que comprende el periodo de 1981 a 2016, un total de 36 años, de diversas zonas del país.

El uso de PISCO es reciente en estudios hidrológicos y suele acompañarse con el uso del lenguaje R y el uso de comandas para extraer información en coordenadas previamente indicadas. La validación del sistema para la zona Sur del Perú, específicamente la región Cusco, Apurímac y parte de Puno, tiene coeficientes de correlación bastante buenos, por lo que su uso para esta zona, en particular, resulta eficiente y confiable.

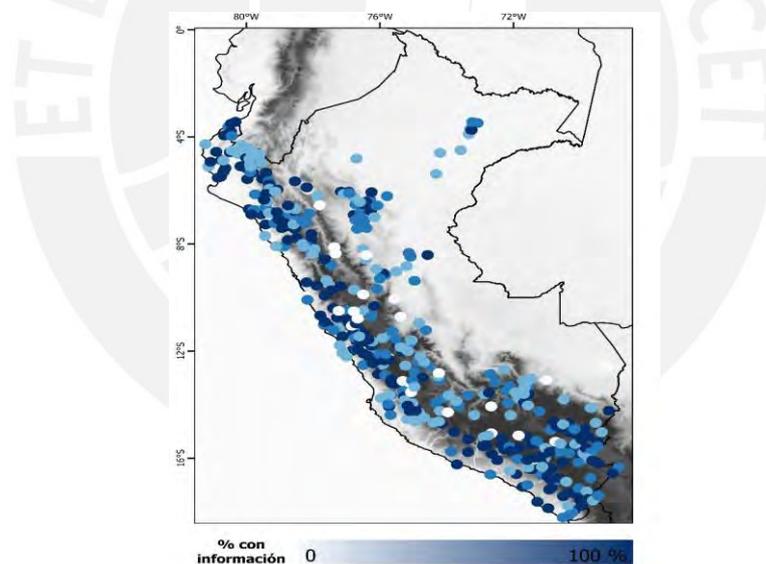


Figura 7. Estaciones utilizadas para generar el producto PISCO

Fuente: Aybar Camacho, y otros, 2017

2.5.2. Sistema de información geográfica.

Para poder generar un modelo hidrológico, es necesario conocer las condiciones de la zona a evaluar, tales como la topografía, la cobertura vegetal y el tipo de suelo presente en la cuenca, entre otros. En este sentido, es necesario contar con mapas que tengan la calidad y fineza necesaria para poder obtener una estimación exacta de los procesos

erosivos en una cuenca. Los modelos de elevación digital (DEM) son la materia prima a trabajar, estos modelos, generalmente generados a partir del procesamiento de imágenes satelitales, se encuentran disponibles de manera gratuita en páginas de internet de instituciones como la NASA y el USGS. Los DEM también se pueden obtener a partir de levantamientos, usando la geomática, que a su vez emplea drones u otros dispositivos.

La Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas define a los SIG como sistemas computarizados para el almacenamiento, la elaboración y la recuperación de información con equipos y programas informáticos expresamente concebidos para trabajar con datos geo-referenciados y sus correspondientes atributos temáticos (FAO, 2000).

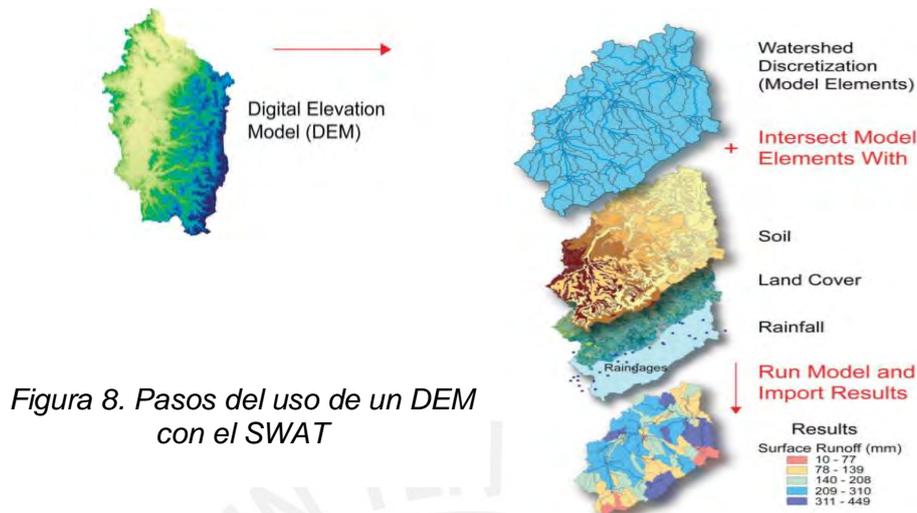
De entre los SIG, los programas más populares son el ArcGIS y el QGIS. Un SIG bien desarrollado proporciona herramientas para procesar y analizar datos geográficos de alto detalle espacial. Sin embargo, dependiendo de la cuenca, una gran cantidad de estos datos requiere pre-procesamiento y conversión antes de que pueda ser utilizado para la modelización hidrológica distribuida (León Ochoa, 2017).

2.5.3. Herramienta de evaluación del suelo y agua (SWAT).

El SWAT es una herramienta que puede ser definida como software para la generación de modelos hidrológico de una determinada cuenca bajo determinadas condiciones. Existen diversas versiones, entre ellas tanto para el ArcGIS como para el QGIS, este software permite realizar análisis en la cuenca que generan información necesaria para la planificación vinculada al uso de suelos, a actividades de reforestación, a la colocación de obras hidráulicas (obras de captación, embalses, canales, espigones, etc.), entre otras (Ruiz, 2014).

Los datos espaciales (DEM, del suelo y del uso de la tierra) se utilizan en la fase de pre-procesamiento y se introducen en el modelo SWAT a través de la interfaz (ver Figura 8). Una vez subido el DEM, se obtiene la topografía de la cuenca y, mediante el uso un SIG, se obtienen los cursos de aguas, posteriormente, se coloca un punto de salida en un punto del afluente. Seguidamente, el SWAT delimita la cuenca y genera subcuencas que cumplan ciertas características (extensión). Luego, con los mapas de uso de suelo y tipo de suelo, se generan HRU (Unidad Hidrológica de Respuesta), la cantidad apropiada HRUs depende de las características que esperamos que tenga cada una. A mayor cantidad de HRUs, se obtendrá un modelo más preciso, sin embargo, definir una gran cantidad de HRUs puede demorar o incluso imposibilitar el procesamiento. Una vez generadas las HRUs, el SWAT requerirá el ingreso de variables: precipitación diaria,

temperatura, humedad relativa, velocidad de viento en diferentes estaciones de control. Ya introducidos todos los datos requeridos, se procede a correr el modelo.



Fuente: Goodrich, y otros, 2011.

Para la introducción de las variables meteorológicas es necesario crear una base de datos de las estaciones existentes y para ello, se pueden usar tablas dinámicas de Excel, elaboradas usando Access o también existen bases de datos disponibles de manera gratuita para los usuarios de SWAT. Sin embargo, esta información es inexacta para la sierra y la selva peruanas, pues conduce a la sobrestimación de escorrentía y, por ende, de erosión.

2.5.4. Calibración y validación.

Las fuentes de incertidumbre para un modelo son principalmente de 4 tipos: en los datos de entrada, en los datos observados, en los valores de los parámetros y en la estructura del modelo. Los primeros errores, en los datos de entrada, pueden ser difíciles de corregir, en tanto pueden ser subproducto de métodos de interpolación que generan errores durante el proceso y los segundos, producto de las técnicas de medición en campo, son prácticamente imposibles de corregir. Por otro lado, los errores en los parámetros del modelo son mucho más sencillos de corregir. Además, los modelos son bastante sensibles a estos errores: valores de parámetros altos producen una sobrestimación respecto a los datos observados, mientras que valores bajos generan subestimaciones.

La calibración de los modelos determinísticos se basa en la idea general de que estos no usan términos aleatorios dentro del modelo, lo que implica que cada simulación que se realice dará el mismo resultado, siempre y cuando no se cambien los datos de entrada. La calibración, entonces, tiene el objetivo de minimizar diferencias entre diferentes

simulaciones, basándose en el ajuste de parámetros como criterio de exactitud (Cabrera, 2012).

Para lograr una calibración exitosa, se debe definir la “función objetivo”, la función es generalmente una forma de medir la bondad de ajuste. En el caso de la herramienta SWAT, se usa la eficiencia de Nash-Sutcliffe para medir la bondad de ajuste. Sin embargo, otras medidas de bondad de ajuste también son calculadas, para así analizar el rendimiento del modelo (Cabrera, 2012).

La validación del modelo, es la corroboración de la fidelidad del modelo, mediante la comparación entre los valores simulados vs los datos observados. Los criterios estadísticos medirán el rendimiento del modelo e indicaran el nivel de precisión del mismo.

En este trabajo, los procesos de calibración y validación se realiza mediante una herramienta llamada SWAT-CUP. Esta herramienta utiliza un archivo SWAT creado anteriormente. Requiere de los caudales observados diaria o mensualmente durante un periodo de por lo menos 5 a 6 años.

La prueba de muestra dividida diferencial (ver Figura 9), resulta la más óptima para el modelo a realizar. El SWAT simula caudales considerando las características de la cuenca, a partir de un registro de precipitaciones, radiación solar, temperatura, humedad y otros factores climáticos. También se cuenta con un registro de caudales observados.

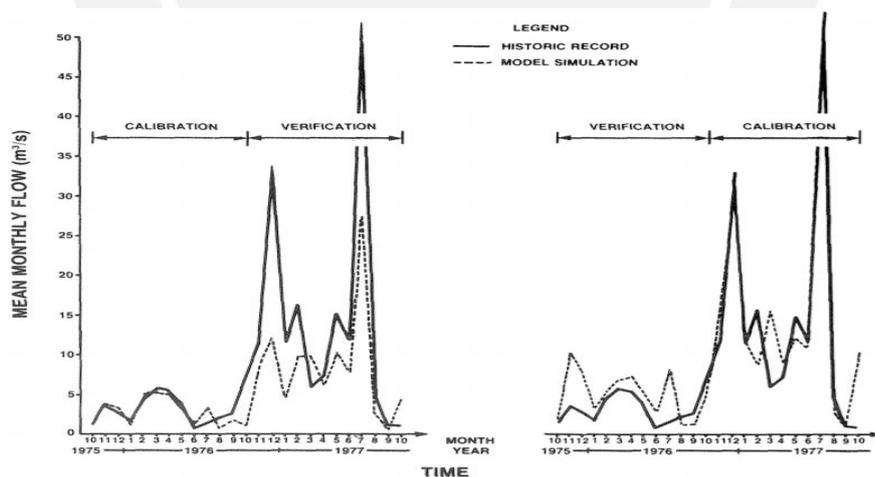


Figura 9. Ejemplo de aplicación de la prueba de muestra dividida diferencial.

Fuente: (Klemeš, 1986)

La prueba es necesaria cuando se simulan caudales en una cuenca determinada. Requiere una calibración utilizando datos históricos previos a los cambios de la condición, el ajuste de los parámetros y la validación en el periodo siguiente (Cabrera, Validación de modelos hidrológicos, 2012).

CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de Estudio

3.1.1. Ubicación.

La subcuenca de Pitumarca, es un espacio de la cuenca del Vilcanota, que pertenece políticamente a los distritos de Pitumarca y Checacupe de la provincia de Canchis y territorialmente el 95 % pertenece al distrito de Pitumarca y 5 % al distrito de Checacupe (IMA, 2006).

Los distritos en cuestión se ubican en el departamento de Cusco, provincia de Canchis. La ubicación de la población de Pitumarca se encuentra en la latitud: 13°58'49.50"S con la longitud: 71°25'2.59"O. este poblado es la capital del distrito de mismo nombre y es el que cuenta con la mayor densidad poblacional dentro de la cuenca.

3.1.2. Características.

Para comprender la modelación a realizar es necesario conocer las características de la cuenca, para lo cual se construyeron diversos mapas que muestran las características que se tienen, la extensión de la cuenca y su red hídrica fueron delimitadas usando el programa QGIS mediante su herramienta GRASS.

La cuenca del río Pitumarca es una subcuenca del río Vilcanota y tiene una extensión de 736.1km² y existe una población aproximada de 10'656 habitantes de los cuales 7'633 pertenecen al distrito de Pitumarca y 3'023 a Checacupe (IMA, 2006). La cuenca del río Pitumarca cuenta también con alrededor de 30 lagunas, una de las más importantes es la laguna Ccascana que tiene un área de 2.112 Km² y un volumen de 3.173 MMC (ver Tabla 5) (ATDR-SICUANI IRH - INRENA, 2005).

Tabla 5. Lagunas y presas dentro de la cuenca del río Salcca.

| CUENCA | CUENCA/INTERCUENCA | LAGUNAS | PRESAS |
|------------|--------------------------|---------|--------|
| RIO SALCCA | Baja de la Cuenca Salcca | 5 | |
| | Cullunuma - Huancane | 29 | |
| | Huancane – Urubamba | 5 | |
| | Río Accho | 15 | |
| | Río Cullunuma | 101 | 1 |
| | Río Huancane | 63 | |
| | Río Urubamba | 11 | |
| | Río Phinaya | 124 | |
| TOTAL | | 353 | 1 |

Fuente: IRH – INRENA, 2005

Según el IMA (Instituto de manejo de agua y medio ambiente) existen 85 microcuencas que conforman la cuenca del río Pitumarca (ver Tabla 6), a diferencia de IRENA la extensión de la cuenca del río Pitumarca para el IMA es de 690.38 Km², siendo 45.72 Km² la diferencia entre sus valores, se asume que ambos valores son válidos y sus diferencias se deben a la exactitud de la delimitación de la cuenca por el uso de DEM con más o menos precisión.

Tabla 6. Microcuencas que conforman la cuenca del río Pitumarca

| N° | Microcuenca | Ha | % | N° | Microcuenca | Ha | % |
|----|---------------------|----------|-------|--------------|---------------|-----------------|---------------|
| 1 | Allpacan | 163.11 | 0.24 | 45 | Jeuñayoc | 492.53 | 0.71 |
| 2 | Ananiso | 448.63 | 0.65 | 46 | Karwi | 413.40 | 0.60 |
| 3 | Anco Aje | 278.31 | 0.40 | 47 | Killitamayu | 1526.56 | 2.21 |
| 4 | Aqhobamba | 1433.45 | 2.08 | 48 | Labraco | 2435.28 | 3.53 |
| 5 | Arcatauri | 4436.87 | 6.42 | 49 | Labramani | 1766.85 | 2.56 |
| 6 | Cancahua | 674.28 | 0.98 | 50 | Livipampa | 377.12 | 0.55 |
| 7 | Canchapampa | 149.39 | 0.22 | 51 | Llantahui | 1091.07 | 1.58 |
| 8 | Ccaccachaca | 1863.03 | 2.70 | 52 | Llojo | 179.72 | 0.26 |
| 9 | Ccañocota | 187.56 | 0.27 | 53 | Marcarani | 460.91 | 0.67 |
| 10 | Ccasco Yunuj | 393.38 | 0.57 | 54 | Mayachani | 55.40 | 0.08 |
| 11 | Ccochajasa | 2118.51 | 3.07 | 55 | Misquiunuj | 2186.20 | 3.17 |
| 12 | Cconcha | 879.88 | 1.27 | 56 | Molloviri | 1352.55 | 1.96 |
| 13 | Ccorachiwita | 242.30 | 0.35 | 57 | Mulla | 770.77 | 1.12 |
| 14 | Chacomani | 1863.58 | 2.70 | 58 | Oqepuña | 282.29 | 0.41 |
| 15 | Chacochanco | 111.64 | 0.16 | 59 | Pachachani | 1388.35 | 2.01 |
| 16 | Chari | 1056.11 | 1.53 | 60 | Pacobamba | 71.42 | 0.10 |
| 17 | Chilli Cruz | 61.43 | 0.09 | 61 | Pacopata | 41.32 | 0.06 |
| 18 | Chimpacchilca | 77.37 | 0.11 | 62 | Panteñeque | 244.88 | 0.35 |
| 19 | Chullunquia | 682.39 | 0.99 | 63 | Patacchiwita | 114.02 | 0.17 |
| 20 | Collini | 99.66 | 0.14 | 64 | Phata Huaycco | 132.42 | 0.19 |
| 21 | Condorhuachana | 1195.22 | 1.73 | 65 | Puca Puca | 342.69 | 0.50 |
| 22 | Condoritana – 1 | 94.75 | 0.14 | 67 | Pucapunta | 93.34 | 0.14 |
| 23 | Condoritana – 2 | 38.80 | 0.06 | 68 | Pucutune | 477.21 | 0.69 |
| 24 | Condoritana – 3 | 25.83 | 0.04 | 69 | Pusa | 331.91 | 0.48 |
| 25 | Coricori – 1 | 93.69 | 0.14 | 70 | Qhaño | 1012.09 | 1.47 |
| 26 | Coricori – 2 | 1402.18 | 2.03 | 71 | Quenchacucho | 201.33 | 0.29 |
| 27 | Corimayo | 967.81 | 1.40 | 72 | Queshco | 353.60 | 0.51 |
| 28 | Curatera | 297.36 | 0.43 | 73 | Quille | 555.16 | 0.80 |
| 29 | Cuti – 1 | 312.21 | 0.45 | 74 | Quinraya | 128.19 | 0.19 |
| 30 | Cuti – 2 | 40.42 | 0.06 | 75 | Quispilloc | 154.50 | 0.22 |
| 31 | Hachocco | 1085.06 | 1.57 | 76 | Quiullacocha | 1551.31 | 2.25 |
| 32 | Hanchipacha | 93.94 | 0.14 | 78 | S/N | 50.07 | 0.07 |
| 33 | Hatunhuayco | 51.37 | 0.07 | 79 | Sallani | 1287.16 | 1.86 |
| 34 | Huallojane | 316.34 | 0.46 | 80 | Senca | 2034.48 | 2.95 |
| 35 | Huamanhuac | 69.69 | 0.10 | 81 | Sequenñamay | 1398.28 | 2.03 |
| 36 | Huamanripa | 109.39 | 0.16 | 82 | Socanayo | 1301.57 | 1.89 |
| 37 | Huantopuquica | 851.84 | 1.23 | 83 | Uchulluclo | 1414.46 | 20.5 |
| 38 | Huasahuasi – 1 | 97.45 | 0.14 | 82 | Yanachuccho | 127.37 | 0.18 |
| 39 | Huasahuasi – 2 | 45.50 | 0.07 | 83 | Yanacocha | 780.33 | 1.13 |
| 40 | Huayracunca | 353.49 | 0.51 | 84 | Yurac Salta | 224.67 | 0.33 |
| 41 | Intercuencas | 12897.21 | 18.66 | 85 | Zea | 680.03 | 0.98 |
| 42 | Japura Qquelco | 109.27 | 0.16 | 86 | Rios | 68.90 | 0.10 |
| 43 | Japurasuyo | 397.72 | 0.58 | | | | |
| 44 | Jatun Ojo | 918.67 | 1.33 | | | | |
| | | | | TOTAL | | 69037.80 | 100.00 |

Fuente: IMA, 2006

La cuenca al ser una zona con gran variedad de altitudes, cuenta con diferentes climas para cada altitud, sin embargo la variación temporal de la temperatura es bastante baja, salvo las ocasiones donde el fenómeno del niño se hace presente en nuestro país.

Por otro lado se observa una gran cantidad de precipitación media anual, la cual se estima en 1108 mm según el IMA. La mayor cantidad de precipitación se presenta en las zonas altas que se ubican entre los 5400 a 6300 msnm; mientras que la zona baja, 3400 a 3500 msnm presenta la menor cantidad de precipitación (ver Tabla 7).

El clima dentro de la cuenca del río Pitumarca es muy variado para las diferentes altitudes en la cuenca, ellas van de 3400 msnm hasta alcanzar los 6300 msnm y el rango de temperaturas va de 13 C° hasta los -4 C° (ver Tabla 7). Se puede observar que las áreas de mayor actividad económica se encuentran en las zonas con climas más favorables para la agricultura (ver Figura 10 y Figura 11). Sin embargo la extensión del área favorable para la agricultura es aproximadamente un sexto de la extensión total de la cuenca.

El clima influye directamente en la erosión que existe en la cuenca, los climas agresivos imposibilitan el crecimiento de vegetación dejando expuesto al suelo a los fenómenos meteorológicos. La relación clima y cobertura vegetal puede ser observada al comparar los respectivos mapas, además, la presencia de climas severos y ausencia de vegetación aceleran los procesos erosivos, ciertamente estos factores no son los únicos que influyen en la erosión pero si son determinantes para el volumen de sedimento generado.

Tabla 7. Clasificación climática de la subcuenca

| N | Descripción | Altitud (msnm) | Precipitación (mm) | Color en la Figura 14 | Temperatura (C°) | Superficie | |
|----------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------|
| | | | | | | Km² | % |
| 1 | Semiseco semifrío con invierno seco | 3400 – 3500 | 650 – 700 | Celeste | 13 – 12 | 2.58 | 0.37 |
| 2 | Semiseco frío con invierno seco | 3500 – 4300 | 700 – 1000 | Naranja claro | 12 – 7 | 101.10 | 14.64 |
| 3 | Lluvioso semifrío con invierno seco | 4300 – 4500 | 1000 – 1250 | Rojo | 7 – 6 | 82.03 | 11.88 |
| 4 | Lluvioso frío con invierno seco | 4500 – 5000 | 1000 – 1250 | Lila | 6 – 3 | 41.86 | 60.64 |
| 5 | Lluvioso frígido con invierno seco | 5000 – 5400 | 1000 – 1250 | Verde | 3 – 0 | 73.85 | 10.70 |
| 6 | Muy lluvioso gélido con invierno seco | 5400 – 6300 | 1250 – 1500 | Azul | 0 – -4 | 12.22 | 1.77 |

Fuente: IMA, 2006

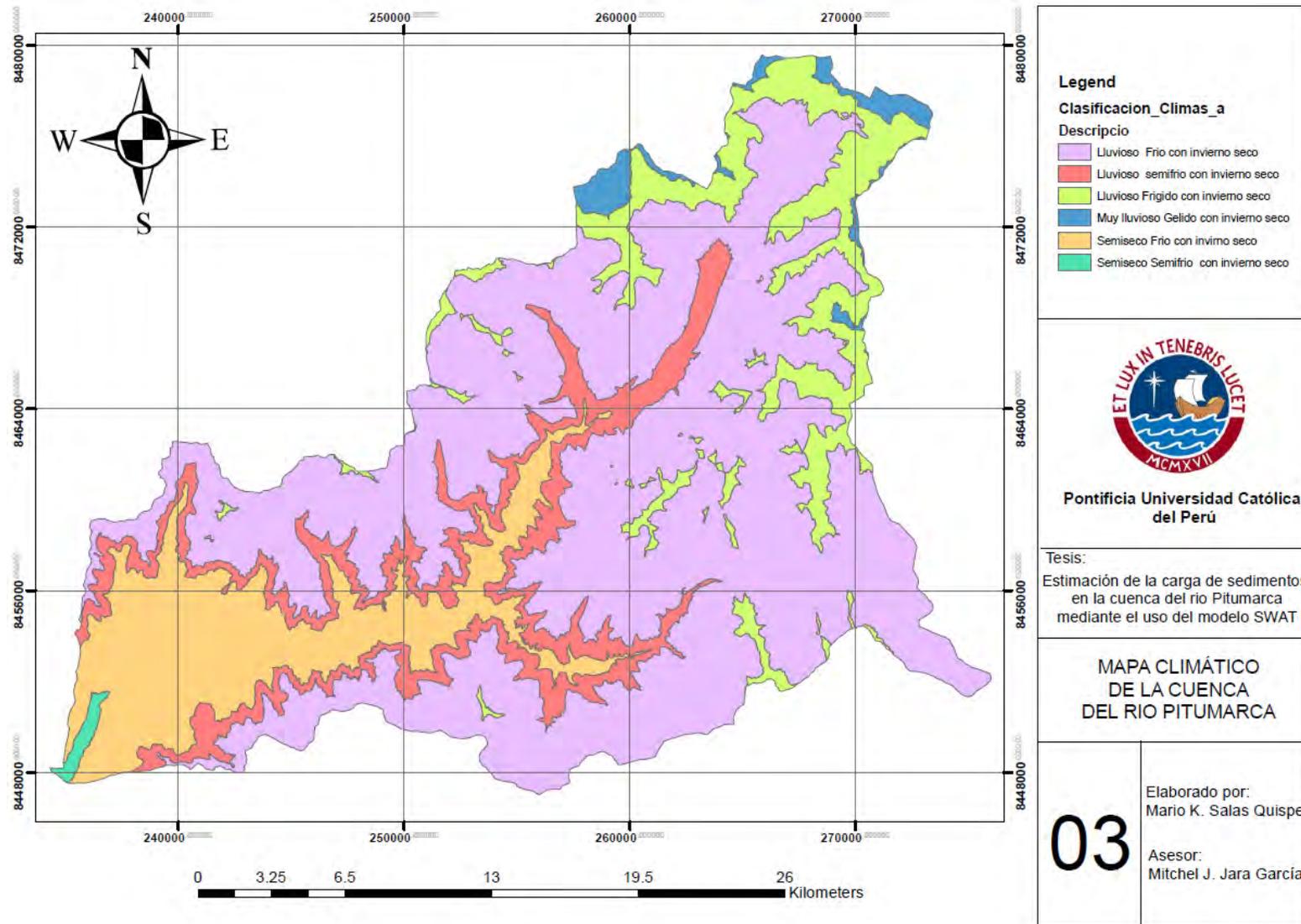


Figura 10. Mapa climático de la cuenca del río Pitumarca

Respecto a la geomorfología de la cuenca se observa un relieve predominantemente montañoso, siendo alrededor de 70% del territorio laderas que tienen un porcentaje de inclinación entre 30% y 45% y las áreas planas se concentran en las altiplanicies y son zonas onduladas. En el fondo del valle también se halla zonas planas que son producto de la sedimentación y erosión ribereña (IMA, 2007).

La cobertura vegetal en la zona de estudio es bastante diversa, respondiendo así a la gran variedad de altitudes, precipitaciones y a actividades económicas. Existen diversas especies de pastizales, los cuales tienen denominaciones locales, tales como el Crespillo o el Paco Paco. Las extensiones de la cobertura vegetal por el año 2006 fueron calculadas por el IMA y muestran que el 50% de la cuenca está cubierta por pastizales, lo cual evidencia la gran cantidad de variedades. Otro porcentaje en la cobertura de la cuenca es el área sin vegetación, aproximadamente 15.31% de la extensión total, esta área sin vegetación al encontrarse expuesta a las condiciones climáticas, tan peculiares en la cuenca del río Pitumarca, es propensa a presentar altos índices de erosión (ver Tabla 8).

Tabla 8. Cobertura Vegetal

| N° | Cobertura Vegetal | Color en Figura 15 | Ha | % |
|--------------|---|-----------------------|------------------|--------------|
| 1 | Áreas de cultivo con escasa vegetación | Verde Oscuro | 2,396.26 | 3.47 |
| 2 | Áreas de cultivo en ladera con vegetación | Verde Claro | 2,767.62 | 4.01 |
| 3 | Áreas de cultivo en terrazas | Azul | 895.47 | 1.30 |
| 4 | Áreas de escasa vegetación | Azul Petróleo | 717.08 | 1.04 |
| 5 | Áreas sin vegetación | Rosa | 10,571.69 | 15.31 |
| 6 | Bosque nativo | Amarillo | 63.46 | 0.09 |
| 7 | Bofedales | Marrón Claro | 2,874.86 | 4.16 |
| 8 | Laymes | Morado | 2,509.07 | 3.63 |
| 9 | Matorral arbolado | Cian | 198.15 | 0.29 |
| 10 | Nival | Celeste Opaco | 4,645.47 | 6.73 |
| 11 | Pastizales | Naranja | 34,977.92 | 50.67 |
| 12 | Plantación de eucalipto | Amarillo | 201.06 | 0.29 |
| 13 | Vegetación ribereña | Chartreuse | 14.25 | 0.02 |
| 14 | Roquedal | Purpura de Tiro | 5,536.92 | 8.02 |
| 15 | Matorral mixto | Turquesa | 448.49 | 0.65 |
| 16 | Ríos | Celeste | 68.89 | 0.1 |
| 17 | Lagunas | Celeste | 151.04 | 0.22 |
| TOTAL | | | 69,037.80 | 100 |

Fuente: IMA, 2006

Del mapa de cobertura vegetal se observa que el área de cultivos se limita a las altitudes entre 3400 msnm hasta los 4300 msnm, que ocupan solamente el 15.01% del área total de la cuenca. Las plantaciones de eucalipto representan 0.29% de la extensión de la cuenca y representan el sustento de las personas que se dedican a la silvicultura. La pérdida de suelo en las zonas de actividad económica puede ser traducida fácilmente en pérdidas económicas.

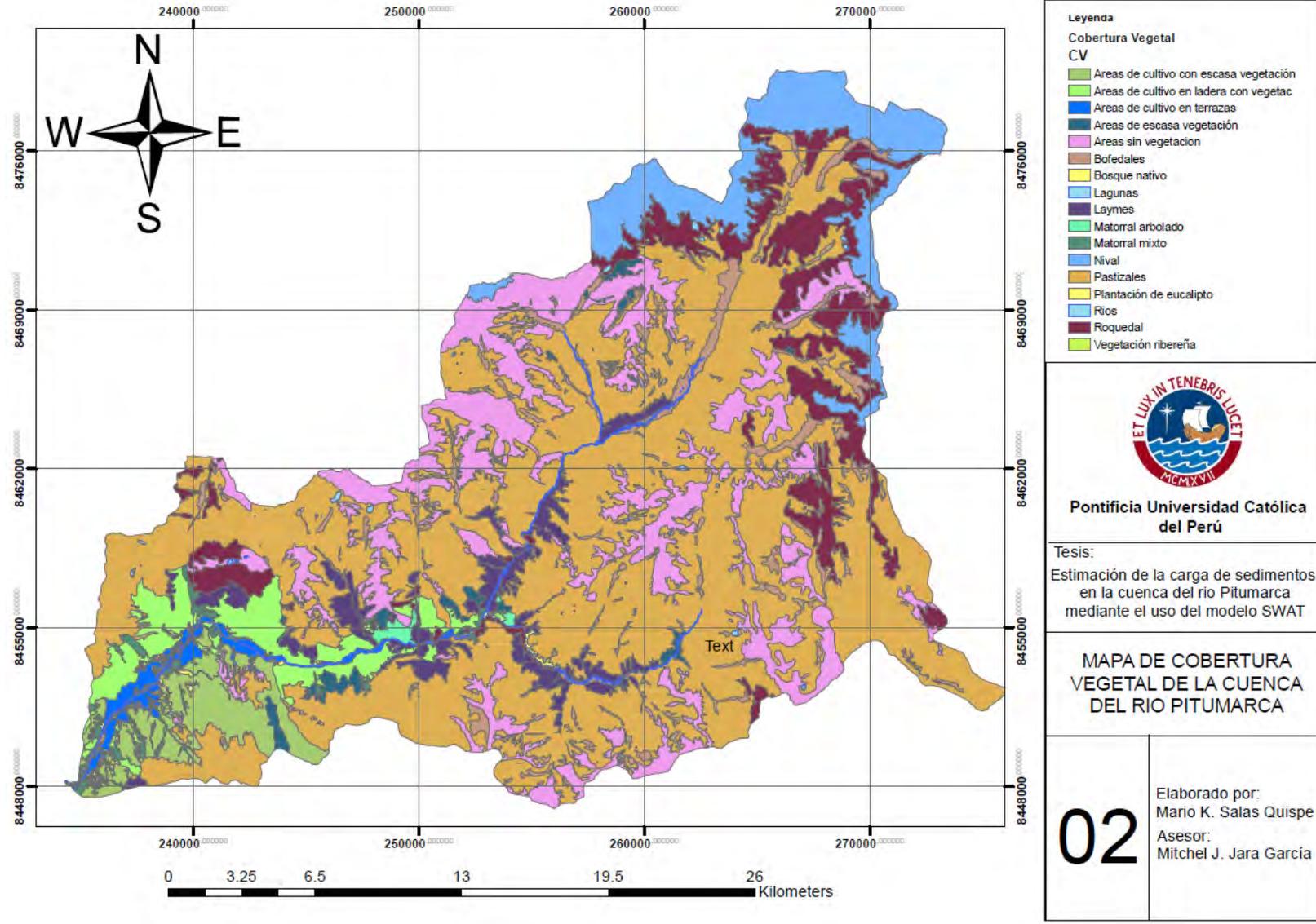


Figura 11. Mapa de cobertura vegetal de la cuenca del río Pitumarca

Para el tipo de suelo, para fines de esta tesis, no se basara en la nomenclatura SUCS o AASHTO, usaremos clasificaciones basadas en la capacidad de uso de los suelos (ver Tabla 9), que es usada por los ingenieros agrícolas para clasificar las características físico-químicas específicas similares relacionados a la fertilidad (Trifón Ayaviri, 1996).

Tabla 9. Capacidad de uso mayor de suelos

| N° | Simbología | Limitación | Superficie | |
|--------------|------------|--|----------------|------------|
| | | | Hectáreas | % |
| 1 | A2s | Con limitación de suelo | 642.00 | 0.93 |
| 2 | A2sc | Con limitación de suelo y clima | 141.90 | 0.21 |
| 3 | A2sec | Con limitación de erosión y suelo | 225.10 | 0.33 |
| 4 | A3se | Con limitación de suelo y erosión | 61.00 | 0.09 |
| 5 | A3sec | Con limitación de suelo, erosión y clima | 306.60 | 0.44 |
| 6 | C2s | Con limitación de suelo | 184.20 | 0.27 |
| 7 | C2sc | Con limitación de suelo y clima | 15.50 | 0.02 |
| 8 | C2se | Con limitación de erosión y suelo | 76.30 | 0.11 |
| 9 | C2sec | Con limitación de suelo, erosión y clima | 73.10 | 0.11 |
| 10 | P1sc | Con limitación de suelo y clima | 3014.30 | 4.37 |
| 11 | P1sw | Con limitación de suelo y drenaje | 2706.50 | 3.92 |
| 12 | P2sc | Con limitación de suelo y clima | 229.40 | 0.33 |
| 13 | P2se | Con limitación de erosión y suelo | 1251.10 | 1.81 |
| 14 | P2sec | Con limitación de erosión y suelo | 13735.00 | 19.88 |
| 15 | P3sec | Con limitación de erosión y suelo | 13064.00 | 18.92 |
| 16 | P3sw | Con limitación de suelo y drenaje | 197.4 | 0.29 |
| 17 | F2se | Con limitación de erosión y suelo | 950.8 | 1.38 |
| 18 | F3se | Con limitación de erosión y suelo | 1854.1 | 2.69 |
| 19 | F3sec | Con limitación de erosión y suelo | 488.3 | 0.71 |
| 20 | X | Protección | 4793.9 | 6.94 |
| 21 | Xse | Protección con limitación de suelo y erosión | 24807.40 | 35.93 |
| 22 | Rios | Rios | 68.90 | 0.10 |
| 23 | Lagunas | Lagunas | 151.00 | 0.22 |
| TOTAL | | | 39037.8 | 100 |

Fuente: IMA, 2006

3.1.3. Geología y de taxonomía del suelo.

El mapa geológico se encuentra conformada por afloramiento de rocas que van del Paleozoico hasta el Cuaternario, mientras, que las unidades mesozoicas vienen desde el triásico al cretácico, siendo éstas de origen marino a fluvial, con presencia litológica de conglomerados arenisca, lutitas y calizas formando a manera de estructuras concéntricas que por efectos tectónicos han dado a diversa fallas complejas (ver Figura 12), en tanto que las unidades del Cenozoico corresponden al Paleógeno, Neógeno y Cuaternario, también de origen continental (IMA, 2006).

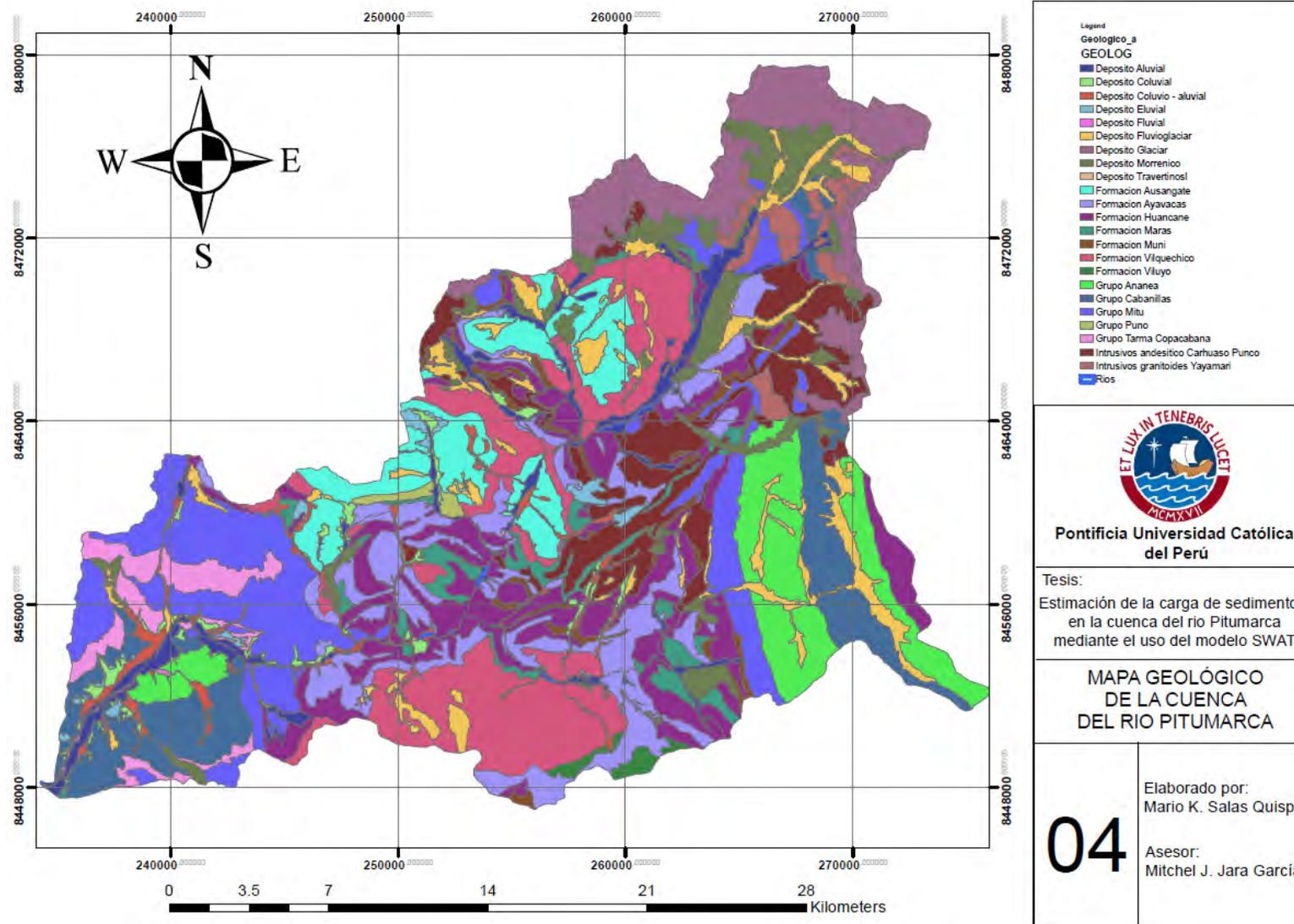


Figura 12. Mapa geológico de la cuenca del río Pitumarca

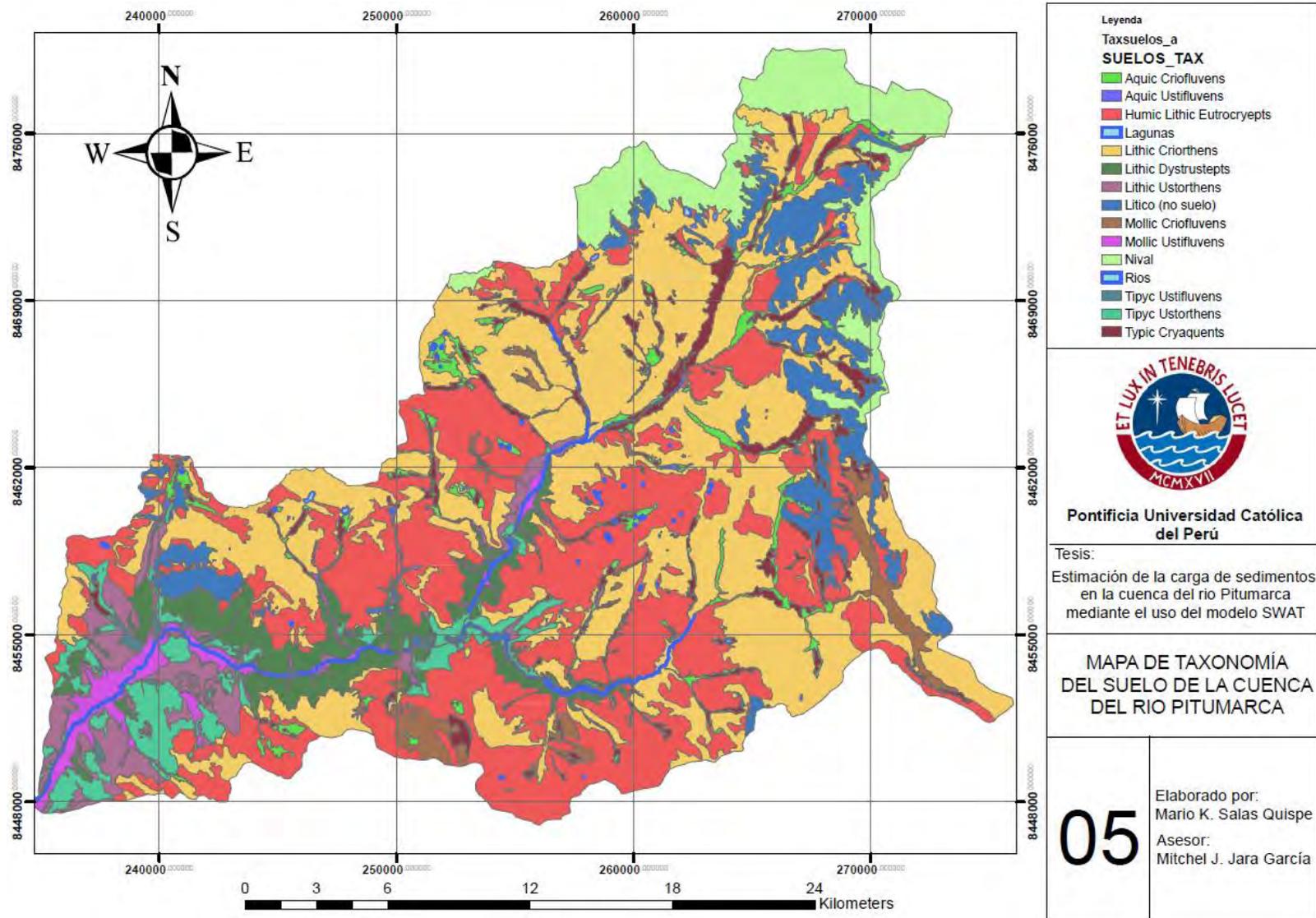


Figura 13. Mapa de taxonomía de suelos de la cuenca del río Pitumarca

En el mapa de geomorfología se aprecia la forma en la que se agrupa dentro de cuatro clases, planicies, sub-planicies, colinas y montañas el área de la cuenca. Las montañas son la forma de relieve más predominante con un aproximado de 81% del área total de cuenca.

La taxonomía del suelo en la cuenca fue adquirida del IMA (Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente), este mapa usa la nomenclatura de la USDA y las dos órdenes predominantes son las Entisols y Inceptisols; y las sub ordenes fueron las Fluvens y Orthens correspondientes al orden de los Entisols mientras que para Creyeps y Ustepts para el orden de los Inceptisols (ver Figura 13).

3.1.4. Vulnerabilidad y conflictos ambientales.

La vulnerabilidad de la cuenca se clasifica en cuatro tipos, estable, moderadamente estable, medianamente estable y vulnerable, para esta clasificación se toma en cuenta la geología, la cobertura vegetal, las condiciones climáticas y la geomorfología de la cuenca (ver Figura 14).

Las partes moderadamente estables están ubicadas en su gran mayoría en la zona media y baja de la cuenca. Las zonas moderadamente vulnerables y medianamente vulnerables son las de mayor presencia en la cuenca, mientras, que las zonas vulnerables se ubican en la cuenca alta, donde la vegetación es escasa, el clima es lluvioso y esta parte de la cuenca corresponde a cumbres nevadas o zonas donde los glaciares se han retirado (IMA, 2006).

Por otro lado los conflictos ambientales presentes en la cuenca se dividen en tres grupos, uso adecuado, sub utilizado y sobre utilizado (verde, amarillo y rojo respectivamente) y estas divisiones se dan según las actividades que se realizan dentro de la cuenca (ver Figura 15). Las zonas con sobre uso se encuentra en la zona baja de la cuenca, en las laderas de los ríos y flujos de agua, ello se debe a la actividad agrícola en las zonas de menor altura y a actividades ganaderas en la parte media y alta de la cuenca. Los suelos sub utilizados son reducidos y su existencia se debe a características particulares. Por ultimo las zonas de uso adecuado son predominantes en la cuenca, los montes nevados y zonas de glaciación son áreas donde existe poca o ninguna actividad humana. Eventualmente existen 15 canteras de las cuales 9 canteras son de grava y arena aluviales (ubicados en su gran mayoría en las laderas de los ríos), 4 son canteras de piedra y 2 son canteras de yeso, y por otro lado, solo existe una mina de cobre en la cuenca.

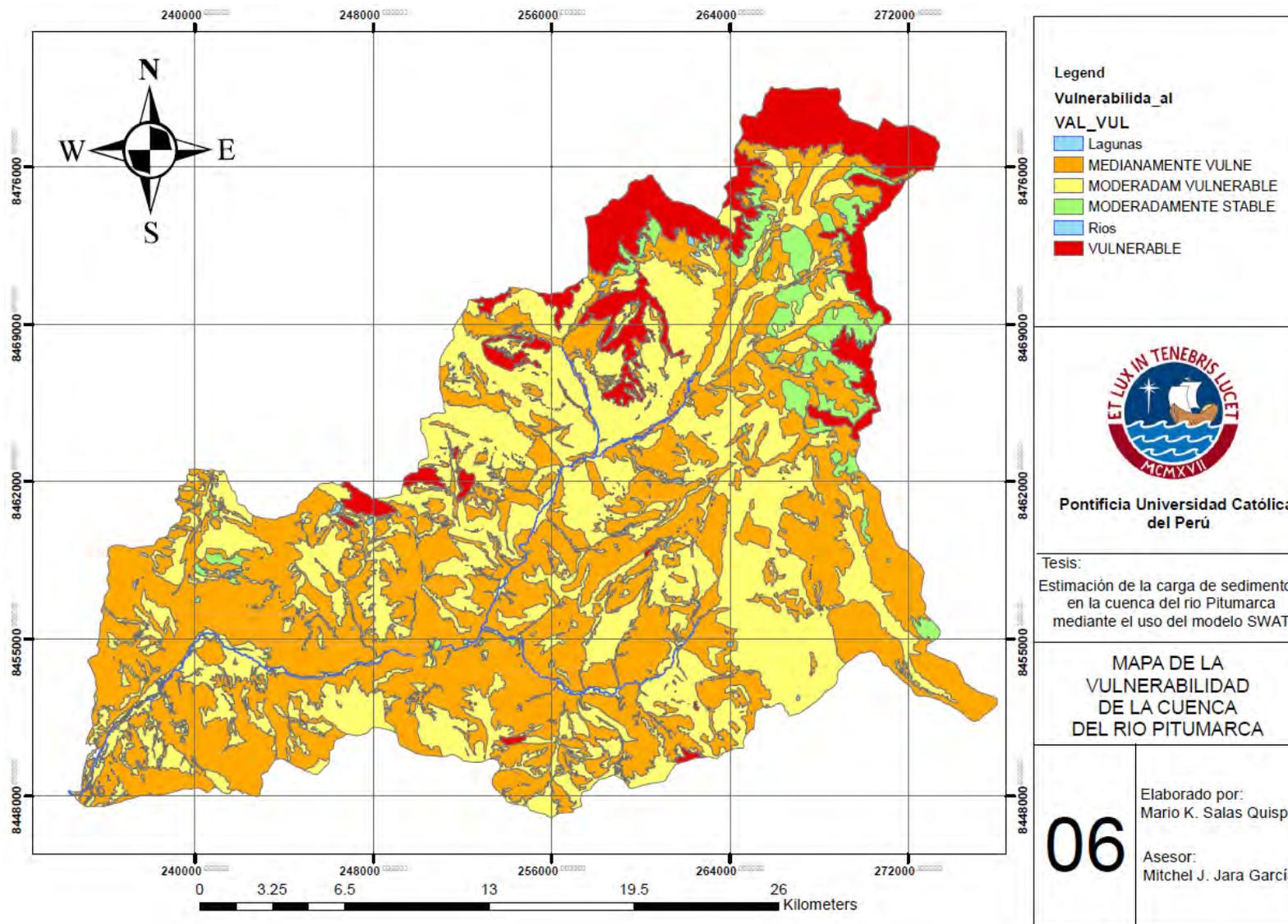


Figura 14. Mapa de vulnerabilidad de la cuenca del río Pitumarca

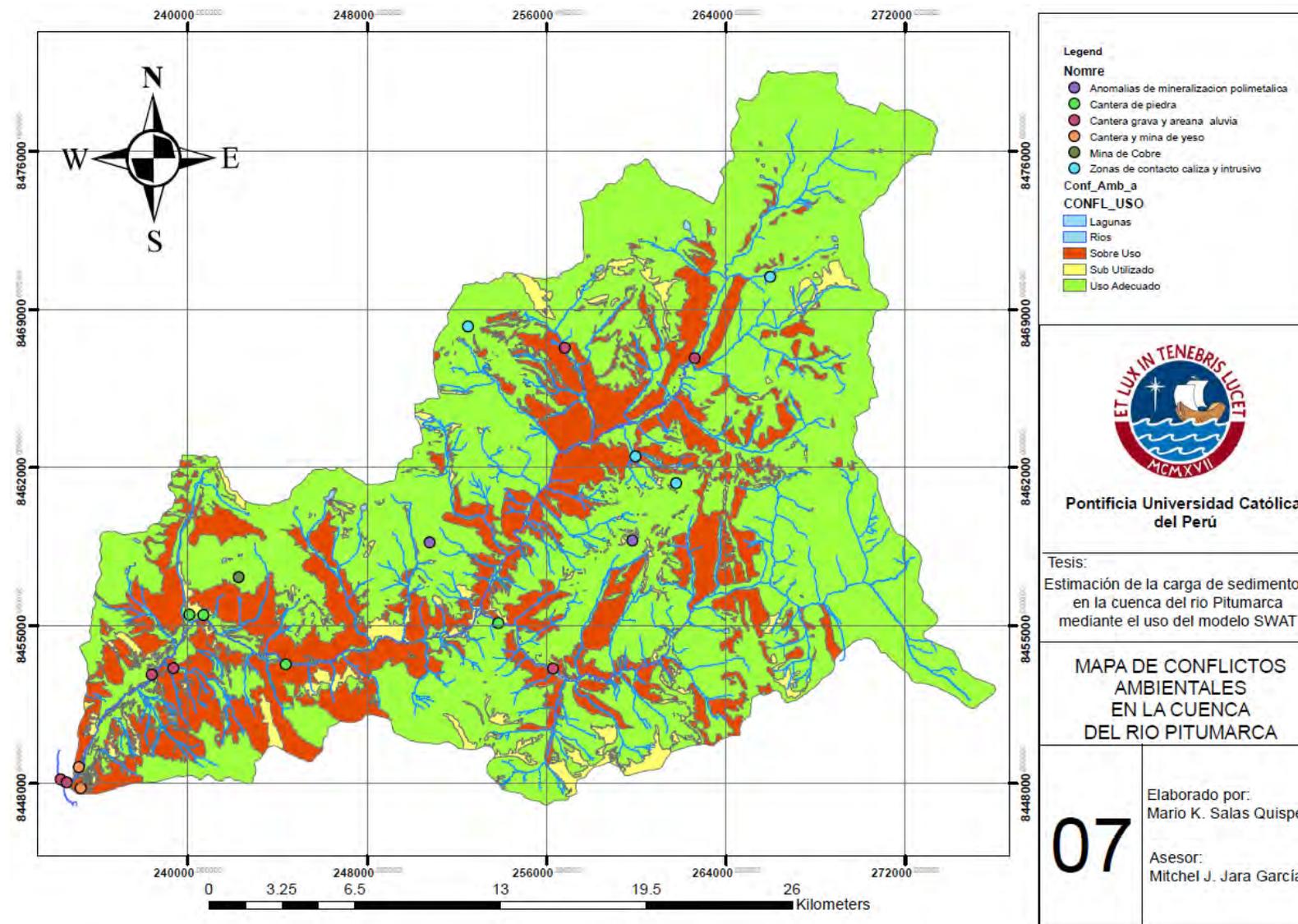


Figura 15. Mapa de conflictos ambientales en la cuenca del río Pitumarca

3.2. Información Hidrometeorológica Observada

Se utilizó información meteorológica de precipitación y temperatura proporcionada por el SENAMHI proveniente de las estaciones de Combapata, Sibinacocha, Ccatcca y Pomacanchi. La información histórica de precipitación de la estación de Combapata data desde 1964 al 1997. La estación de Ccatcca cuenta con información desde 1965 hasta el 2014. Así mismo, la estación de Pomacanchi cuenta con información histórica desde 1992 al 2014.

Por otro lado, la información hidrométrica resulta de difícil acceso, tanto el SENAMHI como el ANA no cuentan con estaciones hidrométricas en ninguna parte del curso del río Pitumarca. Sin embargo se logró obtener registros de aforos realizados durante los años 2011 hasta el 2016, de varios puntos dentro de la cuenca (ver 3.2.2 Datos de aforo mensual.). También se obtuvo los caudales promedios mensuales de ciertos periodos, publicados por el IMA (ver Tabla 12).

3.2.1. Datos de Precipitación.

Los datos de precipitación utilizados, provienen de 4 estaciones meteorológicas, ubicadas en la periferia de la cuenca: Ccatcca, Pomacanchi, Combapata y Sibinacocha (ver Figura 16).



Figura 16. Ubicación de las estaciones meteorológicas

3.2.1.1. Estaciones existentes.

La estación de Combapata se ubica al sur oeste de la cuenca de estudio, la precipitación es estacional y tiene un comportamiento regular que responde a la época de lluvia

(noviembre a abril) y a la época de estiaje (mayo a octubre). La precipitación máxima registrada para un día fue de 47mm que ocurrió en 1977. La precipitación promedio anual de precipitación es de 686.03 mm.

El histograma de la estación Combapata (ver Figura 17), contiene datos faltantes dentro del periodo que comprende desde febrero de 1986 hasta enero de 1990.



Figura 17. Histograma de la estación Combapata con datos proporcionados de SENAMHI

La estación de Ccatcca se ubica al norte de la cuenca de estudio, la precipitación es regular (ver Figura 18). La precipitación máxima registrada en un día fue de 42.1 mm en 1994, la precipitación media anual es de 635.78 mm.

El histograma de la estación Ccatcca, contiene datos faltantes dentro del periodo que comprende desde julio de 1983 hasta enero de 1986.

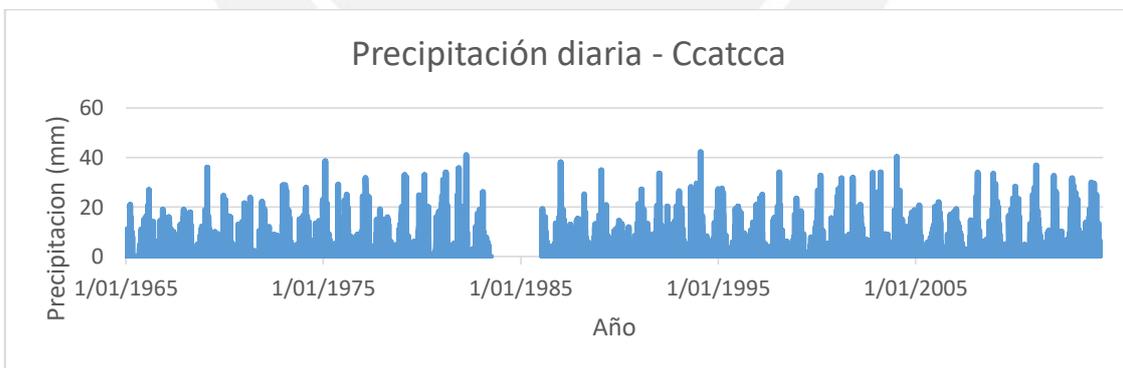


Figura 18. Histograma de la estación de Ccatcca con datos proporcionados por SENAMHI

La estación de Pomacanchi se ubica al oeste de la cuenca de estudio, la precipitación tiene un comportamiento similar a las estaciones anteriores (ver Figura 19). La precipitación máxima registrada por la estación es de 59 mm en 1994. El promedio anual de precipitación es de 804.38 mm por año, un valor superior a la media de las anteriores estaciones. La mayor altitud de la estación se traduce en mayor precipitación.

El histograma de la estación Ccatcca, contiene datos faltantes dentro de los periodos que comprenden a octubre de 1987 hasta julio de 1988 y desde mayo de 1989 hasta noviembre de 1991.

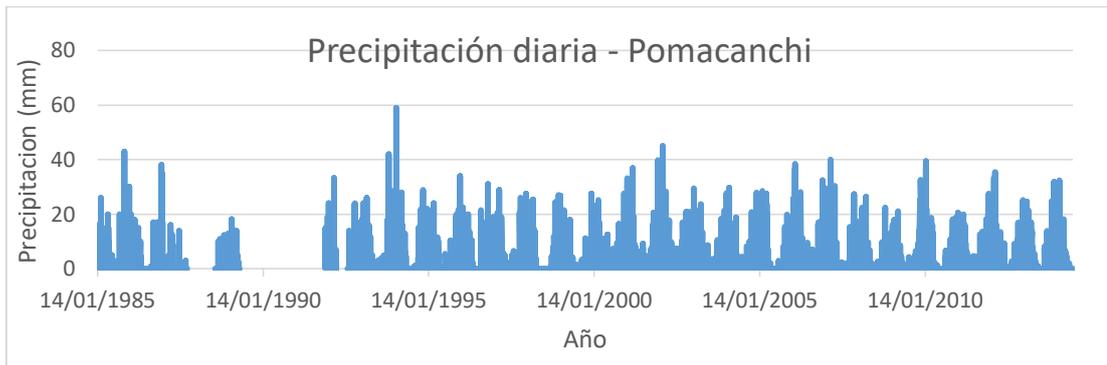


Figura 19. Histograma de la estación de Pomacanchi con datos del SENAMHI.

3.2.1.2. Completamiento de datos

Para lograr completar datos de precipitación faltantes en las tres estaciones mencionadas, se utilizó el producto PISCO. El archivo para la precipitación diaria es “PISCOpd.nc”, mientras que para los datos de temperatura máxima se usó “PISCO dtx_v1.1.nc” y para la temperatura mínima “PISCO dtn_v1.1.nc”.Primero se colocaron las coordenadas UTM de las estaciones existentes para recabar los datos, para esto se usó el lenguaje de programación R y un código de lectura (ver Figura 20).

```

CODIGO FINAL PARA EXTRAER DAT...
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
setwd("D:/2019/Leer PISCO")
rm(list = ls())
install.packages("raster")
install.packages("ncdf4")
library(raster)
library(ncdf4)
long_lat <- read.csv("long_lat.csv", header = T)
raster_pp <- raster::brick("PISCOdtx_v1.1.nc")
sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]], long_lat, cellnumbers = T)[,1]
data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)

save.image("D:/2019/Leer PISCO/data_long_lat.csv")

write.csv(data_long_lat, "data_long_lat.csv", quote = F)

rm(list = ls())
install.packages("raster")##instalar el paquete comentar # si ya esta instalado
install.packages("ncdf4")##instalar el paquete comentar # si ya esta instalado
library(raster)#cargar el paquete
library(ncdf4)#cargar el paquete
## Leer el archivo long_lat.csv (ver el archivo ejemplo)
## para agregar solo disminuya o incremente las coordenadas de las filas
## XX Longitud e YY Latitud
long_lat <- read.csv("long_lat.csv", header = T)
### Ensamblamos los datos *.nc
raster_pp <- raster::brick("PISCOpd.nc")
## Asignamos las coordenadas
sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
# Igualamos las proyecciones del raster y de los puntos a extraer
raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
# Extraemos los valores
points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]], long_lat, cellnumbers = T)[,1]
data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)

```

Figura 20. Código para extraer información del producto PISCO

Una vez obtenidos la información requerida del producto PISCO, se completaron los datos de precipitación faltante para las estaciones existentes mediante el uso de Python, la librería de código abierto “pandas”, para el análisis científico “NumPy” y la implementación de redes neuronales usando la librería “sknn Multi-Layer Perceptrons”. Primero se crearon hojas de cálculo con formatos similar para la información histórica provista por SENAMHI y con los datos obtenidos del producto PISCO (ver Figura 21), una vez creadas las hojas de cálculo se importaron a la librería pandas (ver Figura 22).

| | A | B |
|----|------------------|-----------------|
| 1 | Fecha | Agregado |
| 2 | 1/01/1965 00:00 | 0 |
| 3 | 2/01/1965 00:00 | 0 |
| 4 | 3/01/1965 00:00 | 6 |
| 5 | 4/01/1965 00:00 | 4.5 |
| 6 | 5/01/1965 00:00 | 4.5 |
| 7 | 6/01/1965 00:00 | 3 |
| 8 | 7/01/1965 00:00 | 3.5 |
| 9 | 8/01/1965 00:00 | 0 |
| 10 | 9/01/1965 00:00 | 0 |
| 11 | 10/01/1965 00:00 | 0 |
| 12 | 11/01/1965 00:00 | 0 |

Figura 21. Formato para ingreso a pandas

```

In [1]: %pylab inline
import pandas as pd
import numpy as np
Estacion_01 = pd.read_excel('Combapata.xlsx', sheet_name='Combapata', index_col=0)
Estacion_01 = Estacion_01.rename(columns={'Agregado': 'Est1'})
Estacion_02 = pd.read_excel('PISCO.xlsx', sheet_name='PISCO', index_col=0)
Estacion_02 = Estacion_02.rename(columns={'Agregado': 'Est2'})
Estacion_03 = pd.read_excel('Ccatcca.xlsx', sheet_name='Ccatcca', index_col=0)
Estacion_03 = Estacion_03.rename(columns={'Agregado': 'Est3'})
Estacion_03_5min = pd.read_excel('Estacion_03_5min.xlsx', sheet_name='Estacion_03', index_col=0)
Estacion_03_5min = Estacion_03_5min.rename(columns={'Agregado': 'Est3'})

Populating the interactive namespace from numpy and matplotlib

```

Figura 22. Importación de datos a pandas

Para completar los datos de precipitación faltante mediante el código mostrado (ver Figura 22 y Figura 23) es necesario la información de tres estaciones, una de estas estaciones es a la que le faltan datos durante un periodo determinado, mientras que las otras dos estaciones tienen datos de precipitación completos durante el periodo a completar, una de estas estaciones tiene los datos extraídos del producto PISCO. Una vez introducidos los datos de las estaciones, se procedió a construir la red neuronal usando la librería sknn para múltiples capas y con un ajuste de información para un problema de regresión (ver Figura 23). El proceso se realizó con todas las estaciones antes mencionadas en los periodos de ausencia de datos indicados (Ver 3.2.1.1 Estaciones existentes.).

```

In [ ]: from sknn.mlp import Regressor, Layer

capasinicio = TodasEstaciones.loc['1986-01-01':'2010-12-31'].as_matrix()[0,2]
capasalida = TodasEstaciones.loc['1986-01-01':'2010-12-31'].as_matrix()[1,1]
neurones = 5000
tasaaprendizaje = 0.00001
numiteraciones = 50000

#Definition of the training for the neural network
redneural = Regressor(
    layers=[
        Layer("Explin", units=neurones),
        Layer("Explin", units=neurones), Layer("Linear")],
    learning_rate=tasaaprendizaje,
    n_iter=numiteraciones)
redneural.fit(capasinicio, capasalida)

#Get the prediction for the train set
valortest = ([])

for i in range(capasinicio.shape[0]):
    prediccion = redneural.predict(np.array([capasinicio[i,:].tolist()]))
    valortest.append(prediccion[0][0])

```

Figura 23. Construcción de la red neuronal

Se usaron 5000 neurones y 50000 numiteraciones en la red neuronal, la elección de neurones y numiteraciones depende de la capacidad del procesador y del ajuste esperado.

3.2.2. Datos de aforo mensual.

Se obtuvieron los aforos mensuales brindados por Plan Meriss durante el 2010 (ver Tabla 10), los simulados por la herramienta WEAP y los generados por el IMA empleando CHAC y HEC-4.

Tabla 10. Aforo mensual del río Pitumarca durante el 2010

| Mes | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sept. | Oct. | Nov. | Dic. |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| Q (m ³ /s) | 20.20 | 19.58 | 18.63 | 10.00 | 6.60 | 5.2 | 4.94 | 4.32 | 4.12 | 6.70 | 11.20 | 15.20 |

Fuente: Cesar Tacusi & Eloy Hacha, 2015

Se obtuvieron caudales simulados con la herramienta WEAP de tres microcuencas (Chilcamayo, Yanamayo y Pitumarca) (ver Tabla 11). Por el método de error medio cuadrático se calculó un valor de 0.119, 11.99% de error (Tacusi Calla & Hacha Chuctaya, 2015).

Tabla 11 Caudales generados mediante el uso de la herramienta WEAP

| Caudal por microcuenca | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|
| Chillcamayo | 8.65 | 9.32 | 7.44 | 3.77 | 1.47 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.46 | 3.30 | 5.25 | 6.96 | 51.23 |
| Yanamayo | 5.33 | 5.72 | 4.59 | 2.29 | 0.90 | 0.73 | 0.72 | 0.73 | 1.03 | 2.02 | 3.23 | 4.29 | 31.58 |
| Pitumarca | 19.24 | 20.63 | 16.72 | 9.18 | 4.29 | 3.79 | 3.79 | 3.81 | 4.92 | 8.23 | 12.02 | 15.65 | 122.21 |

Fuente: Cesar Tacusi & Eloy Hacha, 2015

También se obtuvieron caudales medios mensuales generados en las principales microcuencas y subcuenca del río Pitumarca, estos caudales son producto del análisis de la información pluviométrica de las estaciones de Combapata, Pomacanchi, Sicuani, con

el apoyo de las estaciones de Yauri y Ccatcca. Los software usados fueron el CHAC y el HEC-4 (ver Tabla 12) (IMA, 2006).

Tabla 12. Caudales medios generados mensuales

| m3/s | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|--------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------------|
| Chillcamayo | 10.32 | 9.96 | 8.56 | 4.54 | 2.23 | 1.38 | 0.91 | 0.65 | 0.64 | 0.64 | 1.72 | 4.28 | 45.83 |
| Yanamayo | 5.96 | 5.32 | 4.41 | 1.63 | 0.72 | 0.44 | 0.27 | 0.19 | 0.20 | 0.31 | 0.95 | 2.75 | 23.15 |
| Pitumarca | 24.66 | 22.52 | 19.09 | 7.11 | 3.28 | 2.13 | 1.50 | 1.17 | 1.30 | 2.01 | 4.84 | 12.47 | 102.0 |

Fuente: IMA.DPE.UE.2005

Para la calibración y validación del modelo se usaron los caudales simulados con la herramienta WEAP, además estos valores tienen rangos de error aceptables según los criterios estadísticos (ver Figura 24).

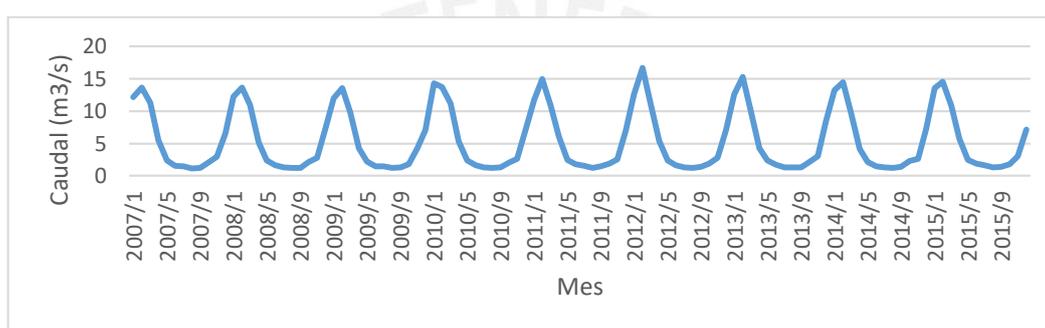


Figura 24. Caudales observados río Pitumarca

3.3. Datos de Entrada Usados en el Modelo SWAT

Para poder realizar el modelo SWAT se requiere información de la cuenca tal como el DEM (modelo digital de elevación), la cobertura y uso de suelos, el tipo de suelos, sus atributos y datos climáticos. Adicionalmente se requiere datos hidrométricos con el fin de validar los caudales de salida que sean simulados por el modelo.

3.3.1. Modelo digital de elevación (DEM).

El modelo digital de elevación es producto del análisis y evaluación de imágenes satelitales que fueron obtenidas por medio de la plataforma USGS y la NASA. Para procesar solamente el DEM de la cuenca primero fue necesario delimitar la cuenca para ello se utilizó el programa QGIS una vez delimitada la cuenca se procesó los DEM de la zona para posteriormente recortarlos sobre la zona de estudio.

El DEM contiene datos topográficos de la cuenca y alrededores estos serán procesados con el fin de calcular las pendientes de cada sector, estas pendientes son necesarias para modelar la zona de estudio (ver Figura 25).

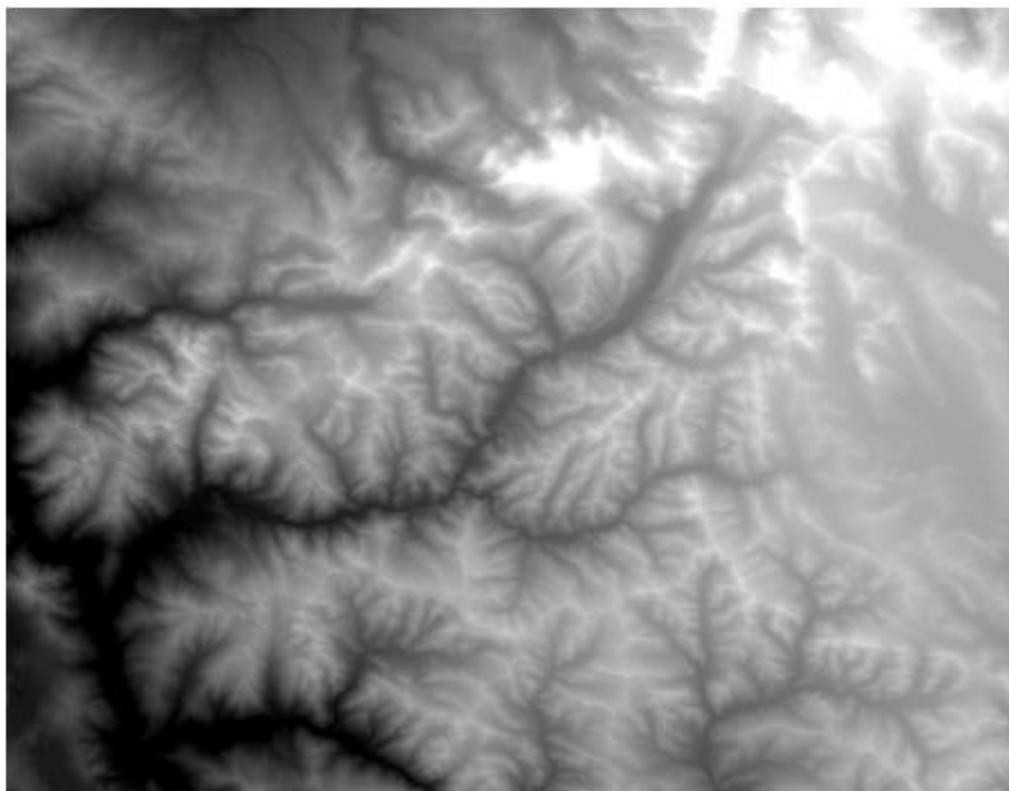


Figura 25. DEM de la zona de estudio.

3.3.2. Cobertura y uso de suelos.

La cuenca cuenta con áreas usadas en ganadería y agricultura, estas actividades ocupan gran extensión de la cuenca, dado que las actividades económicas varían periódicamente es necesario tener información pertinente para el lapso en el que se pretende realizar la simulación. Los cultivos en limpio así como los permanentes ocupan un 2.5% del área total de la cuenca, por otro lado los pastos de baja, media y alta calidad ocupan aproximadamente el 50% de la extensión total. Por último las áreas ubicadas en las cumbres nevadas y a gran altitud de la cuenca tienen poca actividad humana, esta zona denominada área de protección por su grado de vulnerabilidad en la cuenca (ver Figura 14) tiene una extensión de aproximadamente 42%.

La información del uso del suelo para el modelo fue extraída del Earthdata Search perteneciente a la NASA (ver Figura 26), una vez delimitada el área de la cual se requiere información se procede a descargar mapas para años específicos (años que se pretenden modelar).

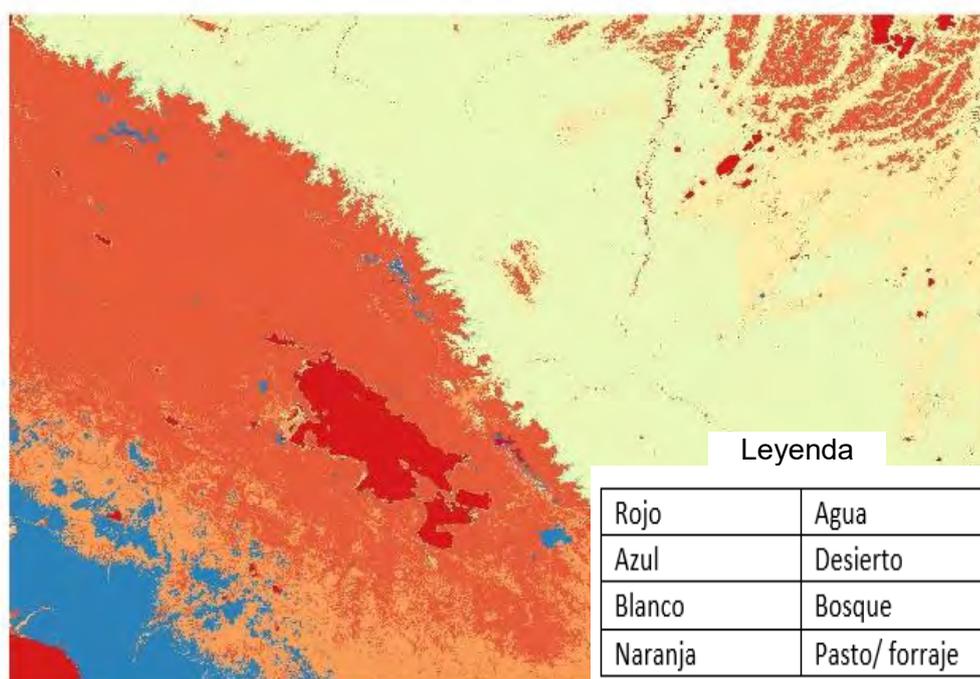


Figura 26. Mapa de uso de suelos extraída de Earthdata Search

3.3.3. Tipo de suelos y atributos.

Para los tipos de suelo se usó la clasificación de la FAO, en la cuenca se encontró la presencia de 4 tipos de suelo predominantes: HI11-3b, I-Bh-c, K13-3a y Glacier. Ellas corresponden a símbolos de la FAO en el mapa mundial de suelos, para los suelos en la cuenca se elaboró un cuadro con las características (ver Tabla 13 y Figura 27).

Tabla 13. Tipos de suelo y atributos en la cuenca del río Pitumarca.

| Símbolo | Color | Vegetación | Litología |
|----------|---------|--|--|
| HI 11-3b | Morado | Bosque seco y bosque xerofideo de los valles intermontanos | Aluvión, cenizas cuaternarias, rocas elásticas cretáceas y calcáreas, rocas ígneas ácidas |
| I-Bh-c | Verde | Páramo subalpino y tundra alpina | Rocas ligeramente metamorizadas del paleozoico anterior, rocas calcáreas y elásticas permocarboníferas, rocas elásticas, rocas elásticas cretáceas y depósitos glaciales del cuaternario |
| K1 3-3a | Gris | Bosque húmedo montañoso | En su mayor parte calizas Y esquistos permocarboníferos. |
| Glacier | Celeste | Ninguna | |

Fuente: FAO, 1971.

El suelo correspondiente a HI 11-3b se encuentra en los alrededores del último tramo del río Pitumarca, el suelo predominante es el I-Bh-c este se extiende desde la cuenca media hasta la cuenca alta. Solamente parte de la cuenca alta es clasificada como glaciares (ver Figura 27).

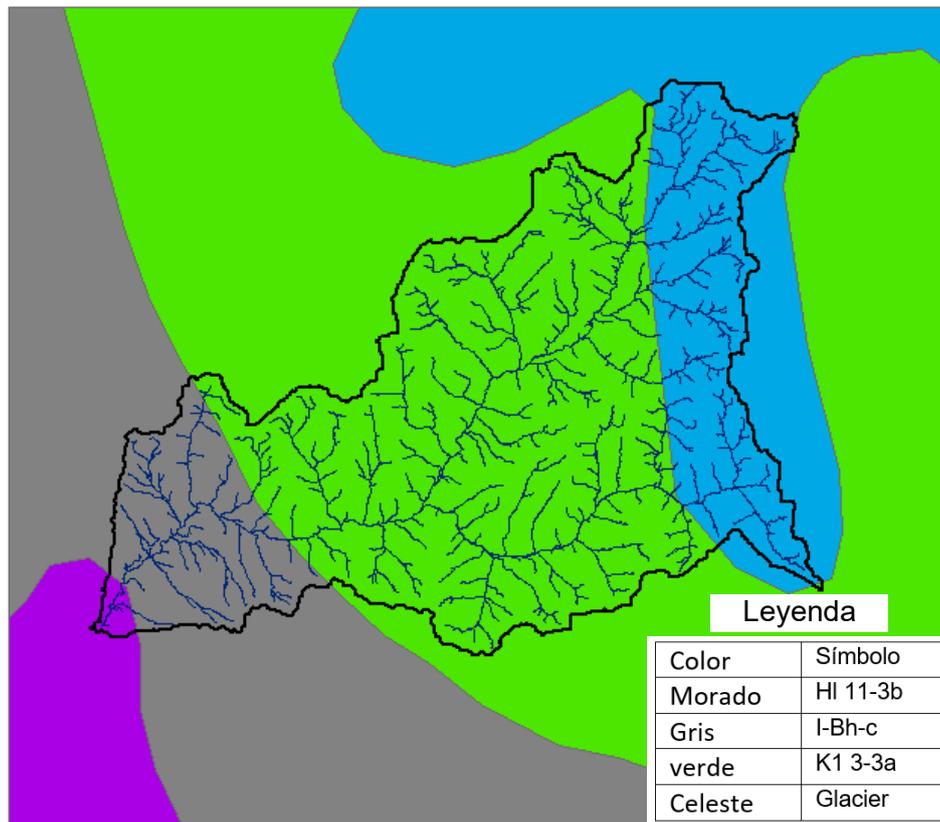


Figura 27. Tipo de suelos en la cuenca del río Pitumarca (Ver Tabla 13)

3.3.4. Datos climáticos.

Los datos climáticos de las estaciones meteorológicas interpoladas fueron colocados en la base de datos del SWAT. La información que por defecto es usada en el modelo SWAT o en cualquier plataforma es la base de datos climáticos de global CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), para estudios en otras locaciones del mundo es necesario contar con información propia o usar el CFSR-World que contiene datos a nivel global. En el caso particular de la presente tesis se usaron datos brindados por el SENAMHI. Los datos CFSR-World para la sierra y selva sudamericana presentan una sobrestimación de las precipitaciones históricas. La precipitación histórica no basta para correr el modelo, es necesario también datos de temperatura, viento, radiación solar y humedad relativa. Los datos de temperatura y precipitación pueden ser hallados con información proveniente del SENAMHI, sin embargo datos como el viento, la radiación solar y la humedad relativa deberán ser simulados, esta simulación se hace de manera automática con el SWAT. Los datos de precipitación usados son de las 7 estaciones meteorológicas interpoladas (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

3.4. Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación del Modelo

Para el análisis de sensibilidad se usaran solo 4 parámetros, si bien existe una gran cantidad de parámetros la elección depende lo que sea más relevante para modelo (ver Tabla 14).

Tabla 14. Parámetros para el análisis de sensibilidad en el modelo

| Parámetro | Descripción | Proceso |
|-----------|---|------------------|
| GWQMN | Limite en el nivel del agua al acuífero poco profundo para flujo base | Agua subterránea |
| ALPHA_BF | Factor de recesión de flujo base | Agua subterránea |
| GW_DELAY | Tiempo de demora para la recarga del acuífero. | Agua subterránea |
| CN2 | SCS numero de curva de escorrentía de condición de humedad II | Escorrentía |

La calibración del modelo será mediante el uso de criterios estadísticos que garanticen una simulación aproximada y validad al modelo. En esta fase los parámetros más sensibles del modelo irán cambiando tras simular el modelo mínimamente 500 veces. Para el uso de los criterios estadísticos se comprara la mejor simulación realizada mediante el programa SWAT-CUP con los caudales observados. Básicamente el proceso se resume en un proceso iterativo, el cambio de valores mínimos y máximos de los parámetros, hasta alcanzar valores aceptables según los criterios estadísticos Se seleccionaron 4 criterios como indicativos para la calibración (ver Tabla 15).

Tabla 15. Criterios de rendimiento del modelo hidrológico

| Criterio Estadístico | Rango de Valores | Rendimiento del Modelo | Referencia |
|---|--|---|----------------------|
| Raíz cuadrada del error cuadrático medio $RMSE = \left[\frac{(\sum_{t=1}^n Q_t^{sim} - Q_t^{obs})^2}{n} \right]^{0.5}$ | Inferior a la mitad de la desviación estándar | Satisfactorio | Moriasi et al., 2007 |
| Percent bias $PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim}) * 100}{\sum_{t=1}^n Q_t^{obs}}$ | PBIAS < ±10 ±10 < PBIAS < ±15 ±15 ≤ PBIAS ≤ ±25 PBIAS ≥ ±25 | Excelente Bueno Satisfactorio Malo | Moriasi et al., 2007 |
| Coefficiente de determinación $R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})(Q_t^{sim} - \bar{Q}^{sim})]^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2 \sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - \bar{Q}^{sim})^2}$ | r ≥ 0.5 0 ≤ r < 0.5 | Satisfactorio Malo | Santhi et al., 2001 |
| Criterio Nash-Sutcliffe | | | |

| | | | |
|--|--|--|----------------------|
| $NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{sim})^2}$ | 0.75 < NSE ≤ 1.00 0.65 < NSE ≤ 0.75 0.50 < NSE ≤ 0.65 0.40 < NSE ≤ 0.5 NSE ≤ 0.4 | Excelente Bueno Satisfactorio Aceptable Malo | Moriasi et al., 2007 |
| Relación entre el RSME y la desviación estándar $RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2}}$ | 0.00 ≤ RSR ≤ 0.50 0.50 ≤ RSR ≤ 0.60 0.60 ≤ RSR ≤ 0.70 RSR ≥ 0.70 | Excelente Bueno Satisfactorio Malo | Moriasi et al., 2007 |

Finalmente para la validación del modelo, usaremos los caudales históricos de años posteriores a los usados durante la calibración. El análisis consiste en efectuar una simulación con el modelo y comparar los caudales, se usaran también los criterios estadísticos (ver Tabla 15). Siempre y cuando los rendimientos del modelo sean como mínimo aceptables, se dará por validado el modelo.

CAPITULO 4. CALCULOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Generación de la Base de Datos Climáticos

Seguidamente, se usaron programas de rutina como el dew02, que calcula el valor promedio diario del punto de rocío, usando información de temperatura y humedad relativa (ver Figura 28). Mientras que el programa pcpSTAT genera parámetros estadísticos promedios diarios de la precipitación (ver Figura 29) y ambos programas son de la autoría del doctor Liersch, 2003.

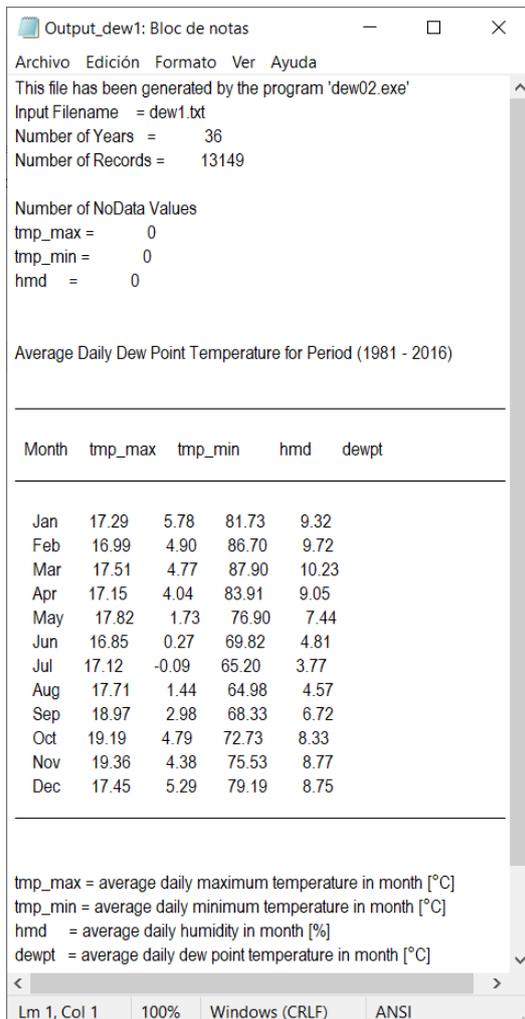


Figura 28. Punto de rocío para una estación usando dew02

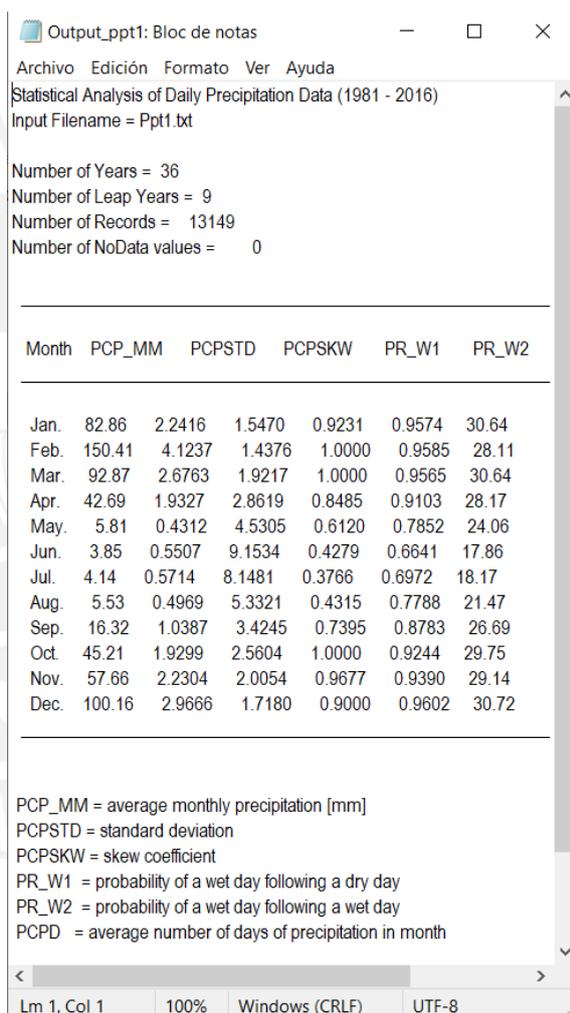


Figura 29. Parámetros de precipitación para una estación usando pcpSTAT

Finalmente, se creó la base de datos climáticos WGEN_Estaciones (ver Anexo A), donde se pueden observar los parámetros estadísticos de temperatura, humedad, radiación solar y punto de rocío obtenidas del uso de los programas del doctor Liersch.

4.2. Ejecución del Modelo QSWAT

Para correr el modelo se introdujo el DEM de la zona de estudio, ubicando la salida del flujo dentro del DEM se generó las corrientes de flujo principales de la cuenca, para esto también se usó un shape file con los flujos secundarios (ver Figura 30).

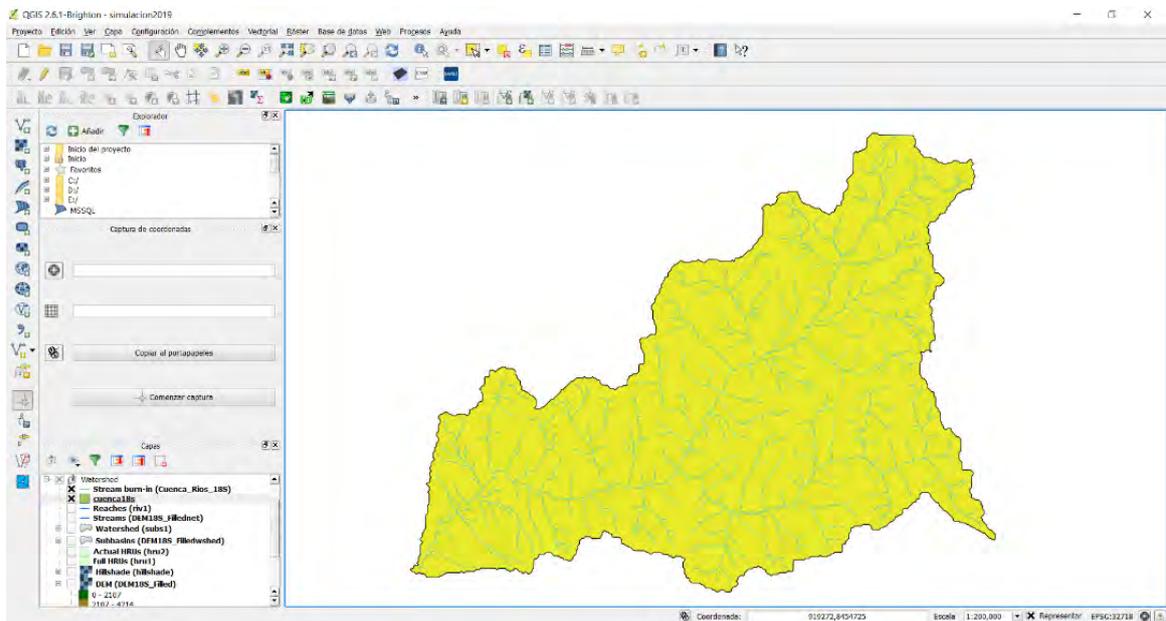


Figura 30. Cuenca delimitada con cursos de agua

Luego se procedió a generar las subcuencas, de manera que sus extensiones se comprendan entre 2000 y 15000 hectáreas, se generaron 11 sub cuencas (ver Figura 31),

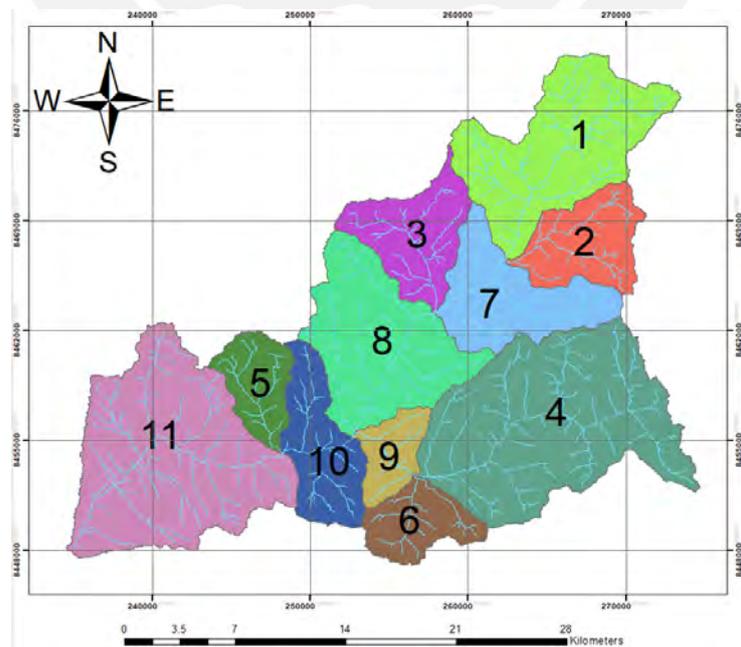


Figura 31. Subcuencas delimitadas por QSWAT

Luego se procedió a ingresar los mapas de uso del suelo y de tipo de suelo, seguidamente se colocaron los parámetros para definir las unidades hidrológicas de respuesta, HRU por sus siglas en inglés (ver Figura 32). Se consideró bandas de pendiente cada 5%, debido a la accidentada geografía, de esta manera dividiremos los HRUs según sus pendientes promedio. Por último se usaron valores umbrales de área respecto al área total de 10% para el tipo de suelo y uso de suelo, mientras que 5% para las pendientes. Los valores umbrales son considerados para excluir del modelo las características menos influyentes y facilitar el procesamiento.

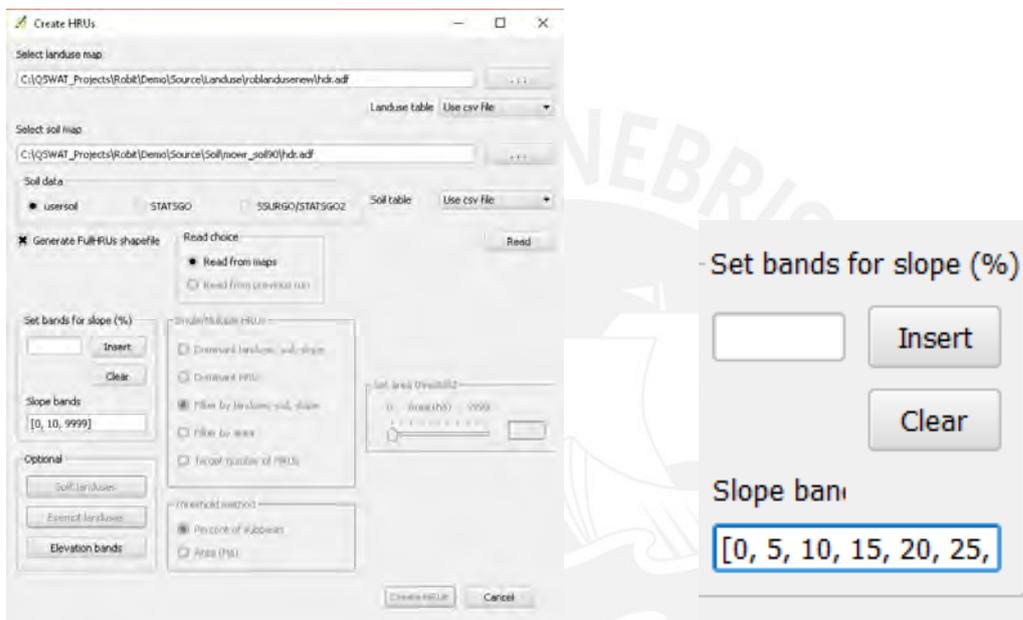


Figura 32. Creación de HRUs

El modelo determino la ubicación y la cantidad de los HRU, 237 para este modelo, según las características colocadas manualmente. Seguidamente se introdujo la base de datos climáticos que fue creada con tablas dinámicas y elaboradas en Access, considerando las estaciones con información de precipitación, radiación solar, humedad relativa, temperatura máxima y mínima (ver Figura 33).

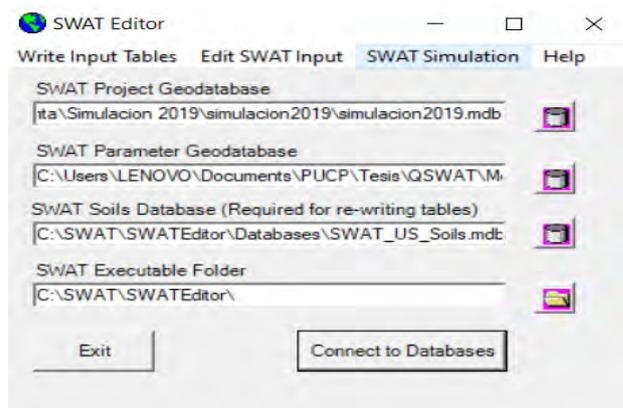


Figura 33. Interface de bases de datos

Finalmente se corrió el programa SWAT considerando un periodo de calentamiento de 3 años, los tres primeros años no serán considerados para los resultados. El periodo de simulación fue ubicado entre los 1981 al 2016 y se modeló mensualmente. (ver Figura 34).

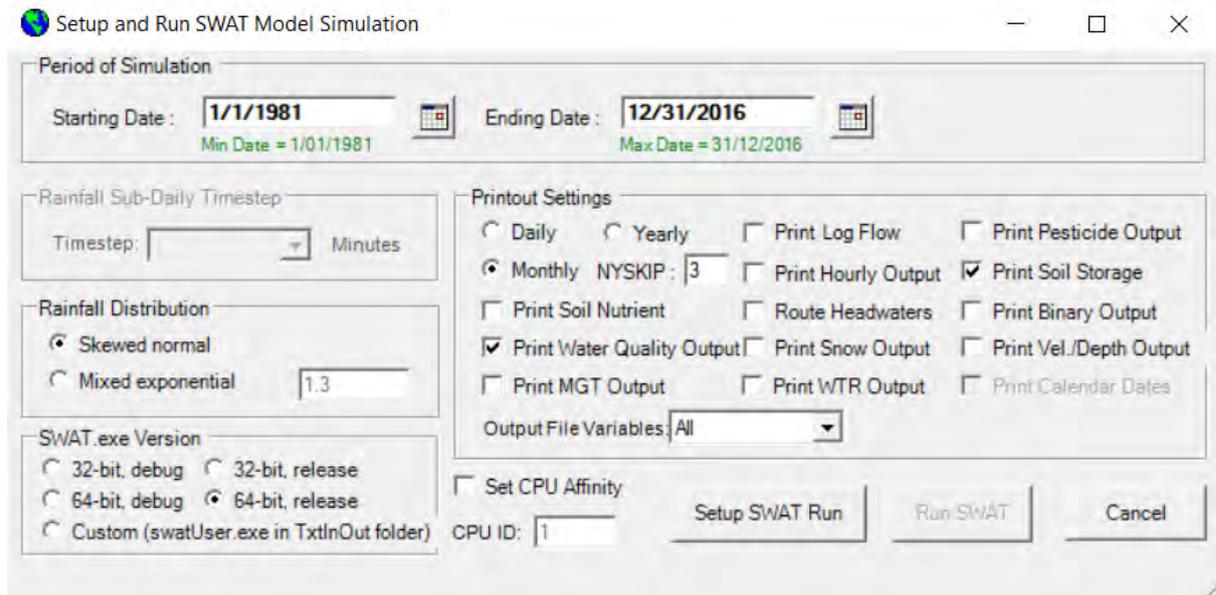


Figura 34. Interface para correr el modelo SWAT

Para visualizar los resultados por subcuenca por HRU o por flujo de agua se procede a colocar el escenario (simulación) y la tabla de salida del SWAT, luego el intervalo de tiempo a usar (corresponde a los años simulados), las variables y el resumen según la necesidad (diario, mensual, anual, máximo y mínimo) (ver Figura 35).

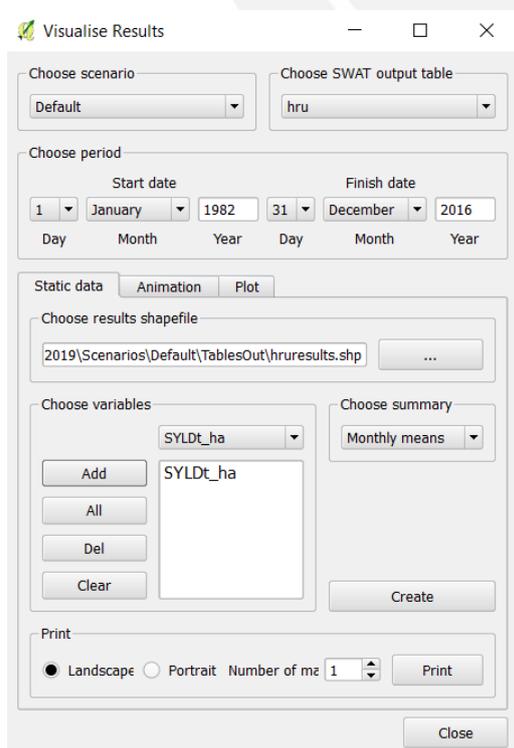


Figura 35. Interface para visualizar resultados

4.3. Análisis de Sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se usaron los parámetros más sensibles (ver Tabla 14). El factor t-Stat es un factor que indica que parámetros son los más sensibles, un mayor valor absoluto del factor indica la sensibilidad del parámetro. Por otro lado el P-Value es un factor que muestra que tan importante es la sensibilidad del parámetro para el modelo, valores cercanos al 0 indican cuales son menos influyentes. Se puede observar en la Figura 36 que los factores más importantes son ALPHA_BF que corresponde al factor de recesión del flujo base y GWQMN que se refiere al límite en el nivel del agua al acuífero poco profundo para flujo base. En contraste el factor CN2 y el GW_DELAY muestran ser poco influyentes al tener factores P-Value cercanos al 0, pero por otro lado, son parámetros muy sensibles (t-Stat elevados) (ver Figura 36).

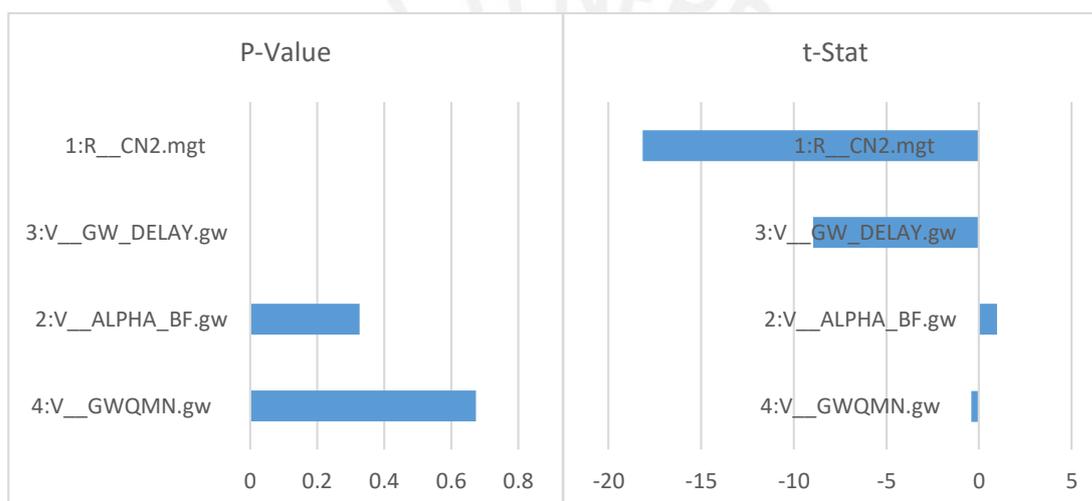


Figura 36. Resultados de análisis de sensibilidad.

Los valores del P-Value que sean mayores a 0.2, deben ser considerados para la calibración del modelo (Srinivasan, 2015). Dos de los parámetros superan el valor mínimo indicado, por lo que serán usados para la calibración. Sin embargo al tener valores del factor t-Stat elevados, los parámetros CN2 y GW_DELAY fueron considerados también en la calibración.

4.4. Calibración y Validación del Modelo

Para la calibración del modelo se usaron los datos mensuales de los años comprendidos entre el 2007 hasta el 2011, se usaron caudales promedios. Para lograr realizar la calibración de manera exitosa, se realizaron 3 iteraciones: primero con 200 para calibrar los parámetros sensibles y más influyentes, luego se iteró 500 veces, para calibrar todos los parámetros escogidos en el análisis de sensibilidad. Por ultimo 1000 simulaciones, para afinar los parámetros a rangos más exactos, La elección de la cantidad de iteraciones es

arbitraria, sin embargo se puede tener consideraciones dependiendo de la cantidad de parámetros y la capacidad del procesador disponible. Los criterios estadísticos de la Tabla 15 fueron usados para comprobar el rendimiento del modelo, hasta obtener valores buenos o excelentes, en las simulaciones comprendidas entre el 2007 y 2012 (ver Tabla 16).

Para la validación se usaron caudales promedios mensuales durante el 2012 hasta el 2016 donde se obtuvo usando los criterios estadísticos (ver Tabla 15) un rendimiento satisfactorio.

Gráficamente se observa en la Figura 37 los caudales simulados vs los caudales observados, durante las etapas de calibración y validación. También se observa en la parte superior la gráfica la precipitación registrada durante el mismo periodo de tiempo. El gráfico de precipitación y el de los caudales observados o simulados guardan coherencia.

El rendimiento del modelo y su comparación, durante la etapa de calibración y modelación, se observa en la Tabla 16. El periodo de calibración muestra un rendimiento excelente gracias a las modificaciones hechas en los valores mínimos y máximas de los parámetros mencionados anteriormente y mientras que en la validación se obtiene un rendimiento satisfactorio en tres de los cuatro criterios, mientras que en uno obtiene el rendimiento de bueno.

Tabla 16. Rendimiento del modelo durante la calibración y validación

| Criterio Estadístico | Calibración | | Validación | |
|----------------------|-------------|------------------|------------|----------------------|
| | Valor | Rendimiento | Valor | Rendimiento |
| PBIAS | -8.0 | Excelente | -20.8 | Satisfactorio |
| R² | 0.98 | Satisfactorio | 0.66 | Satisfactorio |
| NSE | 0.98 | Excelente | 0.62 | Satisfactorio |
| RSR | 0.15 | Excelente | 0.60 | Bueno |
| | | Excelente | | Satisfactorio |

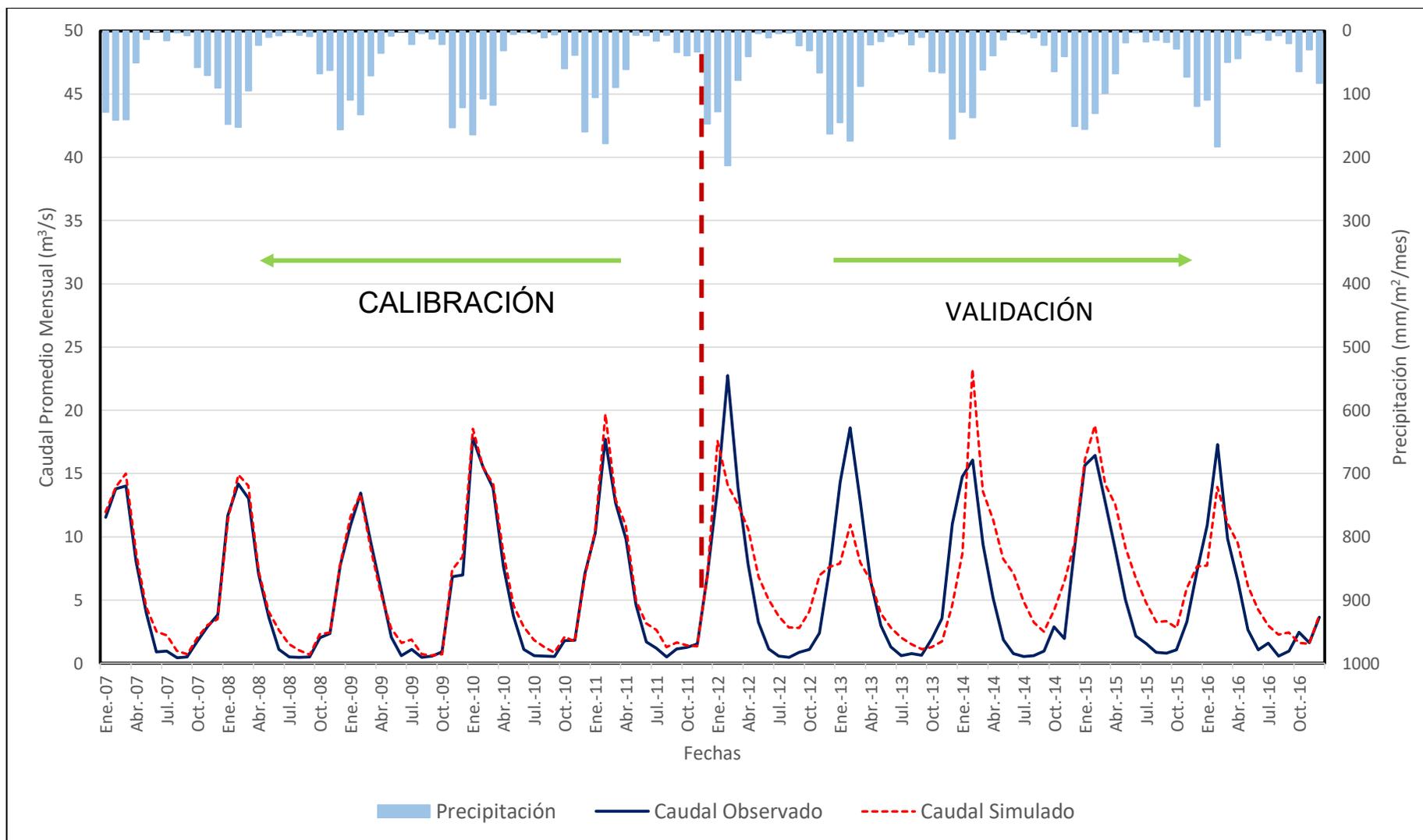


Figura 37. Contraste de caudales observados y simulados durante la etapa de calibración y validación

La correlación entre los caudales mensuales simulados con los caudales mensuales observados, durante la validación, se puede apreciar en la Figura 38. Se observa en el periodo de calibración que la línea de tendencia es prácticamente idéntica a la línea de 45°, ello muestra una baja dispersión.

También se puede observar que en el periodo de validación en la Figura 39 existe la tendencia a sobrestimar los caudales pequeños, mientras que subestima las avenidas. La pendiente de su línea de tendencia es 0.6775 que muestra una mayor dispersión respecto a la etapa de calibración, sin embargo la validación del modelo cumple con los valores permisibles de los criterios estadísticos.

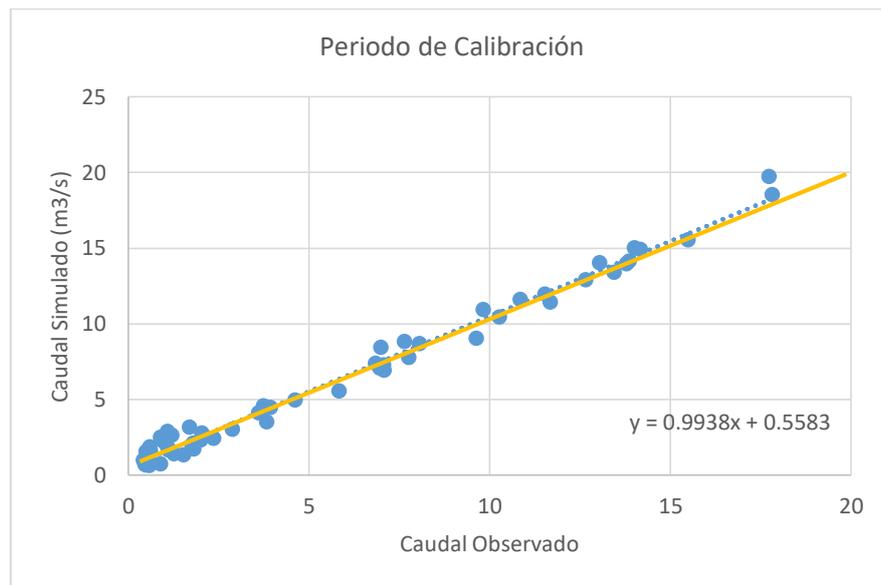


Figura 38. Correlación de caudal observado y caudal simulado durante la calibración

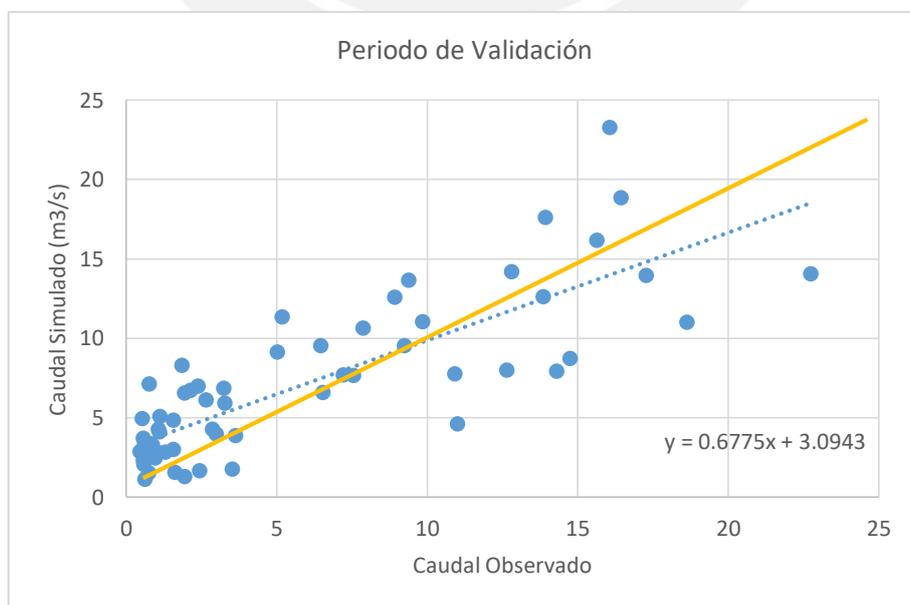


Figura 39. Correlación de caudal observado y caudal simulado durante la validación

4.5. Producción de Sedimentos en la Cuenca

La cuenca se dividió en 11 subcuencas (ver Figura 31) y el cálculo de producción de sedimentos se puede analizar para cada una de estas. Además, también es posible analizarlas para cada una de las 237 HRU delimitadas dentro de la cuenca por el modelo.

Para el cálculo de producción de sedimentos se usó la ecuación de MUSLE (ver Ecuación 14). Las características dentro de cada subcuenca son muy variadas por la existencia de 237 HRU's en toda la extensión de la cuenca. Sin embargo, existen características dominantes para cada subcuenca (ver Tabla 17).

Tabla 17. Características de las Subcuencas

| Subcuenca | Uso de Suelo Predominantes | Tipo de Suelo Predominantes (ver Tabla 13) | | Pendiente | | |
|-----------|----------------------------|---|---------|----------------|---------------|----------------|
| 1 | Pastizales | 7003 hectáreas | Glacier | 5278 hectáreas | ≤ 50% | 3609 hectáreas |
| | Tierra Estéril | 1820 hectáreas | I-Bh-c | 3694 hectáreas | 40% - 50% | 1078 hectáreas |
| | Cuerpos de Agua | 130 hectáreas | | | 30% - 40% | 1279 hectáreas |
| | Pastizales Mixtos | 1820 hectáreas | | | 0% - 30% | 3006 hectáreas |
| | Bosque Nativo | 4 hectáreas | | | | |
| 2 | | | | | ≤ 50% | 1528 hectáreas |
| | Pastizales | 3739 hectáreas | Glacier | 3030 hectáreas | 40% - 50% | 517 hectáreas |
| | Tierra Estéril | 15 hectáreas | I-Bh-c | 724 hectáreas | 30% - 40% | 595 hectáreas |
| 3 | | | | | 0% - 30% | 1114 hectáreas |
| | Pastizales | 3981 hectáreas | I-Bh-c | 4115 hectáreas | ≤ 50% | 1576 hectáreas |
| | Tierra Estéril | 134 hectáreas | | | 40% - 50% | 578 hectáreas |
| 4 | | | | | 30% - 40% | 691 hectáreas |
| | | | | | 0% - 30% | 1269 hectáreas |
| | | | | | ≤ 50% | 4623 hectáreas |
| | Pastizales | 14296 hectáreas | Glacier | 4864 hectáreas | 40% - 50% | 1849 hectáreas |
| | Pastizales Mixtos | 7 hectáreas | I-Bh-c | 9439 hectáreas | 30% - 40% | 2281 hectáreas |
| 5 | | | | | 25% - 30% | 1065 hectáreas |
| | | | | | 20% - 25% | 1116 hectáreas |
| | | | | | 0% - 20% | 3153 hectáreas |
| | Pastizales | 2461 hectáreas | I-Bh-c | 2461 hectáreas | ≤ 50% | 1148 hectáreas |
| | | | | | 40% - 50% | 343 hectáreas |
| 6 | | | | | 30% - 40% | 358 hectáreas |
| | | | | | 25% - 30% | 172 hectáreas |
| | | | | | 20% - 25% | 129 hectáreas |
| | Pastizales | 2616 hectáreas | I-Bh-c | 2616 hectáreas | 0% - 20% | 311 hectáreas |
| | | | | | ≤ 50% | 665 hectáreas |
| 6 | | | | | 40% - 50% | 335 hectáreas |
| | | | | | 30% - 40% | 512 hectáreas |
| | | | | | 25% - 30% | 314 hectáreas |
| | | | | 20% - 25% | 267 hectáreas | |

| | | | | | | |
|----|-------------------|-----------------|----------|----------------|-----------|----------------|
| | | | | | 15% - 20% | 227 hectáreas |
| | | | | | 0% - 15% | 296 hectáreas |
| | | | | | ≤ 50% | 1884 hectáreas |
| | | | | | 40% - 50% | 721 hectáreas |
| | Pastizales | 5195 hectáreas | Glacier | 1054 hectáreas | 30% - 40% | 867 hectáreas |
| 7 | Pastizales Mixtos | 6 hectáreas | I-Bh-c | 4147 hectáreas | 25% - 30% | 445 hectáreas |
| | | | | | 20% - 25% | 351 hectáreas |
| | | | | | 15% - 20% | 308 hectáreas |
| | | | | | 0% - 15% | 625 hectáreas |
| | | | | | ≤ 50% | 3835 hectáreas |
| | | | | | 40% - 50% | 1159 hectáreas |
| | Pastizales | 8115 hectáreas | I-Bh-c | 8115 hectáreas | 30% - 40% | 1201 hectáreas |
| 8 | | | | | 25% - 30% | 575 hectáreas |
| | | | | | 20% - 25% | 418 hectáreas |
| | | | | | 0% - 20% | 927 hectáreas |
| | | | | | ≤ 50% | 916 hectáreas |
| | | | | | 40% - 50% | 269 hectáreas |
| | Pastizales | 1875 hectáreas | I-Bh-c | 1875 hectáreas | 30% - 40% | 263 hectáreas |
| 9 | | | | | 25% - 30% | 123 hectáreas |
| | | | | | 0% - 25% | 304 hectáreas |
| | | | | | ≤ 50% | 1843 hectáreas |
| | | | | | 40% - 50% | 548 hectáreas |
| | Pastizales | 3992 hectáreas | I-Bh-c | 992 hectáreas | 30% - 40% | 585 hectáreas |
| 10 | | | | | 25% - 30% | 293 hectáreas |
| | | | | | 0% - 25% | 723 hectáreas |
| | | | | | ≤ 50% | 6302 hectáreas |
| | | | | | 40% - 50% | 1730 hectáreas |
| | | | | | 30% - 40% | 1814 hectáreas |
| | | | I-Bh-c | 3016 hectáreas | 25% - 30% | 882 hectáreas |
| | Pastizales | 13264 hectáreas | HI 11-3b | 525 hectáreas | 20% - 25% | 685 hectáreas |
| 11 | | | K1 3-3a | 9723 hectáreas | 15% - 20% | 589 hectáreas |
| | | | | | 10% - 15% | 462 hectáreas |
| | | | | | 5% - 10% | 391 hectáreas |
| | | | | | 0% - 5% | 409 hectáreas |

Los valores de las variables que se usan en la ecuación MUSLE (ver Ecuación 14) se hallaron de manera automática con las características introducidas al modelo SWAT. El proceso realizado por el modelo para cada factor de la ecuación MUSLE se describirá a continuación.

Los componentes de escurrimiento medio y escurrimiento máximo (" Q " y " q_p " respectivamente) son calculadas por el programa con la base de datos climáticos introducida (ver Anexo A), específicamente con el registro de las precipitaciones. Luego, el método de la FAO que clasifica los suelos según sus características (ver Tabla 4) otorga

el factor de erosionabilidad “*K*”. Por otro lado, el factor “*LS*” representa el efecto de la topografía en la erosión del suelo, el programa lo halla mediante el uso de las pendientes y el DEM del cual el programa obtiene las longitudes de las pendientes (ver Ecuación 15 y Ecuación 16).

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \times (0.065 + 0.045s + 0.0065s^2) \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Donde:

- LS* es el factor de topografía.
- λ es la longitud de la pendiente.
- s* es la pendiente del terreno%.
- m* es el factor de longitud de la pendiente.

$$m = \frac{\sin \theta}{0.05 + \sin \theta + 0.269(\sin \theta)^{0.8}} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

Donde:

- θ es el ángulo de la pendiente.

El modelo SWAT realiza los cálculos para cada HRU con el DEM (ver Figura 25), de donde obtiene las pendientes, longitudes de pendiente y los ángulos de pendiente. El factor de manejo de cultivo “*C*” es un valor empírico obtenido del uso del suelo, los valores usados son los propuestos por Wischmeier y Smith (1978). Finalmente, el factor “*P*” es hallado empíricamente durante el periodo de calibración (ver Tabla 16), para obtener un ajuste del modelo.

Se aprecia que las subcuencas 8, 10 y 9 tienen una erosión elevada, seguidamente las subcuencas 3, 7 y 4 presentan un nivel de erosión intermedio. Finalmente las subcuencas 6, 5, 1, 11 y 2 presentan una erosión bastante pequeña (ver Figura 40).

Las tasas de erosión por subcuenca, pueden observarse en la Tabla 18, sin embargo estos resultados deben interpretarse con precaución. Los valores dados por la tabla son promedio, los mismos que no son uniformes para la totalidad de la extensión de cada subcuenca.

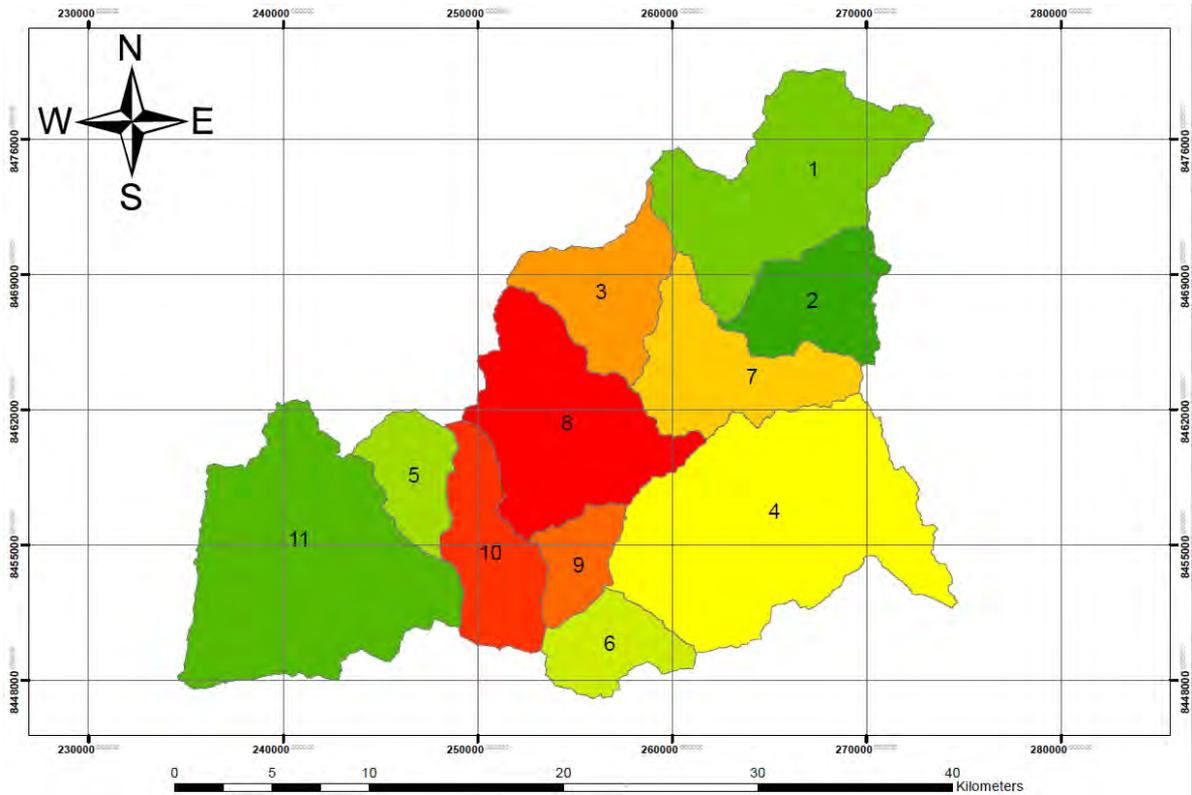


Figura 40. Grados de erosión por subcuencas

Tabla 18. Tasa de sedimentos generados por subcuenca

| Subcuenca | Área (km ²) | Sedimentos (Ton/Ha/año) | Producción de sedimentos (Ton) |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | 90 | 13.49 | 121410 |
| 2 | 38 | 5.91 | 22458 |
| 3 | 41 | 35.31 | 144771 |
| 4 | 143 | 32.02 | 457886 |
| 5 | 25 | 16.07 | 40175 |
| 6 | 26 | 27.12 | 70512 |
| 7 | 52 | 32.79 | 170508 |
| 8 | 81 | 45.46 | 368226 |
| 9 | 19 | 39.60 | 75240 |
| 10 | 40 | 42.18 | 168720 |
| 11 | 133 | 11.13 | 148029 |
| TOTAL de Toneladas por año | | | 1'787935 |

La totalidad del área de cada subcuenca, no produce el volumen de sedimentos promedio, hay zonas donde se concentra la erosión, por las características particulares que pueden presentarse en cada una. Para observar a mayor detalle, se analizará la tasa de erosión

usando las HRU del modelo. Se clasifico la erosión en 3 grupos: verde, para baja erosión; amarillo, para erosión media; y rojo, para erosión elevada (ver Figura 42).

La generación de sedimento mensual para cada subcuenca puede verse en la Figura 41, se observa picos de producción durante los meses de avenidas, mientras que en los meses de estiaje la producción de sedimento es muy cercana a 0 ton/ha/año (ver Anexo B).

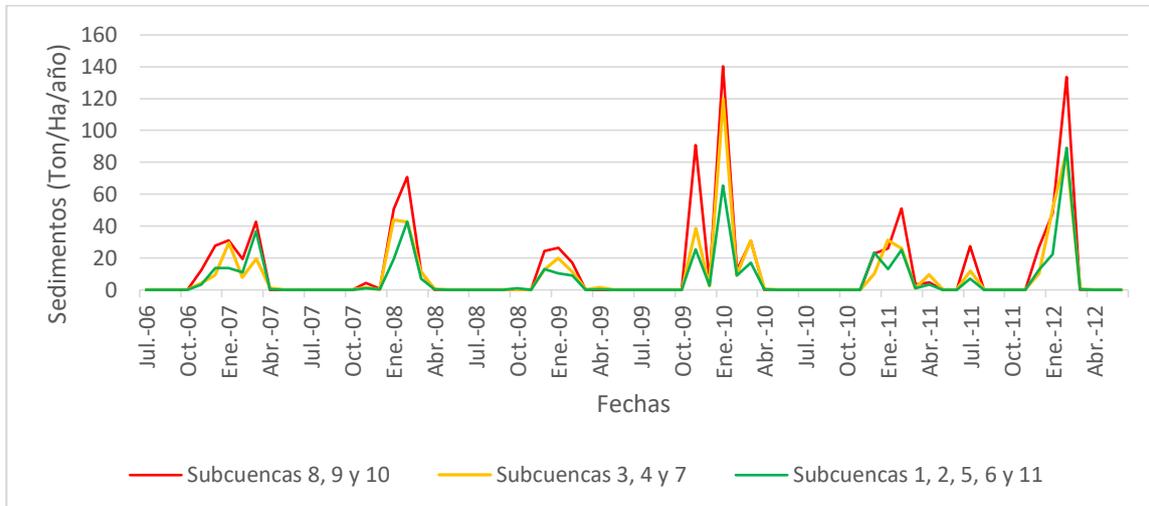


Figura 41. Producción de sedimentos a través del tiempo

Al analizar los sedimentos producidos por cada subcuenca, se observa en la Figura 27 que el tipo de suelo influye enormemente. Las subcuencas 1, 2 y parte de las subcuencas 4 y 7 (ver Figura 40) tienen un suelo tipo Glacier, que corresponde a sedimentos generados por la acción erosiva de los glaciares. La composición de este suelo está formada por grava, bolonería, arena, limos, grava y arcilla. Sin embargo, muestra una gran resistencia a la erosión pluvial por sus características únicas y a la continuidad de las capas que lo conforman.

Por otro lado se observa que el tipo de suelo predominante es páramo subalpino y tundra alpina (ver Figura 27), las subcuencas 3, 5, 6, 8, 9, 10 y parte de las subcuencas 4 y 7 están formadas por este tipo de suelo. La capacidad erosiva de este tipo de suelo en particular es media y sin embargo, puede generarse un nivel de erosión elevado, con pendientes empinadas y precipitaciones de mediana a intensa magnitud. Se puede observar, además, que la erosión se concentra en este tipo de suelo con pendientes elevadas (zonas de color rojo) (ver Figura 42). El uso del suelo y la cobertura vegetal influye enormemente, áreas sin vegetación o con pastizales de baja calidad amplifican la producción de sedimentos.

Particularmente, la subcuenca 11 presenta un nivel de erosión medio a pesar del tipo de suelo predominante, que es conformado en gran medida por calizas, y de registrar menor intensidad en las precipitaciones. Las pendientes son moderadas, lo que deja como el factor erosivo más determinante al uso del suelo. La ubicación de la capital de distrito, la ubicación de cultivos y pastizales de mayor calidad, se encuentran en esta subcuenca. La agricultura y ganadería (ovinos, caprinos y vacunos) se concentra en esta zona, por los pastizales y laymes. La agricultura se presenta en dos formas predominantes: sobre laderas y en terrazas. Las áreas de cultivo sobre terrazas mitigan los impactos erosivos y en la cuenca de Pitumarca se suelen ubicar en los alrededores del río Pitumarca. Los producción agrícola presente es mayoritariamente de maíz, haba grano, cebada grano y trigo, en orden descendente y también se suele sembrar a partir de septiembre y la primera cosecha se realiza los primeros días de febrero. La fecha de cosecha ocurre cuando las lluvias siguen presentes, este detalle, genera un incremento en la producción de sedimentos (ver Figura 41).

Las zonas pegadas al río y cursos de agua tienen un nivel de erosión bajo y eventualmente contienen bancos de arena que se sedimentan en las curvas de los mismos cursos de agua. En las zonas de mayor altitud al costado del flujo de la red hídrica se ubican pastizales de muy buena calidad y ello mejora la capacidad impermeable del suelo.

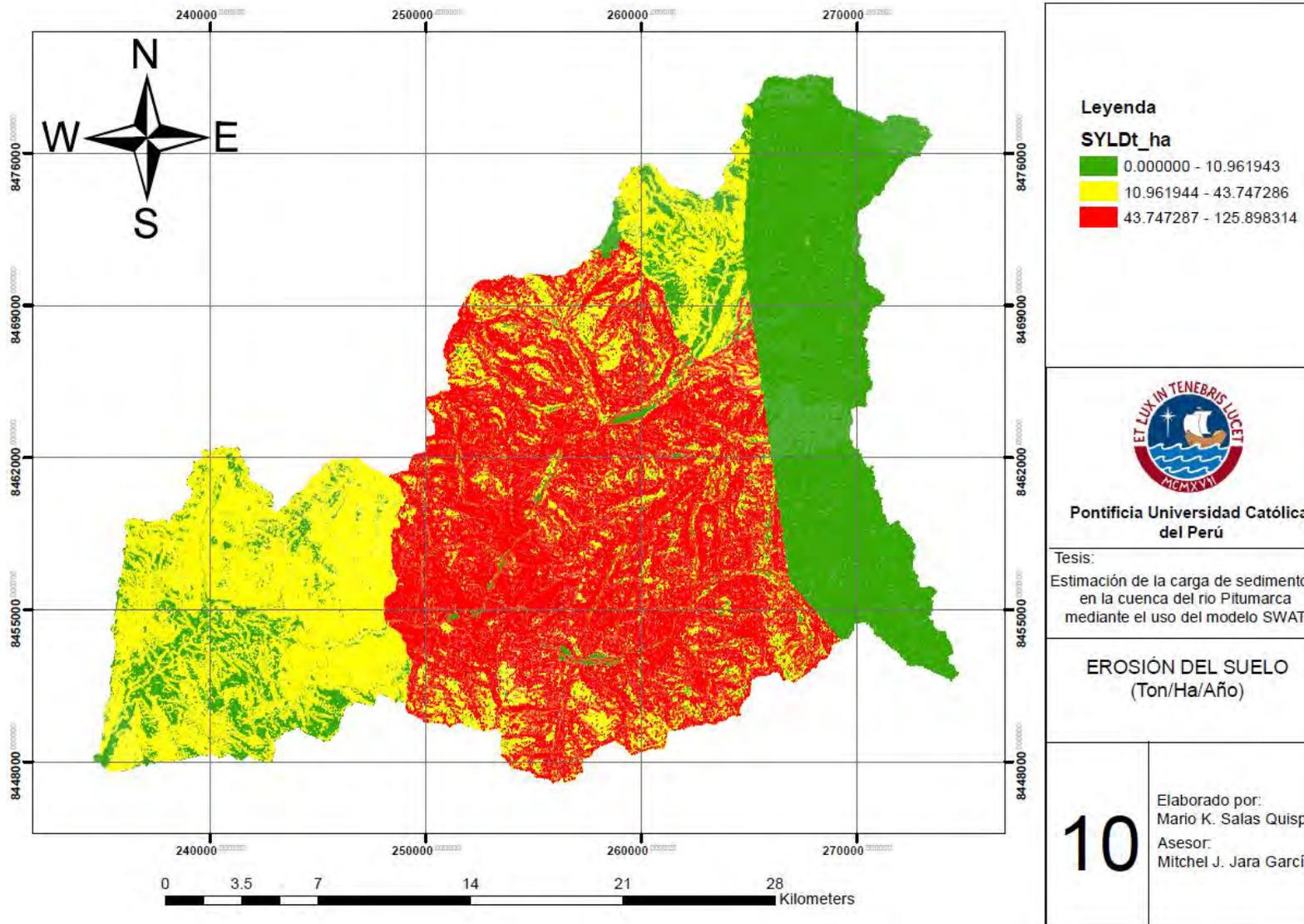


Figura 42. Erosión del suelo en la cuenca del río Pitumarca

CAPITULO 5. MEDIDAS PARA LA REDUCCIÓN DE EROSIÓN

5.1. Canales y Zanjas

Una de las medidas más efectivas y de bajo costo son las zanjas de infiltración o los canales de coronación, la finalidad de estos métodos es evitar que el agua, generada por las precipitaciones, procedente de la cuenca alta, continúe con su recorrido natural (escorrentía), redirigiendo el agua a puntos de captación o en cauce (canales de coronación) o generando que el agua se infiltre (zanjas de infiltración).

El uso de los canales de coronación está extendido en el sector minero, agrícola, construcción, etc. En contraste las zanjas de infiltración son usadas casi exclusivamente en el sector agrícola.

5.1.1. Canales de coronación.

Los canales de coronación tienen este nombre debido a su ubicación, son construidos en las partes altas, evitando que el agua llegue a las zonas a inferiores. Además pueden ser usadas para evitar que el agua de escorrentía sea contaminada cambiando su flujo. Su uso en nuestro país es muy común en las operaciones mineras con la finalidad de que las aguas de lluvia sean captadas antes de llegar al relave minero, evitando así que el agua procedente de la precipitación entre en contacto con el relave. También el sector agrícola las emplea para captar agua de las partes altas y redirigir los flujos a canales de riego o como medida de protección para evitar pérdidas de los cultivos ubicados el parte baja.

Para que los canales de coronación sean eficientes es necesario que se construyan con pendientes bajas, de lo contrario la erosión ocasionada, por la fuerza del agua, puede ser aún mayor. Siguiendo esta característica, el trazo de los canales debe ser estudiado con mucho cuidado, analizando al detalle la topografía de la cuenca. La mayoría de los canales de coronación no son revestidos, lo que los hace una opción económica. Sin embargo es necesario un mantenimiento anual, tras la época de avenidas, para asegurar su efectividad a la hora de evacuar las aguas.

Recientemente, en el sector agrícola se empezaron a usar canales de coronación revestidos con geomembranas, ello aumenta su costo considerablemente, pero el beneficio obtenido a la hora de su uso, es considerablemente mayor.

El diseño de los canales de coronación se debe limitar a los puntos donde el daño económico-social sea mayor, es decir en las partes altas de cultivos en laderas que representan el 4.01% del extensión de la cuenca. A continuación se hará una estimación

del costo de construcción de canales de coronación con diferentes características considerando el costo de la mano de obra, materiales, herramienta y maquinarias (ver Tabla 19). Lo costos son por metro cubico y contemplan el uso de maquinaria.

Tabla 19. Costo por metro lineal de canales de coronación

| Descripción | Unidad | Costo (Nuevos Soles) |
|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| Canal de Coronación sin revestimiento | m3 | 7.63 |
| Canal de Coronación con revestimiento | m3 | 41.70 |

5.1.2. Zanjas de infiltración.

Las zanjas de infiltración a diferencia de los canales de coronación no direccionan el flujo, al contrario, su finalidad es la de retener agua procedente de la escorrentía y generar condiciones para lograr que se infiltre dentro del suelo. Esta técnica es muy extendida alrededor del mundo, en Latinoamérica resalta Chile como un gran impulsor de su uso y de su investigación, para buscar mejoras dependiendo del tipo de suelo, la vegetación y la precipitación. La industria forestal, bastante desarrollada en el vecino país del sur, impulsa la investigación de nuevas técnicas relacionadas a estas zanjas.

Para su diseño se usa el programa Mauco, producido en Chile como parte del programa para el diseño de obras de conservación de suelos, este programa analiza las precipitaciones máximas, tipo de suelo y la cobertura que existe en un área delimitada. El programa una vez corrido genera dimensiones de las secciones de las zanjas, separaciones entre ellas y configuraciones en la extensión del área delimitada, para optimizar la infiltración del agua.



Figura 43. Zanjas de infiltración

Fuente: (Carrasco & Mora, 2017)

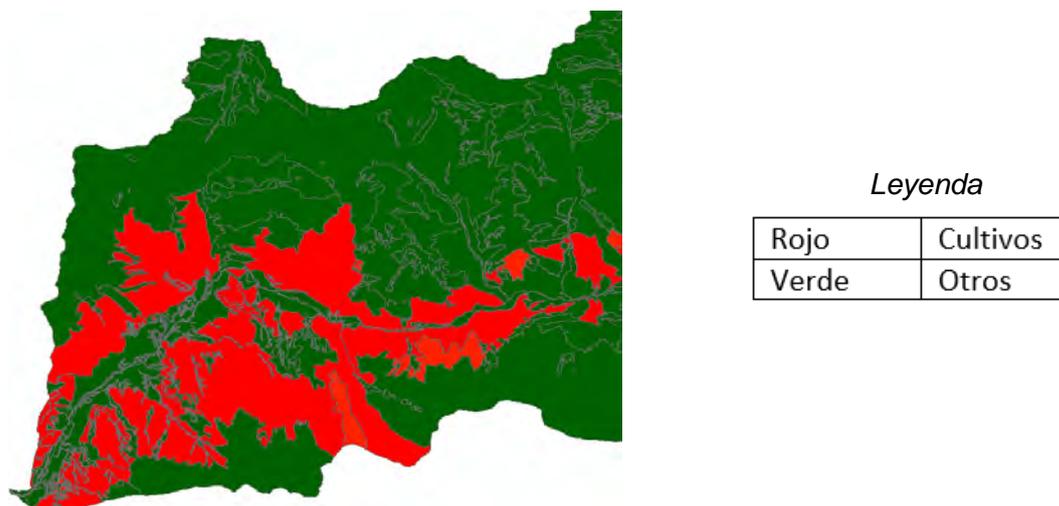


Figura 44. Áreas de cultivo con problemas erosivos

La zonas producción de sedimentos más elevadas en la subcuenca 11, se encuentran de color rojo (ver Figura 44). Estas son áreas de cultivo en laderas, la cobertura vegetal es media a baja y se ubican en el área agrícola más productiva, por su clima templado. Es en estos sectores donde se recomienda la construcción de canales de coronación, priorizando las zonas con mayor pendiente.

Se sugiere su uso en las zonas que pueden ser empleadas para la silvicultura. Su uso en terrenos agrícolas no es recomendado por la gran extensión que pueden ocupar estas zanjas. Para el distrito de Pitumarca, el programa genero las dimensiones de la sección 40 cm x 35 cm y la distancia perpendicular entre zanjas es de 4.5m a 6m. Las dimensiones de los árboles junto a zanjas de infiltración son mucho mayores (ver Tabla 20) que arboles de la misma edad sin zanjas de infiltración.

Tabla 20. Dimensiones de árboles de la especie *pinus radiata* con y sin empleo de zanjas

| | Zanjas | Sin zanjas |
|---|--------|------------|
| Diámetro promedio de árboles (cm) | 16.34 | 12.70 |
| Altura promedio de los arboles (m) | 18.90 | 13.70 |
| Volumen promedio (m³ x árbol) | 0.1369 | 0.0787 |

Fuente: Flores Villanelo, 2004

Para un adecuado aprovechamiento de las aguas lluvias acumuladas en las zanjas de infiltración, se deben plantar especies vegetales herbáceas, idealmente perennes, o plantas arbustivas, que servirán como barreras vivas, adelante y detrás de ellas. Esta práctica se realiza para hacer que las raíces retengan el suelo y eviten el desmoronamiento del terreno hacia el interior de la zanja, favoreciendo así el flujo normal del agua en el interior de los surcos (Carrasco & Mora, 2017).

En Perú existen cartillas informativas para la conservación del suelo, elaboradas por el MINAGRI (Ministerio de agricultura y riesgo) que sugiere valores según la pendiente del suelo y de la existencia o no de cobertura vegetal (ver Tabla 21). Si bien los valores son referenciales son bastante útiles para escoger las distancias entre las zanjas de manera práctica.

Tabla 21. Distancia entre zanjas según la pendiente

| Cobertura Vegetal | Pendiente de terreno (%) | Distancia entre zanjas (m) |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|
| Sin cobertura | 10 | 30 |
| | 15 | 20 |
| | 20 | 15 |
| | 25 | 13 |
| | 30 | 11 |
| Con cobertura | 10 | 45 |
| | 15 | 30 |
| | 20 | 23 |
| | 25 | 20 |
| | 30 | 17 |
| | 35 | 14 |
| | 40 | 12 |

Fuente: MINAGRI, 2014

Minagri incentiva a la construcción de zanjas de infiltración en zonas alto andinas de nuestro país, para ello el trabajo comunal resulta indispensable, otra finalidad, aparte de reducir la erosión, es generar un colchón hídrico producto de la infiltración del agua. La viabilidad necesaria para la construcción de las zanjas de infiltración debe ir de la mano de un análisis de estabilidad del suelo.

5.1.3. Ubicación de canales y zanjas.

Tras el análisis de erosión realizado a la cuenca, se puede observar zonas en las cuales la erosión es mayor debido a las pendientes elevadas, la colocación de zanjas de infiltración o cunetas de coronación son viables y efectivas para estos casos. Las zanjas de infiltración son más efectiva y económicas en zonas con pendientes ligeramente inclinadas, moderadamente inclinadas e inclinadas (pendientes comprendidas entre 10% y 20%) y con vegetación, estas características se encuentran en las zonas de color verde (ver Figura 45).

Por otro lado los canales de coronación son efectivos cuando se desea limitar la escorrentía superficial en zonas altamente vulnerables, tales como zonas con pendientes muy empinadas y un alto nivel de erosión. Para ubicar estas zonas se realizó un análisis de los efectos y características para cada HRU delimitado y también se clasificó las pendientes en 7 grupos, de los cuales los usados para la ubicación de los canales de coronación son de empinadas a extremadamente empinadas (ver Figura 46).

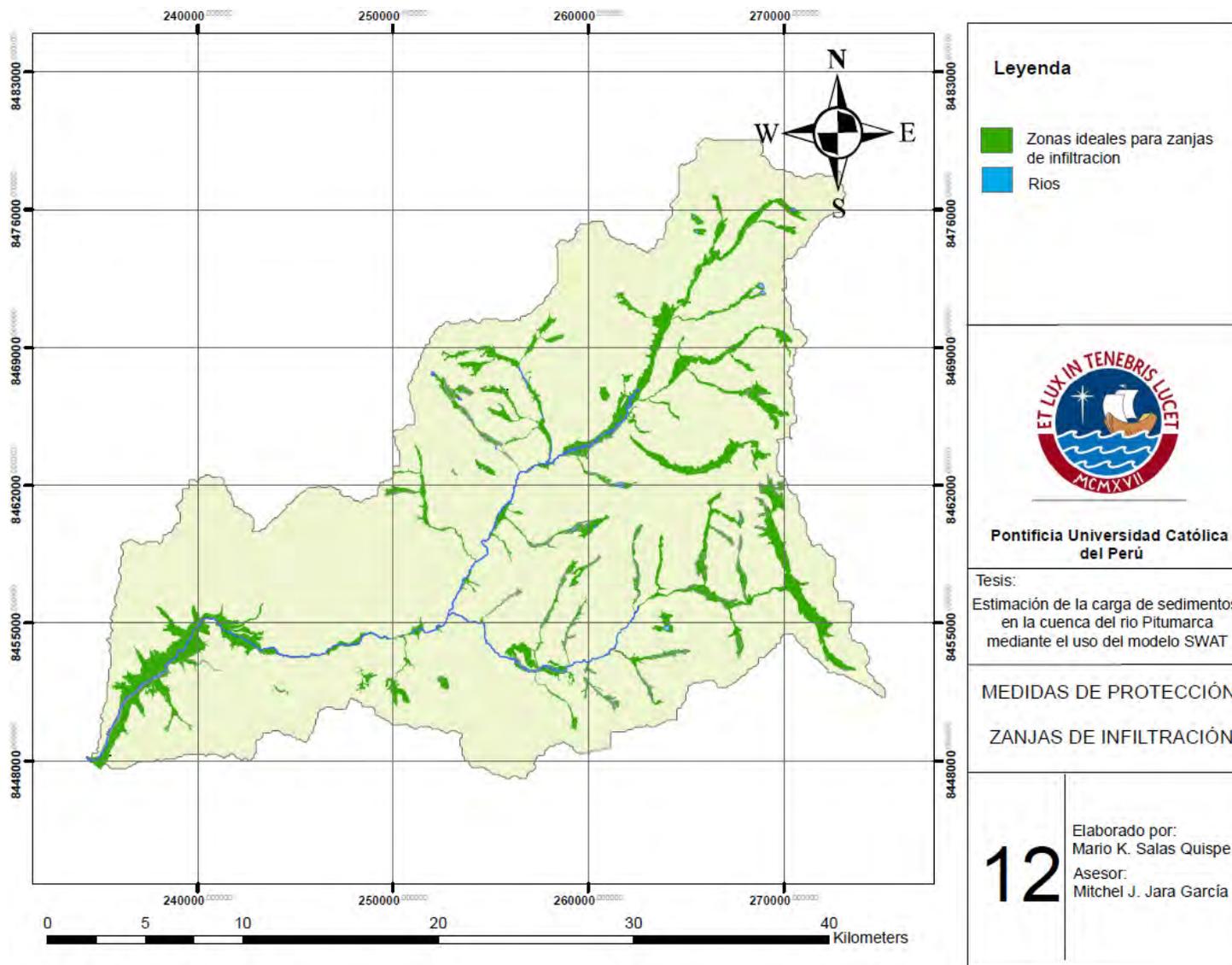


Figura 45. Medidas de Protección - Zanjas de infiltración

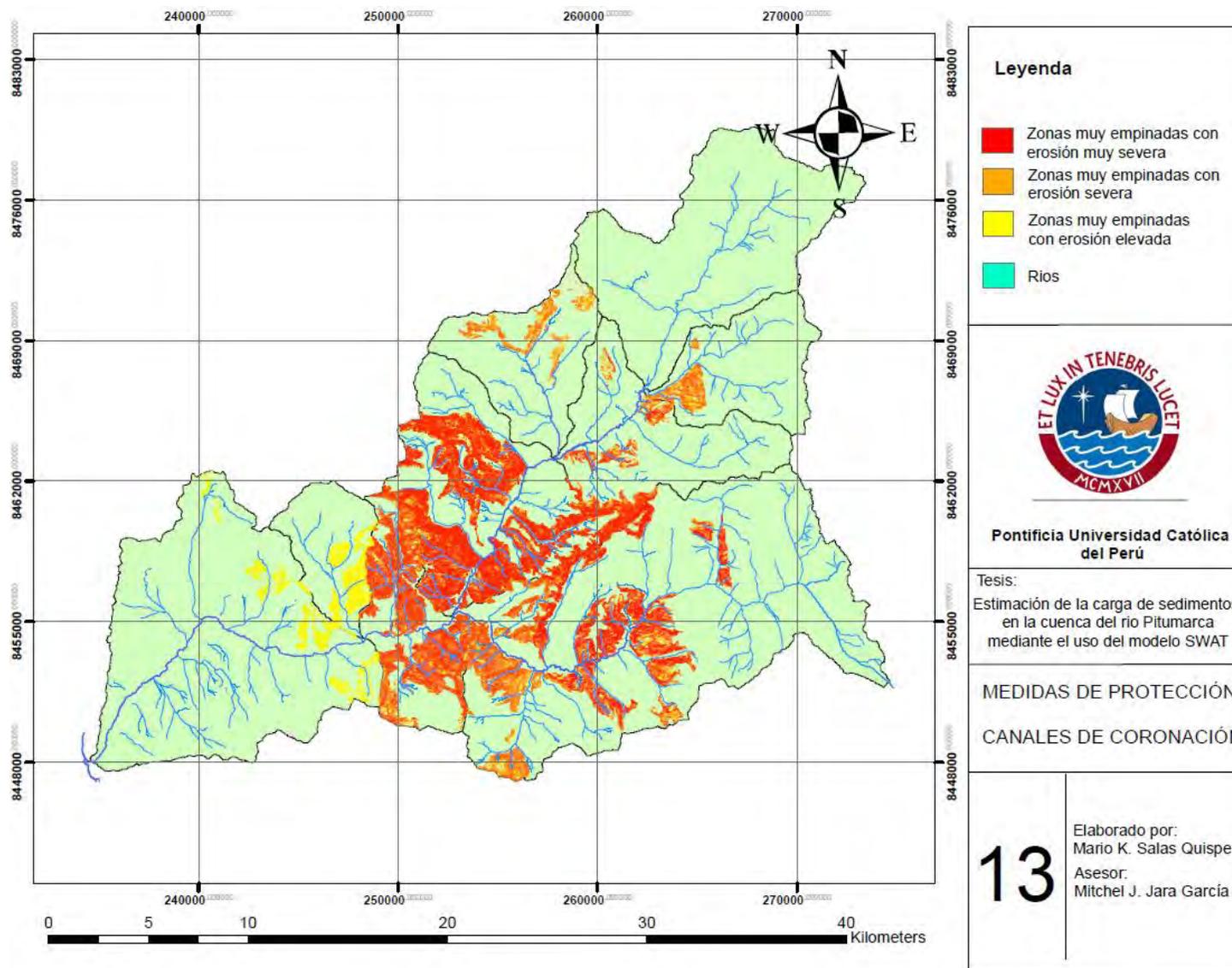


Figura 46. Medidas de Protección - Canales de Coronación

5.2. Reforestación

La reforestación es otra manera de protección de los suelos, pero resulta una medida efectiva a mediano y largo plazo, su implementación a corto plazo no muestra cambios significativos en la reducción de la erosión. Para ello es necesario analizar las características de las diferentes especies de árboles que sean capaces de crecer en los diferentes climas y que puedan ser usados posteriormente en la silvicultura, lo cual sería un incentivo adicional que generara el interés de la población local para su implementación.

Para su ubicación, se sugieren las extensiones de pastizales de calidad pobre y en mal estado, con el fin de mejorar la calidad y proteger el suelo, y ello a la larga repotenciará la economía local.

5.2.1. Especies locales recomendadas.

Las especies locales recomendadas se clasifican según su potencial y capacidad de reforestación. Los principales factores para la elección de las especies serán: experiencias anteriores y su práctica en zonas similares en el país o el extranjero, la velocidad de crecimiento de los árboles, el conocimiento técnico necesario para su cultivo y cuidado, su valor en el mercado, sus posibles usos y aplicaciones y por último la resistencia a plagas o enfermedades (ver Tabla 22).

Las arboles empleados para la silvicultura suele ser los eucaliptos, debido a su alta velocidad de crecimiento y resistencia al clima, sin embargo estos árboles no son los más efectivos para proteger el suelo de los efectos erosivos.

Tabla 22. Características de especies nativas de árboles y arbustos sugeridos para reforestación

| Espece | Características | Distribución | Rango Altitudinal | Suelos | Usos |
|------------------------------------|--|--|-----------------------------|---|---|
| Quinual – Polylepis Racemosa | Puede alcanzar hasta 8 metros de altura | En toda la cordillera de los andes | 3200 msnm - 4500 msnm | Franco arcillosos, franco arenosas | Combustible, propiedades medicinales y protección |
| Colle – Buddleja Coriacea | Puede alcanzar hasta 8 metros, sin embargo su tamaño promedio es de 2 metros | Desde la Cordillera Blanca hasta el Altiplano | 3000 msnm - 4350 msnm | Franco arcillosos, franco arenosas | Combustible, fertilizante, construcción y protección |

| | | | | | |
|--|---|--|-----------------------------|---|--|
| Queuña – Polylepis Incana | Tiene una altura promedio entre los 5 a 8 metros | Desde el sur de Colombia hasta el departamento de Cusco | 3250 msnm - 3700 msnm | Suelos pobres y con pedregosidad | Combustible, construcción, elaboración de herramientas. |
| Retama – Cassia Tormentosa | Considerado como árbol – arbusto mide entre 1 a 4 metros | Toda la Cordillera de los Andes, en Perú de Cajamarca a Puno | 2300 msnm - 3900 msnm | Suelos franco arenosos y franco arcillosos con pedregosidad | Medicinal, combustible, agricultura (mejora el contenido de nitrógeno del suelo) |
| Chachacomo – Escallonia Resinosa | Es un árbol – arbustos y puede medir desde los 2 metros hasta 10 metros | Es frecuente en la sierra central y sur del Perú | 3200 msnm - 3700 msnm | Suelos pobres, poco profundos con pedregosidad | Combustible, elaboración de herramientas, tinte |
| Aliso – Alnus Jorullensis | Árbol de gran altura entre los 10 a 15 metros en nuestro país | Desde México hasta Argentina | 2500 msnm - 3300 msnm | Suelos arenosos | Agroforestería, para recuperación de suelos |
| Quishuar – Buddleja Incana | Árbol que mide entre 5 a 7 metros | En los Andes desde Ecuador hasta Bolivia | 2300 msnm - 4000 msnm | Suelos alcalinos neutros, franco arenosas | Medicinales, tinte, carpintería y construcción |
| Molle – Schinus Molle | Árbol que llega a medir 5 metros de altura | Originario de Perú se puede encontrar hasta el noroeste de Argentina | 100 msnm - 3400 msnm | Suelos franco arenosos y profundos | Medicinal, repelente, industria y tintes |
| Sauco – Sambucus Peruviana | Árbol que mide entre los 3 a 6 metros de altura | Desde Costa Rica hasta el norte de Argentina | 2800 msnm - 3900 msnm | Suelos francos y limosos de poca profundidad. | Carpintería, construcción, medicinal y alimento e industria |

Fuente: Reynel & Felipe - Morales, 1987

De las especies de árboles listados (ver Tabla 22) se aconseja utilizar el aliso y la retama por la velocidad de crecimiento que presentan y por sus capacidad de recuperar el suelo. Una opción más interesante resulta el uso del sauco, sus frutos al ser comestibles pueden derivar en la generación de industria pequeña, enfocadas en la producción de mermelada o licores. El queuña y el quishuar resultan también opciones viables, por un lado el queuña es una planta medicinal que también puede servir como combustible y es bastante

resistente a los friajes y por otro lado el quishuar podría potenciar la silvicultura en el distrito de Pitumarca siendo ella una de las principales actividades económicas.

5.2.2. Especies no nativas recomendadas.

Existen especies no nativas o no locales, pueden ser consideradas como alternativas, sin embargo, se debe dar prioridad a las especies nativas. Su utilización debe ser estudiada con énfasis para evitar posibles plagas o desequilibrios en el ecosistema, que podrían repercutir en forma de daño irreversible.

Las especies sugeridas, son usadas en Chile y Argentina para la silvicultura. El pino radiata, el eucalipto, el pino oregón y átriplex son las especies más comunes en plantaciones forestales. De todas las especies mencionadas el pino radiata es el que cuenta con un uso más propagado, por su velocidad de crecimiento. Este pino en particular tiene expectativas económicas muy elevadas y su plantación es altamente recomendada en terrenos empobrecidos y sin vegetación.

5.2.3. Zonas de reforestación dentro de la cuenca.

Para la zona de estudio se delimitaron zonas donde es posible la reforestación con especies nativas y no nativas, según su capacidad de soportar las condiciones climatológicas, la calidad del suelo y la altitud. Se dividió las áreas con potencial forestal en 3 grupos, el grupo 1 se ubica en la zona con mejor calidad de suelo y con temperatura templada, por otro lado el grupo 2 se ubica en una zona con menor calidad de suelo y temperatura templada, y por último el grupo 3 se encuentra en una zona con mala calidad de suelo y con un clima semifrío.

La zona de color verde oscuro, correspondiente al grupo 1, es apta para árboles nativos tales como molle, sauco y quishuar, los cuales tienen características de utilidad para la industria, por la calidad de su madera o por sus frutos. La zona de color violeta, correspondiente al grupo 2, es apta para árboles nativos como el colle y la retama, y para árboles no nativos como el pino radiata. Árboles con variados usos, por un lado el colle y el pino radiata son utilizadas en la carpintería y construcción, mientras que la retama es un árbol usado para mejorar la calidad del suelo por aumentar el contenido de nitrógeno. Por último la zona de color turquesa, correspondiente al grupo 3, es apta para árboles como el queuña, aliso y chachacomo. Por las condiciones más severas del entorno se proponen árboles capaces de subsistir a temperaturas menores y suelos empobrecidos, la utilidad de estos árboles es limitada desde el punto de vista industrial, sin embargo, resultan idóneos como combustible y protección para reducir la erosión (ver Figura 47).

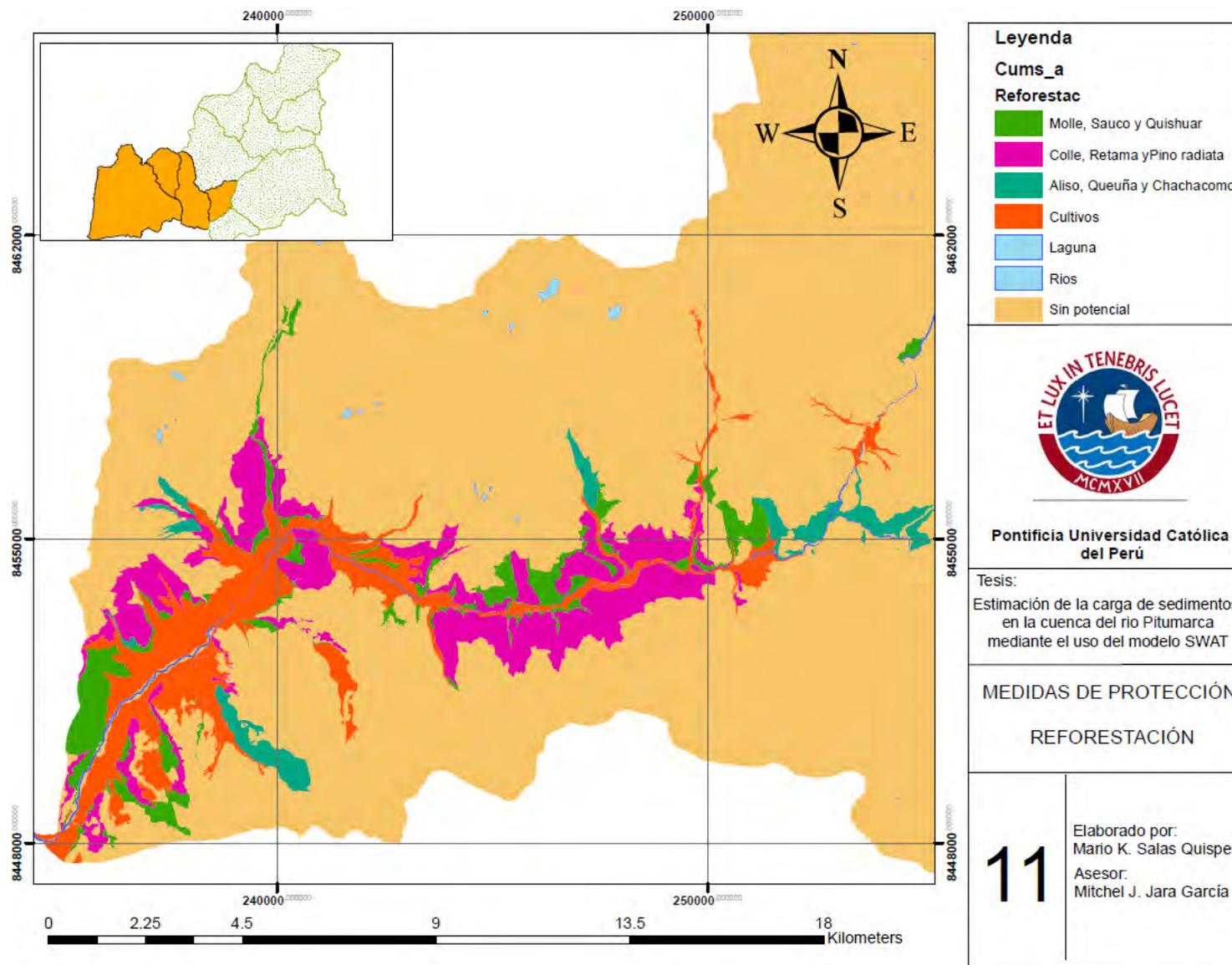


Figura 47. Lugares factibles para reforestación

5.3. Tecnificación de la Agricultura

La tecnificación de la agricultura es un tema del que mucho se ha habló en nuestro país y en toda América Latina, sin embargo, hasta el día de hoy no existe un avance concreto, sobre todo en la sierra y selva de nuestro país. Grandes extensiones ubicadas en el litoral peruano, pertenecientes a fundos, si cuentan con la tecnología y medios necesarios, sin embargo en la selva y sierra, como en el distrito de Pitumarca, la agricultura podría considerarse de subsistencia. Para cambiar el panorama y lograr cultivos rentables que sean capaces de generar ingresos a los pobladores son necesario dos cosas, la tecnificación de la agricultura adaptándola al medio y por otro lado políticas que promuevan su implementación. Es indispensable que ambas acciones se realicen en paralelo para lograr resultados duraderos y eficaces.

Para la generación de tecnologías apropiadas la FAO nos menciona que los pequeños agricultores requieren tecnologías menos riesgosas, que exijan menos insumos, energía y capital, más intensivas en mano de obra y que replacen todo lo posible el costo de la implementación (Lacki, 1995).

5.3.1. Rotación de cultivos.

La rotación de cultivos es un proceso por el cual se alterna diferentes especies de plantas con diferentes necesidades nutritivas en un mismo espacio, a lo largo del tiempo. La finalidad de este método es evitar el desgaste y el empobrecimiento del suelo que puede ser producto de una actividad agrícola intensa. Esta rotación mejora la calidad de los cultivos y disminuye las probabilidades de plagas y/o enfermedades.

Algunos tipos de rotación de cultivos sugeridos por el ministerio de agricultura pueden observarse en la Tabla 23, para cereales y granos andinos.

Tabla 23. Sugerencias para la rotación de cultivos según la altitud

| | |
|--|--|
| | Barbecho – papa – cebada ó avena – pasto natural. |
| Rotación de Cultivos Extensivos | Barbecho – papa – cebada ó avena – pastos mejorados que incluyan leguminosas. |
| (3600 msnm en adelante) | Barbecho – papa – quinua o cañihua – pastos naturales o mejorados que incluyan leguminosas. |
| | Barbecho – papa – tarwi o chocho - quinua o cañihua – pastos naturales o mejorados que incluyan leguminosas. |

| | |
|---|---|
| | Pastos mejorados – papa – maíz – leguminosas – cereales |
| Rotación de Cultivos Semi – Intensivos | Pastos mejorados – papa – quinua ó kiwicha – leguminosas – cereales. |
| (2800 msnm - 3600 msnm) | Papa – maíz – leguminosas – quinua o kiwicha. |
| | Papa – cereales – leguminosas – quinua o kiwicha. |
| | Maíz – leguminosas – hortalizas – frutas. |
| Rotación de Cultivos Intensivos | Maíz – Leguminosas – Cereales o kiwicha |
| (por debajo de los 2800 msnm) | Papa - cereales – leguminosas - maíz |
| | Leguminosas como: tarwi o chocho, habas, frejoles, arvejas, ñuñas o frejol reventón, etc. |
| | Cereales como: Trigo, cebada, triticales, avena, centeno, otros. |

Fuente: Equipo Técnico de Cereales, Leguminosas y Granos Andinos, 2011

Según las características de la cuenca se sugiere la rotación de cultivos semi-intensivos y los extensivos. Los semi-intensivos se pueden emplear en las actuales zonas de cultivo en laderas o en terrazas. Para los cultivos extensivos sin embargo es necesario primero analizar la textura del suelo y las pendientes que existen en la cuenca para lograr la meta esperada.

5.3.2. Cobertura de suelo.

Los cultivos de cobertura son empleados principalmente para mejorar la fertilidad del suelo o como forraje de ganado. Estos constituyen un componente fundamental para la estabilidad del sistema de agricultura de conservación. Ellos tienen efectos directos e indirectos en las propiedades del suelo, gracias a su capacidad para promover una biodiversidad aumentada en el agro-ecosistema (Benites Jump & Bot, 2013).

La gran ventaja de los cultivos de cobertura, no radica en su capacidad económica exactamente, lo cual se puede ver como algo opuesta a lo dicho al inicio de la sección 5.3. Sin embargo el hecho de que los cultivos por cobertura no tengan un alto valor en el mercado no los hace inútiles. Además estos cultivos no reemplazan los cultivos en tradicionales, mas al contrario, son una solución para las extensiones de área sin cobertura vegetal o con suelos empobrecidos.

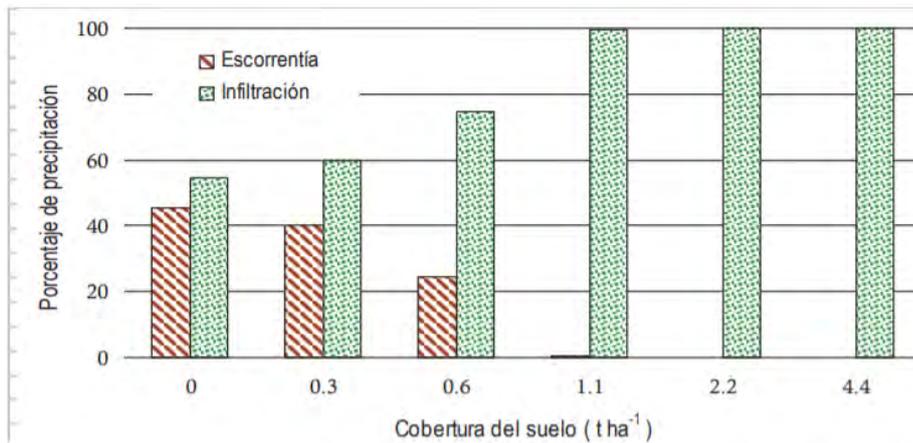


Figura 48. Efecto de la cantidad de cobertura de suelo en la escoorrentía e infiltración del agua de lluvia

Fuente: Ruedell, 1994

La presencia de cobertura vegetal afecta de manera directa los valores de escoorrentía e infiltración, evitando que el agua de lluvia se escurra y propiciando la infiltración (ver Figura 48). Las especies sugeridas son: La arveja, cebada, centeno, trigo, avena blanca, trébol, rábano, avena, guija, alfalfa, grass italiano, etc. Sin embargo es necesario un alto nivel de manejo y por otro lado la descomposición de estos cultivos debido a su resistencia a la misma puede generar efectos negativos como pérdida de nitrógeno. Por lo que requerirán rotación de cultivos.

En la agricultura de conservación, los residuos deben ser manipulados desde la cosecha hacia delante. Ello depende del siguiente cultivo de cobertura, si los residuos deben ser o no distribuidos equitativamente sobre la superficie del campo, o dejados intactos, de tal modo que los cultivos de cobertura se trepen hacia arriba como hace la mucuna, que se enrolla en los tallos de maíz dejados en el campo (Benites Jump & Bot, 2013).

5.4. Protección Ribereña y Estructuras de Control de Flujo en el Río

La erosión en los ríos está ubicada en dos puntos, en el lecho del río y en los márgenes. Para proteger estos puntos de los procesos erosivos se utilizan métodos de control de flujo en el río.

La finalidad de las defensas ribereñas es disminuir la erosión ocasionada por el flujo de agua a orillas del río, para ello se suelen emplear vegetación, hileras y trincheras, sacos rellenos de piedra o bloques de piedra, gaviones o colchones y recubrimiento como colchones articulados de hormigón o muros de contención.

Por otro lado, las estructuras de control del flujo son elementos construídos para modificar el comportamiento del río, con el fin de proteger zonas específicas o sectores del río.

5.4.1. Protección ribereña.

La protección ribereña para la cuenca del río Pitumarca puede consistir principalmente en uso de vegetación, al emplearse se lograra proveer de protección a los márgenes del río. La vegetación de protección se suele dividir en dos: pastizales y árboles o arbustos. El uso de árboles y arbustos es una medida que protege en mayor magnitud la ribera del río, respecto a los pastizales, gracias a que las raíces suelen estar a mayor profundidad. Sin embargo, el lento crecimiento de estos los vuelve una solución a mediano y largo plazo. Los pastizales, por otro lado, tienen un crecimiento muy rápido en comparación a lo que demora un árbol o arbusto en crecer. El factor más importante para la colocación de vegetación es el aumento del tirante del río, usar plantas que no sean capaces de resistir inundaciones o crecidas de ríos no se deben colocar a poca altura, respecto al pelo del agua. Usar plantas semi-acuáticas sería lo idóneo para colocarse a distancias cortas o nulas del espejo del agua. Sin embargo en nuestra zona de estudio, las plantas semi-acuáticas no son abundantes y no suelen prosperar de manera satisfactoria por los climas duros.

Usar hileras, trincheras, sacos rellenos o bloques de piedras son medidas de bajo coste, que resultan efectivas en condiciones no muy agresivas del río. Para su diseño es necesario realizar un estudio de las velocidades máximas que puedan ocurrir en el río con la finalidad de escoger la granulometría de material adecuado.

Los gaviones, por otro lado, son relativamente más costosos, debido a que requieren jaulas metálicas en las que se colocan las piedras (ver Figura 49). Si bien su precio es mucho menor a otras opciones (muros de contención), pueden ser bastante caras dependiendo de las dimensiones de las rocas, necesarias para su construcción. Las hileras y trincheras también requieren piedras de determinado diámetro pero el volumen necesario es inferior que los usados al construir gaviones.

(a) Gabions

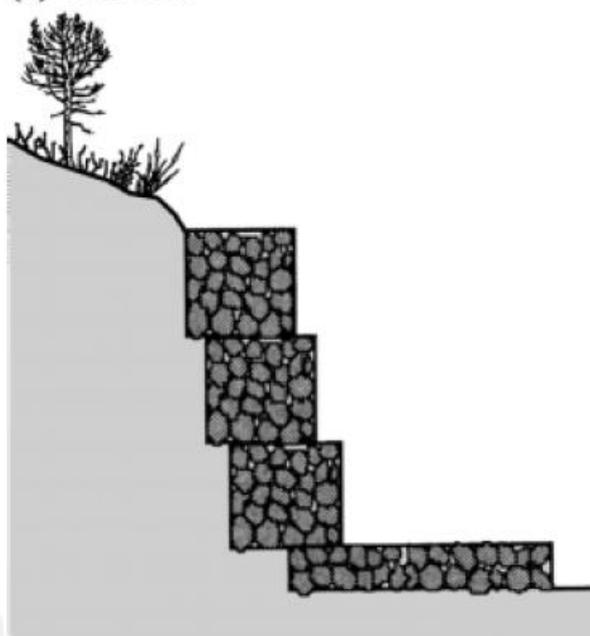


Figura 49. Colocación de los gaviones

Fuente: Julien, 2002

5.4.2. Estructuras de control de flujo en el río.

Las estructuras de control de flujo están diseñadas para reducir las fuerzas hidronímicas, controlando las direcciones del flujo, velocidad y/o la tirante del flujo de agua. Lo más importante para estas estructuras son sus características permeables (Julien, 2002).

Los puntos fuertes, son estructuras de rocas que se colocan perpendicularmente al flujo, estas estructuras son usados en ríos anchos (mayor a 20 metros) sin embargo el río Pitumarca es un río estrecho por lo cual esta medida no es eficiente.

Los espigones, por otro lado, son recomendables en el río Pitumarca, primero por existir dos tipos diferenciados, por sus longitudes y también por los materiales con los que pueden ser construidos. No son construirlos necesariamente con hormigón, en su lugar pueden usarse troncos sujetos con sogas que pueden ser de materiales locales. Estas estructuras modifican la dirección del flujo generando vórtices entre ellos reduciendo drásticamente la velocidad en los márgenes de los ríos (ver Figura 50).

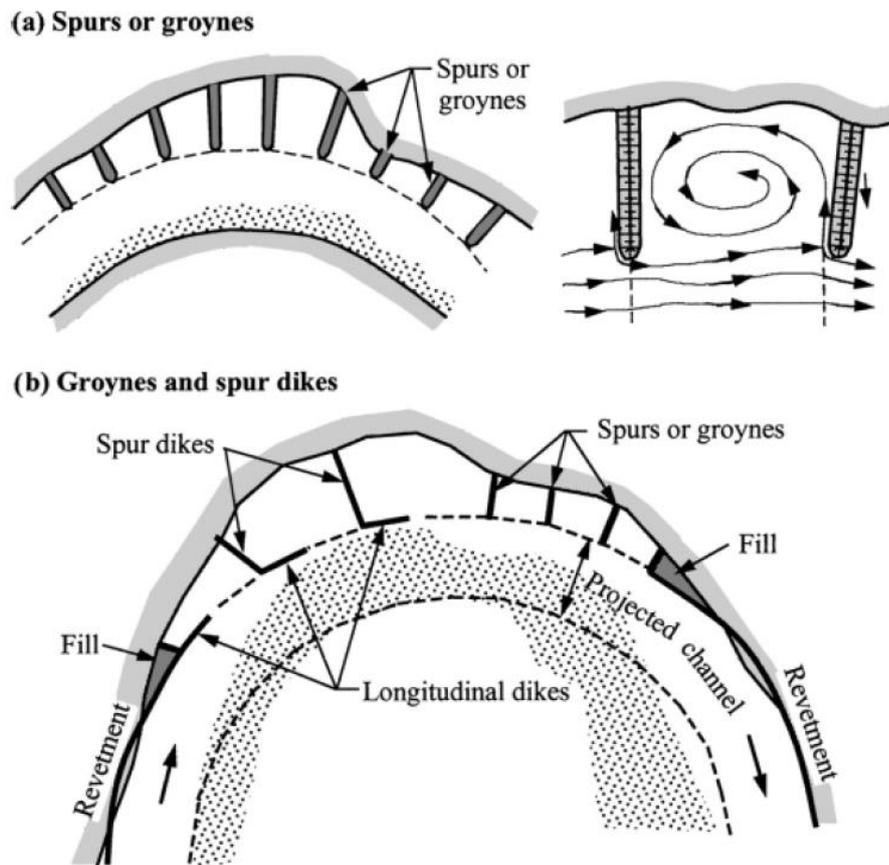


Figura 50. Colocación y función de los espigones

Fuente: Julien, 2002

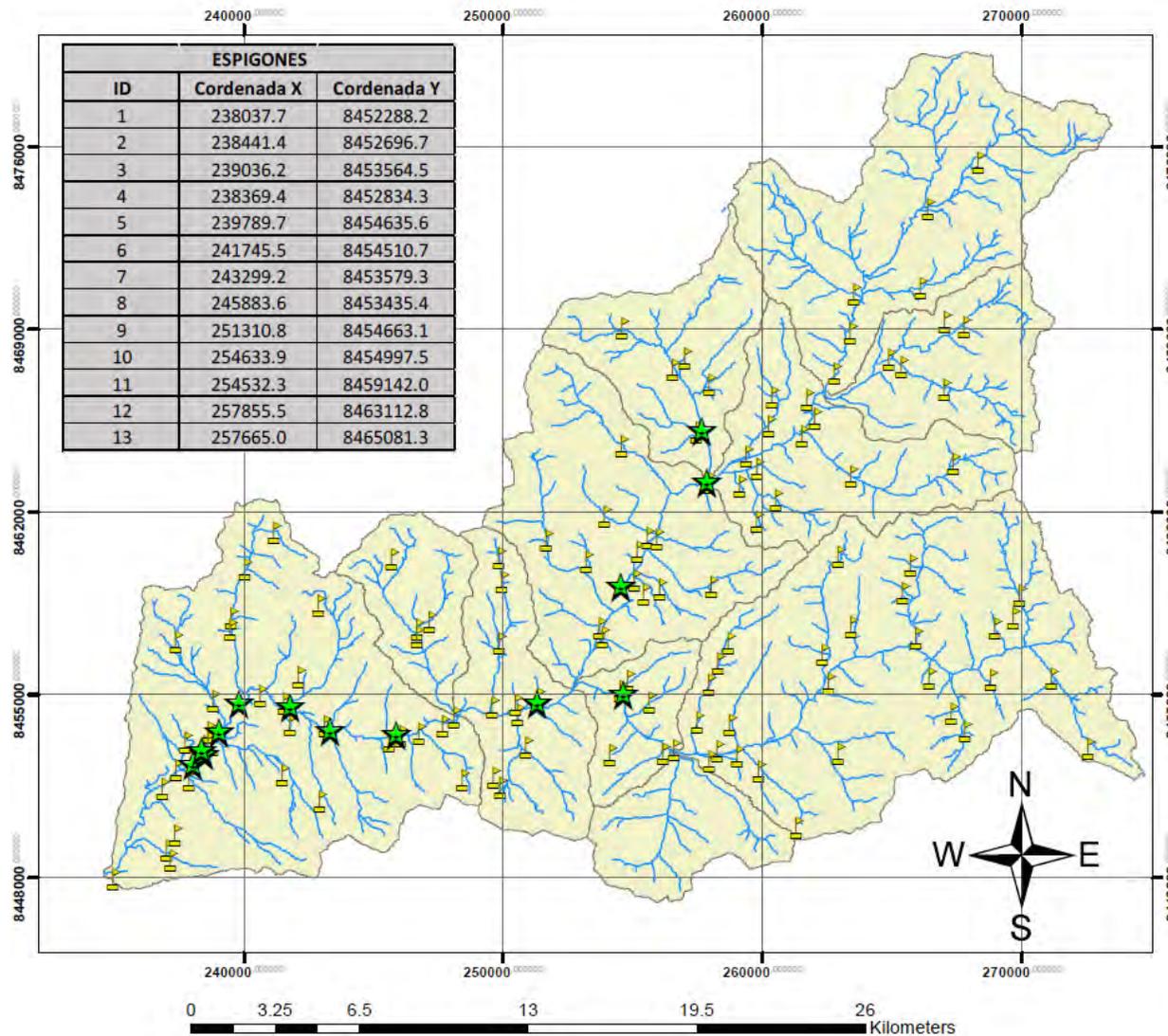
Los diques son otra medida de control, pero su construcción resulta más compleja. Los diques de colmatación, en especial, no permiten que los sedimentos continúen su viaje a través del río, pero en ríos con fuertes cantidades de sedimentos pueden ser poco efectivos, por requerir bastante mantenimiento para retirar los sedimentos depositados.

Las estructuras de control de río, no son requeridas en la cuenca, dado que las áreas más afectadas no se ubican en el margen del río, salvo pocas excepciones. Su implementación por lo cual no resulta recomendable por su alto coste y por no ser de gran impacto en la generación de sedimentos.

5.4.3. Ubicación de estructuras de control de flujo.

La ubicación de los espigones será en los meandros de la cuenca baja del río Pitumarca, para esto se consideró la cercanía de los meandros con poblaciones y carreteras, además del nivel de erosión presentado según el análisis de carga de sedimentos (ver Figura 51).

Por otro lado, los gaviones son propuestos en puntos de erosión elevada con poca vegetación, también se consideró la existencia de puentes y poblaciones, para la ubicación (ver Figura 52).



Legenda

- ★ Vertice espigones
- 🚩 Poblaciones cuenca
- Rios en cuenca

Pontificia Universidad Católica del Perú

Tesis:
Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo SWAT

**MEDIDAS DE PROTECCIÓN:
UBICACION DE LOS
ESPIGONES**

14

Elaborado por:
Mario K. Salas Quispe
Asesor:
Mitchel J. Jara García

Figura 51. Ubicación de Espigones

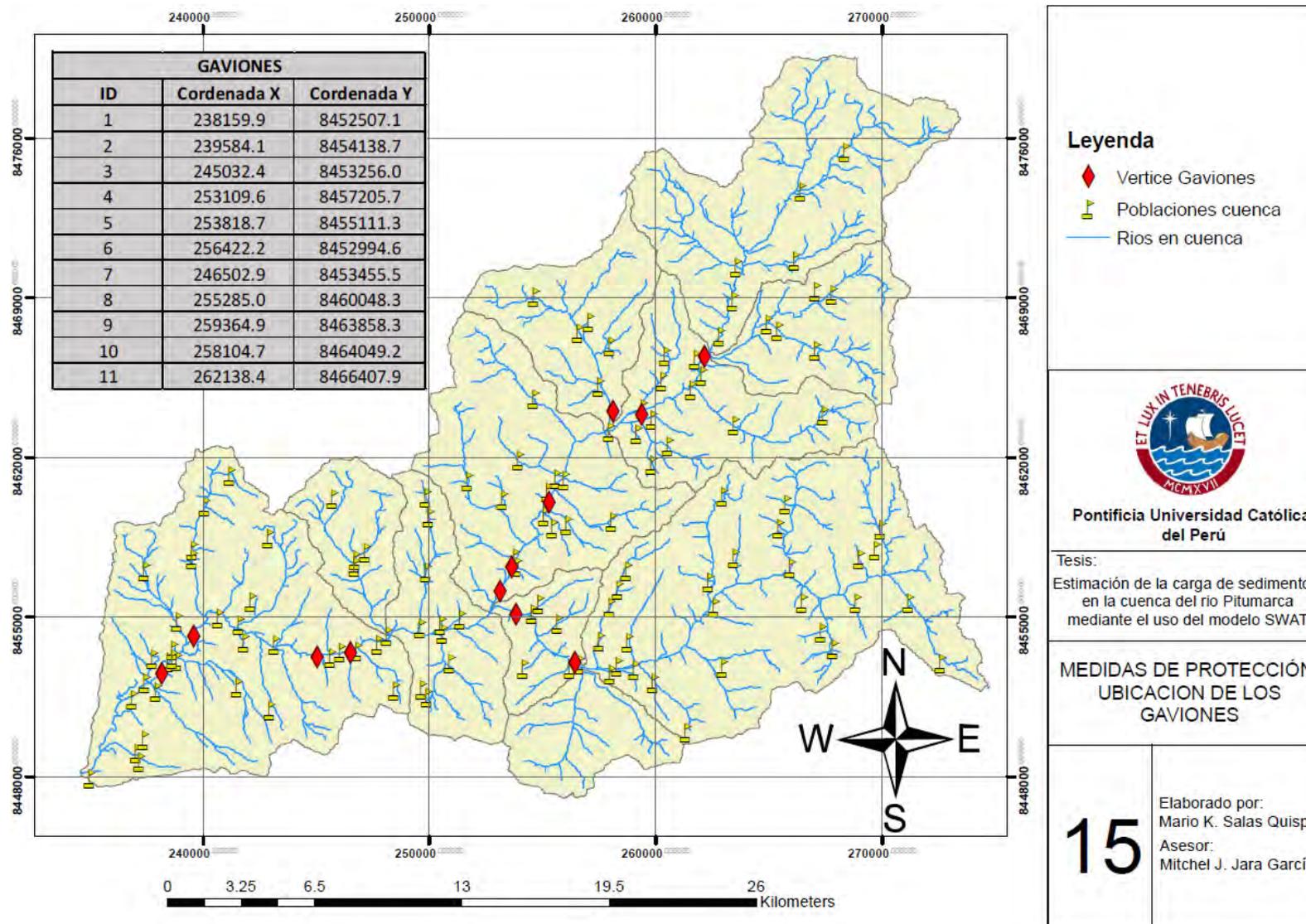


Figura 52. Ubicación de Gaviones

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Se concluye que la erosión en la cuenca del río Pitumarca es elevada en la zona media de la cuenca, concentrándose en los puntos de mayor pendiente. Esta erosión es difícilmente controlada por las grandes extensiones donde se desarrolla y por la dificultad de acceso, por una topografía muy accidentada. La reforestación también resulta una medida insuficiente e inviable por la existencia de climas agresivos que azotan la cuenca. Climas agresivos, que afectan a árboles o arbustos y perjudican su crecimiento y supervivencia.

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, y con ello la generación de caudales y producción de sedimentos a través del tiempo.

Garantizar la reducción de la generación de sedimentos es necesario para asegurar el desarrollo social – económico de los pueblos alojados en la cuenca. Las medidas propuestas deben ser implementadas en las zonas donde la erosión se concentre y contengan actividades económicas. Por ejemplo, en la cuenca baja se recomienda la implementación de zanjas de infiltración, con la finalidad de evitar la pérdida de tierra cultivable. Estas zonas también son empleadas en ganadería y silvicultura, por lo que son vitales para el desarrollo de la comunidad.

Se concluye, también, que la generación de sedimentos dentro de la cuenca es elevada en sectores con alta pendiente, con precipitaciones más severas y sin cobertura vegetal. Mientras que en la cuenca baja, se observa una producción de sedimentos menor a pesar del uso agrícola. La ausencia de cobertura vegetal, las altas pendientes y la precipitación son los factores más influyentes en la cuenca del río Pitumarca.

Se observa, además, que combinar las medidas de protección garantiza un mejor cuidado del suelo y por ejemplo combinar zanjas de infiltración con reforestación no solo evita la erosión, también impulsa el crecimiento de los árboles y/o arbustos plantados, que pueden ser usados en silvicultura. En Chile es muy común observar el uso de zanjas de infiltración junto al lado de especies como el pino radiata. Esta combinación de medidas potencia el desarrollo de los árboles ubicados junto a las zanjas aumentando su altura y diámetro. La industria forestal chilena no solo logra evitar la erosión, también consigue mayores beneficios económicos, gracias al aumento de las dimensiones de los árboles.

Los valores de los criterios estadísticos obtenidos en la calibración espacial del modelo hidrológico son 0.98 y 0.98 para R2 y NSE respectivamente. Por otro lado, los valores de los criterios estadísticos en la validación son 0.66 y 0.62 para R2 y NSE respectivamente. Los valores muestran un rendimiento satisfactorio del modelo hidrológico SWAT y garantizan, la capacidad del mismo, la precisión necesaria para simular las condiciones hidrológicas de la cuenca en estudio.

Por otro lado, las defensas ribereñas como los gaviones deben estar limitadas a lugares donde la erosión represente un peligro eminente a la población, como es el caso de puentes o viviendas que están ubicadas en los márgenes de los ríos. Los espigones deben ser empleados en las zonas donde la erosión represente una amenaza a la infraestructura vial, evitando así que el río en época de avenidas no desgaste la base sobre la cual se construyeron. El análisis de las medidas planteadas debe ser analizado de manera particular en todos los casos, para lograr una eficiencia óptima y evitar un costo elevado.

Por último, se concluye que la erosión es un proceso natural que no puede ni debe ser eliminado por completo, pero si controlado. Dando como resultado la necesidad de creación y ejecución de proyectos sociales en conjunto con proyectos técnicos. Las soluciones técnicas para enfrentar la erosión no son efectivas solas, es necesario acompañarlas de medidas sociales, tales como: capacitaciones, concientización de la población, promoción de la industria forestal, etc.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda evaluar las medidas de protección de manera particular para cada sector de la cuenca. Asimismo, se debe analizar a detalle la posibilidad de reforestar las zonas de la cuenca, aptas para el desarrollo de la vegetación nativa, como medida de protección e impulso la económica.

Realizar estudios de suelos más detallados a nivel nacional y puesto que, es información inicial relevante, de la que parten planteamientos técnicos y estudios más detallados según sea la necesidad.

La colocación de estaciones hidrometeorológicas dentro de la cuenca, que mejorara la calidad y exactitud de los estudios en los años posteriores. Estudios que serán la base de proyectos de inversión social y/o económica para la población de Pitumarca.

REFERENCIAS

- Aboukhaled, A., Smith, M., & Alfaro, J. F. (1986). *Los Lisimetos* (Vol. 39). Roma: Food & Agriculture Org. (FAO).
- Allen, R. G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56). Food & Agriculture Org..
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Roma: FAO.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. *Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, 56. Estudio FAO Riego y Drenaje.
- Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). *SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling* (Vol. 19(3)). Hydrological processes.
- ATDR-Sicuani, IRH - INRENA. (2005). *Mapa hidrografico e inventario de fuentes de aguas superficiales en el ámbito del ATDR Sicuani*. Sicuani: Ministerio de Agricultura- Instituto nacional de recursos naturales - Intendencia de recursos hídricos - Dirección de recursos hídricos e irrigaciones.
- Aybar Camacho, C., Lavado Casimiro, W., Huerta Julca, A., Fernández Palomino, C., Vega Jácome, F., & Felipe Obando, O. G. (2017). *USO DEL PRODUCTO GRILLADO PISCO DE PRECIPITACIÓN EN ESTUDIOS, INVESTIGACIONES Y SISTEMAS OPERACIONALES DE MONITOREO Y PRONÓSTICO HIDROMETEOROLÓGICO*. Lima, Perú: Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI.
- Benites Jump, J. R., & Bot, A. (2013). *Agricultura de una práctica innovadora con beneficios económicos y medioambientales*. Lima, Perú: Agrosaber.
- Blanco, P. S. (2017). *Tipos de precipitaciones según su origen en el nordeste argentino durante el período 1981-1990*. Ciudad de Resistencia: Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Nordeste.
- Cabrera, J. (2012). *Calibración de modelos hidrológicos*. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.
- Cabrera, J. (2012). *Validación de modelos hidrológicos*. Retrieved from http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_3.pdf
- Carrasco, J., & Mora, D. (2017, Julio 12). *Zanjas de infiltración: La apuesta por la conservación de suelos y aguas*. Retrieved from El Mercurio: <https://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Noticias/2015/08/06/Zanjas-de-infiltracion-una-herramienta-para-promover-la-conservacion-de-suelos-y-aguas.aspx?disp=1>
- Chereque Mórán, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. (J. G. Saldarriaga, Trans.) McGRAW-HILL.

- Dirección de estudios y proyectos en gestión ambiental - IMA. (2007). *Propuesta de Ordenamiento Territorial de la Comunidad Campesina de Pitumarca*. Canchis: Programa regional BioAndes.
- Equipo Técnico de Cereales, Leguminosas y Granos Andinos. (2011). *Manejo y fertilidad de suelos: Cereales y granos andinos. Manual técnico*. (Primera ed.). Lima, Perú: Ministerio de Agricultura.
- FAO - Unesco. (1971). *Mapa mundial de suelos* (Vol. IV). Paris: a Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura Place de Fontenoy.
- FAO. (2000). *Land cover classification and user manual*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations)/Cooperazione italiana/UNEP.
- FAO Water Reports (Food and Agriculture Organization). (2008). *Irrigation in the Middle East region in figures AQUASTAT Survey-2008* (Vol. 34). Water Reports.
- Fistikoglu, O., & Harmancioglu, N. B. (2002). Integration of GIS with USLE in assessment of soil erosion. *Water Resources Management*, 16(6), 447-467.
- Flores Villanelo, J. P. (2004, Diciembre). Diseño de zanjas de infiltración bajo criterios de ingeniería hidrológica. *Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos para la mantención e incremento de la productividad silvícola*. Talca, Chile.
- Goodrich, D. C., Guertin, D. P., Burns, I. S., Nearing, M. A., Stone, J. J., Wei, H., & Paige, G. B. (2011). AGWA: the automated geospatial watershed assessment tool to inform rangeland management. *Rangelands*, 33(4), 41-47.
- Gupta, H. V., P.O., Y., & A., S. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.
- Hosseini, M., & Aqeel Ashraf, M. (2015). *Application of the SWAT Model for Water Components Separation in Iran*. Japon: Springer.
- INEGI. (2005). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Veracruz*. Veracruz: Aguascalientes: Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Inzunza B., J. (2006). *Meteorología descriptiva y aplicaciones en Chile*. Concepción: UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA ATMÓSFERA Y DEL OCÉANO.
- Julien, P. Y. (2002). *River mechanics*. New York: Cambridge University Press.
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13-24.
- Lacki, P. (1995). *Desarrollo agropecuario: de la dependencia al protagonismo del agricultor* (Cuarta ed.). Santiago: FAO.
- León Ochoa, R. F. (2017). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático. *(Tesis de titulación)*. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.
- Liersch, S. (2003, Agosto). The Program pcpSTAT: user's manual. 5. Berlin.

- Liersch, S. (2003, 08 12). The Programs dew. exe and dew02. exe: user's manual. Retrieved from <http://www.brc.tamus.edu/swat/pcpSTAT.zip>.
- MINAGRI. (2014). *Cartillas para la conservación del suelo - Zanjas de infiltración*. Lima.
- Montoya, S. (2016, Abril 08). *Github*. Retrieved from How-to-Fill-Missing-Precipitation-Data-with-Neural-Networks-in-Python: https://github.com/SaulMontoya/How-to-Fill-Missing-Precipitation-Data-with-Neural-Networks-in-Python/blob/master/Fill_Missing_Precipitation_Data_Neural_Networks.ipynb
- Morera, S. B., Condom, T., Crave, A., Steer, P., & Guyot, J. L. (2017). *The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012)*. Nature, Scientific Reports.
- 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* (Vol. 50). Transactions of the ASABE.
- Nguyen Sinh, K. (2007). *Studying, assessing and forecasting land degradation in the North Central of Vietnam aiming sustainable planning*. Hanoi: Final report of research run by Ministry of Science and Technology.
- Novotny, V., & Olem, H. (1994). *Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution*. Nueva York: Van Nostrand-Reinhold Publishers.
- Osuna-Osuna, A. K., White, J. D., de Anda, J., Díaz Torres, J. d., & Dávila Vázquez, G. (2015). Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Tecolutla utilizando el modelo SWAT. *1er Congreso Iberoamericano sobre sedimentos y ecología*. Querétaro.
- Phuong, T. T., Thong, C. V., Ngoc, N. B., & Chuong, H. V. (2014). Modeling Soil Erosion within Small Mountainous Watershed in Central Vietnam Using GIS and SWAT. *Resources and Environment*, 4(3), pp. 139-147. Hue City.
- Programa BioAndes Perú. (2009, Diciembre). Agenda Comunal. *Comunidad Campesina de Pitumarca*. Lima, Perú: ETC Andes.
- Proyecto Especial Regional Instituto de Manejo de agua y medio ambiente - IMA. (2006). *Microzonificación ecológica económica de la subcuenca Pitumarca – Checacupe*. Cusco: Dirección de estudios y proyectos en gestión ambiental, DIRECCION DE GESTION AMBIENTAL EN CUENCAS.
- Renard, K. G. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & Porter, J. P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of soil and Water Conservation*, 46(1), 30-33.
- Reynel, C., & Felipe - Morales, C. (1987). *Agroforestería tradicional en los Andes del Perú - Un inventario de tecnologías y especies para la integración de la vegetación leñosa a la agricultura*. Lima: FAO.
- Rivera, R. J. (2013). *Hidrología I: Ciclo Hidrológico* (Segunda ed.). La Coruña: Universidad de la Coruña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

- Rocha, A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Lima: Facultad de Ingeniería Civil - Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rosas Barturén, M. A. (2016). Cuantificación de la erosión hídrica en el Perú y los costos ambientales asociados. (*Tesis de Maestría*). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Ruedell, J. (1994). Pesquisa em plantio direto na palha e sua importância. *Encontro nacional de plantio direto na palha*, (pp. 90-105). Cruz Alta.
- Ruiz, L. E. (2014). *Vision general sobre el software SWAT*. Mérida, VE.
- Salgado R., J. H., & Güitrón de los Reyes, A. (2012). Aplicabilidad de los Modelos Hidrológicos Distribuidos. *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*. Acapulco.
- Sánchez San Román, F. J. (2004). *El Ciclo Hidrológico*. Salamanca: Universidad de Salamanca - Departamento de Geología.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the swat model on a large rwer basin with point and nonpoint sources 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188.
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys* (Segunda ed.). Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture.
- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (Décima segunda ed.). (C. A. Ortiz Solorio, M. d. Gutiérrez Castorena, & E. V. Gutiérrez Castorena, Trans.) Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - Servicio de Conservación de Recursos Naturales.
- Srinivasan, R. (2015). *Soil and Water Assessment Tool Beginner SWAT Training Manual. Workshop at Spatial Science Laboratory (AgriLife Research)*. College Station: Texas A&M University. Retrieved from http://www.crs4.it/repository/documents/conferences/swat_2015/introductory_manual_updated_oct._2012.pdf
- Tacusi Calla, C., & Hacha Chuctaya, E. (2015). Modelación hidrológica en la subcuenca de Pitumarca con la aplicación del modelo WEAP (Sistema de evaluación y planeación de agua). (*Tesis de Titulación*). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, K'ayra, Cusco.
- Trifón Ayaviri, A. (1996). *Clasificación de suelos por el sistema por fertilidad y capacidad (FCC), en los módulos agroforestales implementados en el tropico de Cochabamba*. Cochabamba: UNDCP, FONADAL, FAO.
- Velázquez Suárez, J. E. (2014). Calibración de un modelo de estimación de lluvia con imágenes de satélite, utilizando datos de estaciones climatológicas, para la región hidrológica número 30 de México. *Tesis de titulación*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM), Ciudad de México.
- Vide, J. (1981). *La Meteorología*. Barcelona, España: Oikos-Tau.
- Villodas, R. (2008). *Hidrología*. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo - Facultad de Ingeniería - Ingeniería Civil.

Williams, J. R. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 11(5), 965-974.



ANEXOS

Anexo A. Información contenida dentro de la base de datos climáticos de 7 puntos dentro de la cuenca.

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | TMPM X1 | TMPM X2 | TMPM X3 | TMPM X4 | TMPM X5 | TMPM X6 | TMPM X7 | TMPM X8 | TMPM X9 | TMPM X10 | TMPM X11 | TMPMX 12 |
|----|----------|----------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 17.292 | 16.994 | 17.514 | 17.150 | 17.817 | 16.851 | 17.124 | 17.712 | 18.967 | 19.185 | 19.364 | 17.449 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 16.866 | 16.658 | 17.064 | 16.992 | 17.805 | 17.130 | 17.275 | 17.959 | 18.888 | 19.078 | 19.309 | 17.373 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 15.870 | 15.666 | 15.869 | 16.102 | 17.193 | 16.555 | 16.552 | 17.324 | 18.121 | 18.411 | 18.800 | 16.708 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 15.397 | 15.179 | 15.393 | 15.945 | 16.771 | 16.225 | 16.062 | 16.951 | 17.583 | 17.931 | 18.304 | 16.654 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 14.607 | 14.341 | 14.724 | 15.316 | 16.289 | 15.932 | 15.635 | 16.532 | 17.068 | 17.405 | 17.771 | 16.095 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 14.250 | 13.950 | 14.277 | 14.913 | 16.290 | 16.428 | 16.016 | 16.800 | 16.959 | 17.079 | 17.449 | 15.741 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 14.187 | 13.941 | 14.204 | 14.727 | 16.717 | 17.661 | 16.941 | 17.490 | 17.261 | 17.124 | 17.470 | 15.552 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | TMPM N1 | TMPM N2 | TMPM N3 | TMPM N4 | TMPM N5 | TMPM N6 | TMPM N7 | TMPM N8 | TMPM N9 | TMPM N10 | TMPM N11 | TMPM N12 |
|----|----------|----------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 5.782 | 4.905 | 4.768 | 4.043 | 1.729 | 0.269 | -0.088 | 1.443 | 2.978 | 4.791 | 4.379 | 5.287 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 5.377 | 4.710 | 4.601 | 3.524 | 0.561 | -1.367 | -1.584 | -0.031 | 1.956 | 3.789 | 3.979 | 4.850 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 3.793 | 3.180 | 3.078 | 1.555 | -2.790 | -5.232 | -6.091 | -4.150 | -1.356 | 0.651 | 1.249 | 2.993 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 3.039 | 2.498 | 2.495 | 0.686 | -4.282 | -7.189 | -8.200 | -6.157 | -2.761 | -0.568 | 0.517 | 2.549 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 2.301 | 1.746 | 1.624 | -0.380 | -5.802 | -9.232 | -10.62 | -8.520 | -4.674 | -1.801 | -0.470 | 1.861 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 2.066 | 1.477 | 1.344 | -0.853 | -6.412 | -9.623 | -10.99 | -8.639 | -4.809 | -1.756 | -0.586 | 1.639 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 1.871 | 1.499 | 0.981 | -1.478 | -7.154 | -9.728 | -11.00 | -8.300 | -4.762 | -2.018 | -1.177 | 1.013 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | TMPS TDMX 1 | TMPS TDMX 2 | TMPS TDMX 3 | TMPS TDMX 4 | TMPS TDMX 5 | TMPS TDMX 6 | TMPS TDMX 7 | TMPS TDMX 8 | TMPS TDMX 9 | TMPS TDMX 10 | TMPS TDMX 11 | TMPST DMX12 |
|----|----------|----------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 1.663 | 1.616 | 1.521 | 1.441 | 1.289 | 1.372 | 1.533 | 1.809 | 1.610 | 1.681 | 1.681 | 1.725 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 1.663 | 1.623 | 1.532 | 1.435 | 1.296 | 1.381 | 1.563 | 1.788 | 1.601 | 1.630 | 1.599 | 1.671 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 1.813 | 1.812 | 1.649 | 1.478 | 1.315 | 1.355 | 1.591 | 1.788 | 1.726 | 1.819 | 1.714 | 1.795 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 1.862 | 1.854 | 1.670 | 1.489 | 1.311 | 1.353 | 1.591 | 1.793 | 1.733 | 1.839 | 1.764 | 1.816 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 1.925 | 1.916 | 1.698 | 1.521 | 1.306 | 1.346 | 1.582 | 1.787 | 1.727 | 1.846 | 1.792 | 1.857 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 1.951 | 1.943 | 1.729 | 1.553 | 1.320 | 1.341 | 1.589 | 1.795 | 1.745 | 1.880 | 1.825 | 1.891 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 1.960 | 1.951 | 1.700 | 1.511 | 1.253 | 1.212 | 1.466 | 1.654 | 1.516 | 1.581 | 1.559 | 1.772 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | TMPS TDMN 1 | TMPS TDMN 2 | TMPS TDMN 3 | TMPS TDMN 4 | TMPS TDMN 5 | TMPS TDMN 6 | TMPS TDMN 7 | TMPS TDMN 8 | TMPS TDMN 9 | TMPS TDMN 10 | TMPS TDMN 11 | TMPST DMN12 |
|----|----------|----------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 0.957 | 1.051 | 1.137 | 1.596 | 1.914 | 1.717 | 1.592 | 1.701 | 1.635 | 1.434 | 1.458 | 1.203 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 0.951 | 1.038 | 1.119 | 1.581 | 1.935 | 1.809 | 1.674 | 1.815 | 1.680 | 1.440 | 1.410 | 1.173 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 0.996 | 1.113 | 1.170 | 1.667 | 2.142 | 2.062 | 1.894 | 2.092 | 1.910 | 1.616 | 1.598 | 1.238 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 1.005 | 1.142 | 1.184 | 1.709 | 2.260 | 2.206 | 1.993 | 2.211 | 2.013 | 1.684 | 1.647 | 1.240 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 1.020 | 1.177 | 1.220 | 1.768 | 2.385 | 2.367 | 2.131 | 2.374 | 2.171 | 1.760 | 1.714 | 1.261 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 1.026 | 1.187 | 1.236 | 1.801 | 2.442 | 2.405 | 2.165 | 2.395 | 2.185 | 1.760 | 1.723 | 1.270 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 0.999 | 1.158 | 1.205 | 1.764 | 2.425 | 2.343 | 2.067 | 2.270 | 2.103 | 1.708 | 1.765 | 1.271 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | PCPM M1 | PCPM M2 | PCPM M3 | PCPM M4 | PCPM M5 | PCPM M6 | PCPM M7 | PCPM M8 | PCPM M9 | PCPM M10 | PCPM M11 | PCPM M12 |
|----|----------|----------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 82.86 | 150.41 | 92.87 | 42.69 | 5.81 | 3.85 | 4.14 | 5.53 | 16.32 | 45.21 | 57.66 | 100.16 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 91.67 | 154.27 | 88.84 | 37.56 | 5.89 | 4.13 | 5.04 | 6.48 | 14.12 | 49.87 | 54.36 | 129.4 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 73.4 | 135.13 | 71.7 | 32.12 | 7.25 | 3.78 | 5.28 | 5.6 | 15.3 | 61.1 | 51.04 | 120.32 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 134.7 | 154.96 | 88.56 | 42.44 | 11.94 | 5.31 | 10.28 | 10.13 | 18.5 | 50.62 | 78.5 | 129.74 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 170.13 | 144.33 | 101.75 | 59.12 | 12.42 | 10.14 | 11.69 | 12.17 | 21.66 | 42.18 | 71.84 | 115.37 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 148 | 171.82 | 141.61 | 38.01 | 12.89 | 10.82 | 9.48 | 20.44 | 25.65 | 41.54 | 81.52 | 133.95 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 112.27 | 134.44 | 93.25 | 33.03 | 9.39 | 6.35 | 8.22 | 13.08 | 16.17 | 38.47 | 68.48 | 108.76 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | PCPST D1 | PCPST D2 | PCPST D3 | PCPST D4 | PCPST D5 | PCPST D6 | PCPST D7 | PCPST D8 | PCPST D9 | PCPST D10 | PCPST D11 | PCPST D12 |
|----|----------|----------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 2.2416 | 4.1237 | 2.6763 | 1.9327 | 0.4312 | 0.5507 | 0.5714 | 0.4969 | 1.0387 | 1.9299 | 2.2304 | 2.9666 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 2.331 | 4.0348 | 2.3865 | 1.6262 | 0.404 | 0.5536 | 0.6008 | 0.5656 | 0.8388 | 1.9854 | 1.9958 | 3.4671 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 1.7962 | 3.4308 | 1.8928 | 1.3204 | 0.5456 | 0.4783 | 0.7003 | 0.4581 | 0.8936 | 2.3017 | 1.8285 | 3.1252 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 2.8834 | 3.5696 | 2.1138 | 1.5582 | 0.8446 | 0.6119 | 1.2301 | 0.8419 | 1.02 | 1.7748 | 2.5093 | 3.0581 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 3.5477 | 3.1831 | 2.3022 | 2.0807 | 0.8057 | 1.2789 | 1.3025 | 0.9954 | 1.1293 | 1.4362 | 2.2376 | 2.6436 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 3.0684 | 3.8657 | 3.3957 | 1.2627 | 0.7908 | 1.1004 | 0.962 | 1.9249 | 1.3719 | 1.4092 | 2.4876 | 3.0313 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 2.3302 | 2.9643 | 2.0835 | 1.0862 | 0.5646 | 0.59 | 0.8945 | 1.0952 | 0.8474 | 1.2733 | 2.0855 | 2.4727 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | PCPS KW1 | PCPS KW2 | PCPS KW3 | PCPS KW4 | PCPS KW5 | PCPS KW6 | PCPS KW7 | PCPS KW8 | PCPS KW9 | PCPS KW10 | PCPS KW11 | PCPSK W12 |
|----|----------|----------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 1.547 | 1.4376 | 1.9217 | 2.8619 | 4.5305 | 9.1534 | 8.1481 | 5.3321 | 3.4245 | 2.5604 | 2.0054 | 1.718 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 1.4514 | 1.3158 | 1.7365 | 2.8099 | 4.4532 | 9.0152 | 7.2724 | 5.3517 | 3.4747 | 2.7366 | 1.8768 | 1.5058 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 1.4 | 1.3412 | 1.6904 | 2.5354 | 5.333 | 8.6569 | 8.4887 | 5.1848 | 3.5187 | 2.4885 | 1.8287 | 1.4152 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 1.3171 | 1.0853 | 1.3933 | 2.0683 | 5.4394 | 7.9949 | 8.524 | 5.9309 | 3.6644 | 2.5264 | 1.5962 | 1.1833 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 1.3686 | 1.0102 | 1.2821 | 1.9734 | 5.1598 | 9.4979 | 7.023 | 6.3078 | 3.5392 | 2.464 | 1.6029 | 1.1613 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 1.2074 | 1.0349 | 1.8902 | 1.8685 | 4.7257 | 6.3678 | 7.5647 | 6.033 | 3.83 | 2.7086 | 1.6217 | 1.1386 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 1.1559 | 0.9352 | 1.4324 | 1.813 | 4.706 | 5.9659 | 8.3655 | 5.5609 | 3.9767 | 2.5876 | 1.6658 | 1.1707 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | PR_W 1_1 | PR_W 1_2 | PR_W 1_3 | PR_W 1_4 | PR_W 1_5 | PR_W 1_6 | PR_W 1_7 | PR_W 1_8 | PR_W 1_9 | PR_W 1_10 | PR_W 1_11 | PR_W1_12 |
|----|----------|----------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 0.9231 | 1 | 1 | 0.8485 | 0.612 | 0.4279 | 0.3766 | 0.4315 | 0.7395 | 1 | 0.9677 | 0.9 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 0.9091 | 1 | 1 | 0.8592 | 0.6137 | 0.4466 | 0.4077 | 0.4569 | 0.7119 | 0.9773 | 0.9394 | 1 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 0.8571 | 1 | 1 | 0.8696 | 0.652 | 0.455 | 0.4191 | 0.4497 | 0.7373 | 0.975 | 0.9394 | 1 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 1 | 1 | 1 | 0.898 | 0.7111 | 0.5 | 0.4589 | 0.5514 | 0.75 | 0.9189 | 0.9091 | 1 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 1 | 1 | 1 | 0.8095 | 0.7349 | 0.558 | 0.4822 | 0.6132 | 0.75 | 0.9063 | 0.9412 | 1 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 1 | 1 | 1 | 0.8649 | 0.7545 | 0.5926 | 0.5452 | 0.6289 | 0.7701 | 0.9677 | 0.9412 | 1 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 1 | 1 | 1 | 0.9063 | 0.7169 | 0.5604 | 0.509 | 0.5943 | 0.7959 | 1 | 0.9474 | 1 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | PR_W 2_1 | PR_W 2_2 | PR_W 2_3 | PR_W 2_4 | PR_W 2_5 | PR_W 2_6 | PR_W 2_7 | PR_W 2_8 | PR_W 2_9 | PR_W 2_10 | PR_W 2_11 | PR_W2 _12 |
|----|----------|----------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 0.9574 | 0.9585 | 0.9565 | 0.9103 | 0.7852 | 0.6641 | 0.6972 | 0.7788 | 0.8783 | 0.9244 | 0.939 | 0.9602 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 0.9593 | 0.9595 | 0.9584 | 0.9058 | 0.8029 | 0.6781 | 0.7196 | 0.7908 | 0.8825 | 0.9263 | 0.9379 | 0.964 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 0.9639 | 0.9595 | 0.9583 | 0.906 | 0.818 | 0.6741 | 0.7218 | 0.7895 | 0.8794 | 0.9303 | 0.9379 | 0.9649 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 0.965 | 0.9606 | 0.9584 | 0.9234 | 0.8269 | 0.7069 | 0.751 | 0.8156 | 0.8929 | 0.9351 | 0.948 | 0.9668 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 0.9659 | 0.9606 | 0.9622 | 0.9326 | 0.8347 | 0.724 | 0.7558 | 0.8263 | 0.8998 | 0.94 | 0.9511 | 0.9659 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 0.9659 | 0.9626 | 0.9612 | 0.9358 | 0.8325 | 0.7344 | 0.7447 | 0.8373 | 0.9023 | 0.9392 | 0.9511 | 0.9668 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 0.964 | 0.9606 | 0.964 | 0.9389 | 0.84 | 0.7186 | 0.7481 | 0.8308 | 0.89 | 0.9402 | 0.9491 | 0.9668 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | PCPD 1 | PCPD 2 | PCPD 3 | PCPD 4 | PCPD 5 | PCPD 6 | PCPD 7 | PCPD 8 | PCPD 9 | PCPD 10 | PCPD 11 | PCPD 12 |
|----|----------|----------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 30.64 | 28.11 | 30.64 | 28.17 | 24.06 | 17.86 | 18.17 | 21.47 | 26.69 | 29.75 | 29.14 | 30.72 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 30.69 | 28.14 | 30.69 | 28.03 | 24.53 | 18.56 | 19.42 | 22.31 | 26.72 | 29.78 | 29.08 | 30.86 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 30.81 | 28.14 | 30.67 | 28.08 | 25.33 | 18.58 | 19.67 | 22.17 | 26.72 | 29.89 | 29.08 | 30.89 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 30.92 | 28.17 | 30.72 | 28.64 | 26 | 20 | 21.19 | 24.25 | 27.22 | 29.97 | 29.39 | 30.97 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 30.94 | 28.17 | 30.83 | 28.83 | 26.39 | 21.14 | 21.61 | 25.11 | 27.44 | 30.11 | 29.53 | 30.94 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 30.94 | 28.22 | 30.81 | 28.97 | 26.36 | 21.75 | 22.08 | 25.61 | 27.58 | 30.14 | 29.53 | 30.94 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 30.89 | 28.17 | 30.86 | 29.11 | 26.39 | 21.03 | 21.72 | 25.11 | 27.28 | 30.19 | 29.47 | 30.94 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | RAINH HMX1 | RAINH HMX2 | RAINH HMX3 | RAINH HMX4 | RAINH HMX5 | RAINH HMX6 | RAINH HMX7 | RAINH HMX8 | RAINH HMX9 | RAINH HMX10 | RAINH HMX11 | RAINH HMX12 |
|----|----------|----------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 4.7728 | 8.1763 | 6.6421 | 6.4476 | 1.3361 | 2.6875 | 2.4683 | 1.8597 | 2.8687 | 5.5903 | 5.3385 | 5.9696 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 4.9729 | 8.2472 | 5.6987 | 4.9102 | 1.4177 | 2.9326 | 2.4375 | 1.8562 | 2.3623 | 6.7585 | 4.4729 | 7.0605 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 4.1457 | 6.7846 | 4.3926 | 3.6405 | 1.8239 | 2.5519 | 3.2061 | 1.7245 | 2.6238 | 7.5538 | 3.9620 | 5.8905 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 6.8526 | 7.8559 | 4.7110 | 3.7684 | 3.1076 | 3.2694 | 5.8430 | 3.4881 | 3.3411 | 6.2190 | 4.9400 | 5.4799 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 8.6969 | 7.1952 | 5.4277 | 4.8176 | 3.3663 | 7.8778 | 5.2409 | 4.5910 | 3.5526 | 4.7897 | 5.3273 | 5.2424 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 6.4964 | 7.9217 | 9.6405 | 3.2645 | 3.3477 | 4.4393 | 5.1763 | 7.1669 | 4.6932 | 4.9242 | 6.0395 | 6.1211 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 4.9988 | 6.2632 | 4.9778 | 2.7430 | 2.0463 | 2.1307 | 3.9660 | 4.1181 | 2.6582 | 4.2971 | 5.5226 | 5.3419 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | SOLA RAV1 | SOLA RAV2 | SOLA RAV3 | SOLA RAV4 | SOLA RAV5 | SOLA RAV6 | SOLA RAV7 | SOLA RAV8 | SOLA RAV9 | SOLA RAV10 | SOLA RAV11 | SOLA RAV12 |
|----|----------|----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 16.326 | 14.482 | 14.420 | 16.905 | 19.365 | 20.766 | 22.321 | 23.325 | 22.570 | 21.633 | 22.066 | 19.360 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 16.975 | 14.862 | 14.855 | 17.425 | 19.867 | 21.506 | 23.267 | 24.605 | 23.633 | 22.151 | 22.633 | 19.825 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 20.632 | 18.907 | 18.609 | 20.253 | 21.100 | 21.246 | 22.639 | 24.440 | 25.181 | 25.233 | 25.470 | 23.192 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 16.326 | 14.482 | 14.420 | 16.905 | 19.365 | 20.766 | 22.321 | 23.325 | 22.570 | 21.633 | 22.066 | 19.360 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 20.392 | 19.727 | 18.909 | 19.659 | 20.384 | 20.404 | 21.753 | 23.784 | 25.050 | 25.087 | 25.027 | 22.742 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 16.975 | 14.862 | 14.855 | 17.425 | 19.867 | 21.506 | 23.267 | 24.605 | 23.633 | 22.151 | 22.633 | 19.825 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 20.632 | 18.907 | 18.609 | 20.253 | 21.100 | 21.246 | 22.639 | 24.440 | 25.181 | 25.233 | 25.470 | 23.192 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | DEWP T1 | DEWP T2 | DEWP T3 | DEWP T4 | DEWP T5 | DEWP T6 | DEWP T7 | DEWP T8 | DEWP T9 | DEWP T10 | DEWP T11 | DEWPT 12 |
|----|----------|----------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 9.32 | 9.72 | 10.23 | 9.05 | 7.44 | 4.81 | 3.77 | 4.57 | 6.72 | 8.33 | 8.77 | 8.75 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 8.92 | 9.44 | 9.88 | 8.79 | 7.13 | 4.61 | 3.53 | 4.37 | 6.41 | 7.98 | 8.62 | 8.56 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 7.36 | 7.17 | 7.54 | 6.99 | 5.59 | 3.14 | 1.99 | 3.2 | 5.32 | 6.74 | 7.4 | 7.35 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 7.63 | 7.85 | 8.24 | 7.6 | 5.7 | 3.16 | 1.84 | 3.05 | 5.19 | 6.89 | 7.84 | 8.1 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 6.14 | 5.27 | 5.82 | 6.03 | 4.91 | 3.14 | 2.06 | 3.18 | 4.83 | 6.15 | 6.78 | 7.02 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 6.18 | 6.65 | 7.03 | 6.13 | 4.52 | 2.53 | 0.9 | 1.86 | 3.54 | 5.21 | 6.16 | 6.53 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 5.67 | 5.52 | 5.8 | 5.22 | 4.38 | 3.22 | 1.5 | 2.59 | 3.99 | 5.19 | 5.88 | 6 |

| ID | Latitud | Longitud | Elevación (msnm) | WVDA V1 | WVDA V2 | WVDA V3 | WVDA V4 | WVDA V5 | WVDA V6 | WVDA V7 | WVDA V8 | WVDA V9 | WVDA V10 | WVDA V11 | WVDA V12 |
|----|----------|----------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | -14.013 | -71.4477 | 3460 | 2.3026 | 2.2362 | 2.2931 | 2.6278 | 3.1841 | 3.7056 | 3.8784 | 3.7003 | 3.2539 | 2.8471 | 2.7019 | 2.5504 |
| 2 | -13.9342 | -71.425 | 4430 | 2.3577 | 2.3017 | 2.3255 | 2.6822 | 3.2436 | 3.8945 | 4.0932 | 3.9091 | 3.4370 | 2.9727 | 2.7207 | 2.5800 |
| 3 | -13.9809 | -71.3564 | 3840 | 2.5031 | 2.5019 | 2.5423 | 2.8226 | 3.2992 | 3.7370 | 3.8974 | 3.7504 | 3.4364 | 3.0686 | 2.9060 | 2.7438 |
| 4 | -13.9352 | -71.2816 | 4400 | 2.3026 | 2.2362 | 2.2931 | 2.6278 | 3.1841 | 3.7056 | 3.8784 | 3.7003 | 3.2539 | 2.8471 | 2.7019 | 2.5504 |
| 5 | -13.9365 | -71.1897 | 4920 | 2.6603 | 2.5681 | 2.6494 | 2.8717 | 3.1859 | 3.4439 | 3.5081 | 3.3958 | 3.2283 | 3.0043 | 2.8979 | 2.8030 |
| 6 | -13.816 | -71.1847 | 4628 | 2.3026 | 2.2362 | 2.2931 | 2.6278 | 3.1841 | 3.7056 | 3.8784 | 3.7003 | 3.2539 | 2.8471 | 2.7019 | 2.5504 |
| 7 | -13.7596 | -71.1373 | 5200 | 2.5031 | 2.5019 | 2.5423 | 2.8226 | 3.2992 | 3.7370 | 3.8974 | 3.7504 | 3.4364 | 3.0686 | 2.9060 | 2.7438 |

*La información presentada en el anexo B corresponde a 7 puntos dentro de la cuenca, estos puntos fueron seleccionados de manera que estén distribuidos de uniformemente sobre la cuenca, la elección de la cantidad de puntos fue arbitraria. Cada número que sigue al nombre del parámetro corresponde a un mes del calendario, por ejemplo el mes 1 es enero, el mes 2 es febrero y así sucesivamente hasta el mes 12 que es diciembre. Las abreviaciones de la base de datos corresponden a los siguientes parámetros climatológicos:

| | |
|-----------------|---|
| TMPMX | Temperatura Máxima Promedio |
| TMPMN | Temperatura Mínima Promedio |
| TMPSTDMX | Desviación Estándar de Máxima Temperatura |
| TMPSTDMN | Desviación Estándar de Mínima Temperatura |
| PCPMM | Precipitación Promedio Mensual |
| PCPSTD | Desviación Estándar de Precipitación promedio |
| PCPSKW | Coficiente de Skew para la Precipitación |
| PR_W1 | Probabilidad de un día Húmedo seguido de un día Seco |
| PR_W2 | Probabilidad de un día Seco seguido de un día Húmedo |
| PCPD | Promedio de Número de Días con Precipitación en un mes |
| RAINHHMX | Promedio de Precipitación Horaria Máxima |
| SOLARAV | Promedio de Radiación Solar |
| DEWPT | Promedio de Temperaturas Diarias de Punto de Roció |
| WNDVAV | Promedio de Viento Mensual |

**Anexo B. Producción mensual de sedimentos por subcuenca, en
Ton/Ha/año obtenido del modelo SWAT**

| FECHA | SUBCUENCAS | | | | | | | | | | |
|--------|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Ene-95 | 1.57 | 0.72 | 3.46 | 3.93 | 0.42 | 2.65 | 4.00 | 4.49 | 3.89 | 4.14 | 0.11 |
| Feb-95 | 0.50 | 0.25 | 3.29 | 1.34 | 1.15 | 2.50 | 1.37 | 4.28 | 3.72 | 3.95 | 0.43 |
| Mar-95 | 0.58 | 0.29 | 0.23 | 1.56 | 0.00 | 0.18 | 1.60 | 0.30 | 0.26 | 0.28 | 0.00 |
| Abr-95 | 0.05 | 0.03 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nov-95 | 0.02 | 0.01 | 0.44 | 0.04 | 0.00 | 0.38 | 0.05 | 0.56 | 0.49 | 0.53 | 0.00 |
| Dic-95 | 0.79 | 0.40 | 12.60 | 2.14 | 5.29 | 10.20 | 2.23 | 16.00 | 13.90 | 14.90 | 1.84 |
| Ene-96 | 2.28 | 1.09 | 3.18 | 5.96 | 0.00 | 2.42 | 6.09 | 4.13 | 3.60 | 3.82 | 0.00 |
| Feb-96 | 1.30 | 0.64 | 4.59 | 3.50 | 2.05 | 3.50 | 3.57 | 5.96 | 5.18 | 5.50 | 0.91 |
| Mar-96 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Abr-96 | 0.95 | 0.46 | 0.62 | 2.50 | 0.63 | 0.48 | 2.55 | 0.81 | 0.70 | 0.75 | 0.33 |
| May-96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-96 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.38 | 0.06 | 0.00 | 0.08 | 0.07 | 0.08 | 0.11 |
| Nov-96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Dic-96 | 0.14 | 0.07 | 3.97 | 0.37 | 1.14 | 3.30 | 0.39 | 5.05 | 4.35 | 4.69 | 0.33 |
| Ene-97 | 1.89 | 0.88 | 4.97 | 4.75 | 0.05 | 3.76 | 4.87 | 6.44 | 5.60 | 5.95 | 0.01 |
| Feb-97 | 4.66 | 2.06 | 18.70 | 11.30 | 9.30 | 14.10 | 11.50 | 24.20 | 21.00 | 22.40 | 6.94 |
| Mar-97 | 1.47 | 0.71 | 2.09 | 3.90 | 0.67 | 1.60 | 3.97 | 2.72 | 2.37 | 2.52 | 0.59 |
| Abr-97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-97 | 0.24 | 0.12 | 0.07 | 0.66 | 0.00 | 0.06 | 0.67 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.00 |
| Set-97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nov-97 | 0.37 | 0.20 | 3.08 | 1.00 | 0.11 | 2.63 | 1.06 | 3.86 | 3.34 | 3.61 | 0.03 |
| Dic-97 | 0.01 | 0.01 | 0.44 | 0.04 | 0.00 | 0.39 | 0.04 | 0.56 | 0.47 | 0.52 | 0.00 |
| Ene-98 | 1.50 | 0.74 | 3.55 | 3.90 | 0.31 | 2.69 | 4.05 | 4.60 | 4.00 | 4.25 | 0.08 |
| Feb-98 | 8.19 | 3.44 | 31.10 | 18.90 | 20.90 | 23.50 | 19.20 | 40.20 | 34.90 | 37.10 | 18.40 |
| Mar-98 | 1.64 | 0.78 | 3.46 | 4.27 | 0.76 | 2.62 | 4.35 | 4.49 | 3.91 | 4.16 | 0.41 |
| Abr-98 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nov-98 | 0.00 | 0.00 | 0.41 | 0.00 | 0.00 | 0.36 | 0.00 | 0.51 | 0.45 | 0.49 | 0.00 |
| Dic-98 | 0.09 | 0.05 | 2.13 | 0.25 | 0.18 | 1.87 | 0.27 | 2.66 | 2.27 | 2.48 | 0.05 |
| Ene-99 | 10.50 | 4.60 | 9.77 | 24.80 | 0.00 | 7.47 | 25.50 | 12.70 | 11.00 | 11.70 | 0.00 |
| Feb-99 | 1.30 | 0.64 | 4.52 | 3.49 | 0.47 | 3.44 | 3.55 | 5.87 | 5.11 | 5.43 | 0.12 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Mar-99 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Abr-99 | 0.93 | 0.42 | 1.00 | 2.32 | 0.00 | 0.79 | 2.36 | 1.30 | 1.13 | 1.21 | 0.00 |
| May-99 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-99 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-99 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-99 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-99 | 0.08 | 0.04 | 0.00 | 0.22 | 0.00 | 0.00 | 0.23 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-99 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nov-99 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Dic-99 | 2.25 | 1.07 | 12.40 | 5.79 | 10.30 | 9.53 | 5.93 | 16.00 | 13.80 | 14.70 | 4.40 |
| Ene-00 | 1.36 | 0.64 | 1.04 | 3.54 | 0.00 | 0.79 | 3.60 | 1.35 | 1.17 | 1.25 | 0.00 |
| Feb-00 | 3.18 | 1.49 | 17.50 | 8.13 | 19.90 | 13.20 | 8.28 | 22.60 | 19.70 | 20.90 | 18.70 |
| Mar-00 | 0.32 | 0.16 | 0.01 | 0.87 | 0.00 | 0.01 | 0.89 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Abr-00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.36 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 |
| Nov-00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Dic-00 | 0.11 | 0.06 | 1.57 | 0.31 | 1.58 | 1.35 | 0.32 | 1.98 | 1.71 | 1.85 | 0.63 |
| Ene-01 | 3.14 | 1.48 | 8.85 | 8.11 | 0.69 | 6.95 | 8.27 | 11.40 | 9.87 | 10.50 | 0.18 |
| Feb-01 | 6.25 | 2.81 | 16.80 | 15.40 | 8.30 | 12.80 | 15.70 | 21.80 | 18.90 | 20.10 | 8.78 |
| Mar-01 | 2.45 | 1.12 | 5.67 | 6.20 | 6.93 | 4.30 | 6.29 | 7.35 | 6.40 | 6.80 | 8.50 |
| Abr-01 | 0.30 | 0.15 | 0.82 | 0.82 | 0.00 | 0.63 | 0.83 | 1.06 | 0.93 | 0.99 | 0.00 |
| May-01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-01 | 0.30 | 0.15 | 1.26 | 0.81 | 0.00 | 0.98 | 0.83 | 1.61 | 1.43 | 1.53 | 0.00 |
| Ago-01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-01 | 0.10 | 0.05 | 0.82 | 0.28 | 1.57 | 0.65 | 0.28 | 1.06 | 0.92 | 0.98 | 0.54 |
| Nov-01 | 0.01 | 0.01 | 0.24 | 0.04 | 0.00 | 0.21 | 0.04 | 0.30 | 0.26 | 0.29 | 0.00 |
| Dic-01 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 2.02 | 0.91 | 0.00 | 1.24 | 1.05 | 1.16 | 0.82 |
| Ene-02 | 0.84 | 0.44 | 2.95 | 2.29 | 0.00 | 2.35 | 2.40 | 3.81 | 3.28 | 3.51 | 0.00 |
| Feb-02 | 11.90 | 5.04 | 37.00 | 27.70 | 22.90 | 27.90 | 28.20 | 47.80 | 41.50 | 44.10 | 21.50 |
| Mar-02 | 1.00 | 0.49 | 2.19 | 2.66 | 2.65 | 1.67 | 2.71 | 2.84 | 2.48 | 2.63 | 3.13 |
| Abr-02 | 0.06 | 0.03 | 0.03 | 0.17 | 0.00 | 0.02 | 0.17 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.00 |
| May-02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-02 | 0.28 | 0.14 | 0.22 | 0.72 | 0.00 | 0.19 | 0.77 | 0.28 | 0.24 | 0.26 | 0.00 |
| Ago-02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-02 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 1.42 | 0.06 | 0.00 | 0.09 | 0.07 | 0.08 | 0.42 |
| Nov-02 | 0.07 | 0.04 | 0.62 | 0.20 | 0.00 | 0.52 | 0.21 | 0.78 | 0.68 | 0.74 | 0.00 |
| Dic-02 | 1.51 | 0.75 | 12.00 | 4.00 | 7.06 | 9.46 | 4.15 | 15.40 | 13.40 | 14.30 | 4.35 |
| Ene-03 | 6.05 | 2.63 | 10.10 | 14.50 | 0.28 | 7.69 | 14.70 | 13.10 | 11.40 | 12.20 | 0.08 |
| Feb-03 | 2.30 | 1.04 | 9.66 | 5.74 | 10.20 | 7.34 | 5.83 | 12.50 | 10.90 | 11.60 | 7.44 |
| Mar-03 | 0.99 | 0.48 | 0.47 | 2.59 | 0.01 | 0.36 | 2.64 | 0.61 | 0.53 | 0.57 | 0.00 |
| Abr-03 | 0.26 | 0.13 | 0.06 | 0.72 | 0.02 | 0.05 | 0.73 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.01 |
| May-03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nov-03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Dic-03 | 0.89 | 0.45 | 8.32 | 2.41 | 5.00 | 6.80 | 2.50 | 10.60 | 9.10 | 9.78 | 2.79 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ene-04 | 23.70 | 9.76 | 20.10 | 53.20 | 1.05 | 15.50 | 54.40 | 25.90 | 22.40 | 23.90 | 0.27 |
| Feb-04 | 3.81 | 1.71 | 24.00 | 9.42 | 19.10 | 18.10 | 9.58 | 31.00 | 26.90 | 28.60 | 15.70 |
| Mar-04 | 0.12 | 0.06 | 0.06 | 0.34 | 0.00 | 0.04 | 0.34 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.00 |
| Abr-04 | 0.55 | 0.27 | 0.00 | 1.45 | 0.00 | 0.00 | 1.48 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-04 | 4.38 | 2.13 | 19.00 | 9.58 | 0.00 | 14.50 | 10.60 | 23.90 | 21.60 | 23.00 | 0.00 |
| Ago-04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-04 | 0.10 | 0.06 | 0.00 | 0.27 | 0.00 | 0.00 | 0.29 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-04 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 1.41 | 0.20 | 0.00 | 0.32 | 0.28 | 0.30 | 0.47 |
| Nov-04 | 0.00 | 0.00 | 0.47 | 0.01 | 0.00 | 0.37 | 0.01 | 0.61 | 0.53 | 0.57 | 0.00 |
| Dic-04 | 0.27 | 0.15 | 8.30 | 0.74 | 5.53 | 6.64 | 0.78 | 10.60 | 9.17 | 9.83 | 2.74 |
| Ene-05 | 0.27 | 0.14 | 0.07 | 0.74 | 0.00 | 0.06 | 0.76 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.00 |
| Feb-05 | 2.74 | 1.26 | 12.30 | 6.85 | 13.70 | 9.34 | 7.00 | 15.90 | 13.90 | 14.70 | 8.64 |
| Mar-05 | 1.27 | 0.60 | 4.81 | 3.31 | 1.89 | 3.65 | 3.37 | 6.20 | 5.45 | 5.79 | 1.01 |
| Abr-05 | 0.06 | 0.03 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nov-05 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.00 |
| Dic-05 | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.21 | 0.17 | 0.20 | 0.00 |
| Ene-06 | 14.40 | 5.91 | 18.10 | 32.40 | 0.27 | 14.10 | 33.00 | 23.30 | 20.10 | 21.50 | 0.07 |
| Feb-06 | 6.43 | 2.73 | 12.20 | 14.90 | 17.30 | 9.23 | 15.20 | 15.80 | 13.80 | 14.60 | 12.10 |
| Mar-06 | 0.35 | 0.17 | 2.15 | 0.94 | 1.00 | 1.64 | 0.96 | 2.79 | 2.43 | 2.59 | 0.80 |
| Abr-06 | 2.73 | 1.22 | 2.39 | 6.68 | 2.71 | 1.81 | 6.80 | 3.10 | 2.70 | 2.87 | 1.73 |
| May-06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nov-06 | 0.10 | 0.05 | 3.51 | 0.28 | 0.00 | 2.96 | 0.30 | 4.40 | 3.82 | 4.13 | 0.00 |
| Dic-06 | 0.28 | 0.15 | 7.65 | 0.76 | 5.00 | 5.98 | 0.82 | 9.89 | 8.53 | 9.12 | 2.09 |
| Ene-07 | 4.16 | 1.90 | 8.55 | 10.30 | 0.83 | 6.48 | 10.60 | 11.10 | 9.67 | 10.30 | 0.27 |
| Feb-07 | 0.45 | 0.22 | 5.30 | 1.21 | 4.09 | 4.04 | 1.23 | 6.88 | 5.99 | 6.37 | 2.01 |
| Mar-07 | 1.46 | 0.67 | 11.80 | 3.70 | 12.50 | 8.91 | 3.76 | 15.20 | 13.30 | 14.10 | 13.00 |
| Abr-07 | 0.16 | 0.08 | 0.00 | 0.44 | 0.05 | 0.00 | 0.45 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| May-07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nov-07 | 0.03 | 0.02 | 1.18 | 0.09 | 0.00 | 0.98 | 0.10 | 1.52 | 1.32 | 1.43 | 0.00 |
| Dic-07 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.15 | 0.12 | 0.14 | 0.00 |
| Ene-08 | 5.91 | 2.69 | 14.10 | 14.60 | 0.01 | 10.80 | 15.00 | 18.10 | 15.80 | 16.80 | 0.00 |
| Feb-08 | 4.74 | 2.08 | 19.60 | 11.40 | 12.80 | 14.80 | 11.60 | 25.20 | 22.00 | 23.40 | 8.10 |
| Mar-08 | 1.57 | 0.75 | 3.13 | 4.03 | 1.26 | 2.38 | 4.12 | 4.07 | 3.55 | 3.77 | 1.00 |
| Abr-08 | 0.05 | 0.03 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.55 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 |

| | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Nov-08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Dic-08 | 1.12 | 0.57 | 6.80 | 2.98 | 3.88 | 5.48 | 3.11 | 8.69 | 7.50 | 8.04 | 2.00 | |
| Ene-09 | 2.49 | 1.13 | 7.28 | 6.14 | 0.90 | 5.50 | 6.27 | 9.39 | 8.22 | 8.73 | 0.36 | |
| Feb-09 | 1.29 | 0.61 | 4.70 | 3.36 | 2.32 | 3.56 | 3.41 | 6.10 | 5.30 | 5.64 | 1.25 | |
| Mar-09 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Abr-09 | 0.24 | 0.12 | 0.01 | 0.63 | 0.00 | 0.01 | 0.65 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | |
| May-09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Jun-09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Jul-09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Ago-09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Set-09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Oct-09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Nov-09 | 2.49 | 1.22 | 25.40 | 6.47 | 1.21 | 20.00 | 6.72 | 32.30 | 28.20 | 30.20 | 0.37 | |
| Dic-09 | 0.20 | 0.11 | 1.42 | 0.55 | 0.78 | 1.09 | 0.58 | 1.85 | 1.60 | 1.70 | 0.20 | |
| Ene-10 | 17.70 | 7.29 | 39.00 | 40.00 | 7.58 | 29.40 | 40.70 | 50.20 | 43.70 | 46.40 | 3.41 | |
| Feb-10 | 1.12 | 0.53 | 3.36 | 2.89 | 2.98 | 2.54 | 2.94 | 4.37 | 3.79 | 4.03 | 1.64 | |
| Mar-10 | 4.73 | 2.02 | 8.42 | 11.00 | 2.44 | 6.33 | 11.30 | 10.90 | 9.48 | 10.10 | 1.49 | |
| Abr-10 | 0.07 | 0.04 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| May-10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Jun-10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Jul-10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Ago-10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Set-10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Oct-10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Nov-10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Dic-10 | 0.69 | 0.36 | 6.37 | 1.85 | 10.70 | 5.06 | 1.94 | 8.17 | 7.04 | 7.54 | 6.34 | |
| Ene-11 | 4.92 | 2.17 | 7.16 | 11.90 | 0.32 | 5.41 | 12.10 | 9.27 | 8.08 | 8.58 | 0.09 | |
| Feb-11 | 2.16 | 1.05 | 14.10 | 5.73 | 6.05 | 10.70 | 5.84 | 18.20 | 15.90 | 16.90 | 4.83 | |
| Mar-11 | 0.03 | 0.02 | 0.90 | 0.09 | 0.00 | 0.69 | 0.09 | 1.17 | 1.02 | 1.09 | 0.00 | |
| Abr-11 | 1.59 | 0.73 | 1.25 | 3.98 | 0.02 | 0.95 | 4.07 | 1.62 | 1.42 | 1.50 | 0.01 | |
| May-11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Jun-11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Jul-11 | 0.80 | 0.41 | 7.50 | 2.04 | 0.00 | 5.72 | 2.17 | 9.66 | 8.56 | 9.10 | 0.00 | |
| Ago-11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Set-11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Oct-11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Nov-11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Dic-11 | 0.52 | 0.27 | 7.28 | 1.43 | 4.12 | 5.80 | 1.50 | 9.34 | 8.10 | 8.67 | 1.49 | |
| Ene-12 | 8.05 | 3.46 | 13.30 | 19.00 | 0.46 | 10.10 | 19.30 | 17.20 | 15.00 | 15.90 | 0.15 | |
| Feb-12 | 10.20 | 4.40 | 37.00 | 24.20 | 23.00 | 27.90 | 24.60 | 47.80 | 41.50 | 44.10 | 23.60 | |
| Mar-12 | 0.09 | 0.04 | 0.00 | 0.24 | 0.00 | 0.00 | 0.24 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Abr-12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| May-12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Jun-12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Jul-12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Ago-12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Set-12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Oct-12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Nov-12 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.11 | 0.09 | 0.11 | 0.00 | |
| Dic-12 | 1.06 | 0.50 | 10.60 | 2.69 | 3.93 | 8.26 | 2.77 | 13.50 | 11.70 | 12.50 | 2.58 | |
| Ene-13 | 11.20 | 4.79 | 9.04 | 26.30 | 0.16 | 6.84 | 26.70 | 11.70 | 10.20 | 10.90 | 0.04 | |
| Feb-13 | 3.82 | 1.68 | 18.70 | 9.24 | 14.60 | 14.10 | 9.40 | 24.10 | 21.00 | 22.30 | 10.60 | |
| Mar-13 | 0.13 | 0.07 | 0.16 | 0.36 | 0.00 | 0.13 | 0.37 | 0.21 | 0.18 | 0.19 | 0.00 | |
| Abr-13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| May-13 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.00 | |
| Jun-13 | 1.59 | 0.79 | 0.00 | 3.90 | 0.00 | 0.00 | 4.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Jul-13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Ago-13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |

| | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Set-13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-13 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Nov-13 | 0.07 | 0.04 | 0.57 | 0.20 | 0.00 | 0.50 | 0.20 | 0.71 | 0.61 | 0.67 | 0.00 |
| Dic-13 | 7.19 | 3.21 | 28.90 | 17.50 | 13.30 | 22.70 | 17.80 | 37.00 | 32.10 | 34.40 | 9.79 |
| Ene-14 | 5.90 | 2.67 | 6.22 | 14.60 | 0.00 | 4.73 | 14.90 | 8.07 | 7.03 | 7.48 | 0.00 |
| Feb-14 | 0.62 | 0.30 | 5.77 | 1.66 | 3.70 | 4.37 | 1.69 | 7.48 | 6.49 | 6.90 | 2.67 |
| Mar-14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Abr-14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-14 | 1.04 | 0.51 | 1.13 | 2.71 | 0.65 | 0.92 | 2.81 | 1.45 | 1.28 | 1.38 | 0.19 |
| Nov-14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Dic-14 | 3.60 | 1.62 | 6.95 | 8.83 | 2.25 | 5.67 | 9.01 | 8.85 | 7.64 | 8.22 | 1.01 |
| Ene-15 | 8.66 | 3.79 | 12.00 | 20.80 | 0.49 | 9.13 | 21.10 | 15.60 | 13.60 | 14.50 | 0.15 |
| Feb-15 | 1.97 | 0.90 | 10.50 | 4.95 | 3.38 | 7.99 | 5.03 | 13.60 | 11.90 | 12.60 | 1.90 |
| Mar-15 | 0.75 | 0.36 | 1.79 | 1.97 | 1.26 | 1.36 | 2.01 | 2.33 | 2.03 | 2.16 | 0.87 |
| Abr-15 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-15 | 0.28 | 0.14 | 1.44 | 0.68 | 0.00 | 1.16 | 0.74 | 1.82 | 1.62 | 1.74 | 0.00 |
| Jun-15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-15 | 5.70 | 2.49 | 0.00 | 12.70 | 0.00 | 0.00 | 13.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ago-15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Oct-15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nov-15 | 0.54 | 0.27 | 0.25 | 1.47 | 0.00 | 0.23 | 1.50 | 0.32 | 0.28 | 0.30 | 0.00 |
| Dic-15 | 0.95 | 0.45 | 4.88 | 2.47 | 0.90 | 4.11 | 2.51 | 6.18 | 5.32 | 5.76 | 0.28 |
| Ene-16 | 6.84 | 2.96 | 5.38 | 16.30 | 0.00 | 4.23 | 16.60 | 6.96 | 6.00 | 6.43 | 0.00 |
| Feb-16 | 2.96 | 1.35 | 17.50 | 7.45 | 5.18 | 13.20 | 7.56 | 22.60 | 19.60 | 20.90 | 2.64 |
| Mar-16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Abr-16 | 0.05 | 0.03 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May-16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun-16 | 2.28 | 1.04 | 0.00 | 5.21 | 0.00 | 0.00 | 5.52 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul-16 | 36.70 | 13.20 | 12.60 | 70.50 | 0.00 | 9.64 | 72.80 | 15.20 | 14.60 | 15.60 | 0.00 |
| Ago-16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Set-16 | 0.00 | 0.00 | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 0.28 | 0.00 | 0.45 | 0.41 | 0.44 | 0.00 |
| Oct-16 | 0.00 | 0.00 | 0.32 | 0.00 | 0.00 | 0.28 | 0.00 | 0.40 | 0.35 | 0.38 | 0.00 |
| Nov-16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Dic-16 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.00 |

Anexo C. Datos de Precipitación Acumulados Mensuales Completados y Usados (mm)

*Para la presente Tesis se usarón precipitaciones diarias, por motivos practicos se muestran las precipitaciones acumuladas mensuales

| Fecha | Pomacanchi | Combapata | Ccatcca |
|---------------|------------|-----------|---------|
| enero-85 | 142.29 | 125.29 | 151.20 |
| febrero-85 | 124.47 | 116.31 | 135.04 |
| marzo-85 | 152.14 | 153.75 | 138.16 |
| abril-85 | 98.77 | 82.64 | 72.43 |
| mayo-85 | 32.72 | 37.08 | 42.93 |
| junio-85 | 9.25 | 15.32 | 19.75 |
| julio-85 | 12.64 | 17.47 | 32.27 |
| agosto-85 | 18.77 | 20.85 | 32.13 |
| septiembre-85 | 33.79 | 46.97 | 51.44 |
| octubre-85 | 52.84 | 53.22 | 58.31 |
| noviembre-85 | 86.10 | 98.25 | 115.62 |
| diciembre-85 | 129.86 | 132.41 | 99.05 |
| enero-86 | 90.90 | 77.96 | 88.07 |
| febrero-86 | 142.29 | 128.67 | 122.58 |
| marzo-86 | 136.20 | 131.82 | 130.96 |
| abril-86 | 77.98 | 66.14 | 57.43 |
| mayo-86 | 25.48 | 28.77 | 38.12 |
| junio-86 | 8.42 | 11.59 | 16.09 |
| julio-86 | 9.22 | 14.50 | 23.15 |
| agosto-86 | 26.86 | 32.47 | 48.80 |
| septiembre-86 | 37.40 | 47.68 | 45.16 |
| octubre-86 | 23.86 | 30.66 | 30.84 |
| noviembre-86 | 58.17 | 61.47 | 57.98 |
| diciembre-86 | 94.79 | 97.53 | 83.70 |
| enero-87 | 167.58 | 147.36 | 187.67 |
| febrero-87 | 124.48 | 115.06 | 106.33 |
| marzo-87 | 90.77 | 87.68 | 91.64 |
| abril-87 | 61.68 | 48.95 | 41.15 |
| mayo-87 | 22.91 | 22.66 | 42.24 |
| junio-87 | 7.69 | 9.59 | 13.01 |
| julio-87 | 22.04 | 27.09 | 30.35 |
| agosto-87 | 16.81 | 18.37 | 23.84 |
| septiembre-87 | 31.17 | 39.07 | 46.30 |
| octubre-87 | 48.16 | 56.14 | 60.24 |
| noviembre-87 | 98.29 | 107.43 | 105.70 |
| diciembre-87 | 146.82 | 139.59 | 132.36 |
| enero-88 | 91.31 | 86.52 | 107.82 |
| febrero-88 | 119.27 | 120.68 | 102.34 |
| marzo-88 | 192.11 | 178.95 | 177.43 |
| abril-88 | 113.53 | 98.37 | 89.97 |
| mayo-88 | 32.62 | 37.59 | 38.54 |
| junio-88 | 11.56 | 12.87 | 18.35 |
| julio-88 | 10.61 | 13.20 | 22.05 |

| | | | |
|---------------|--------|--------|--------|
| agosto-88 | 9.71 | 9.99 | 13.05 |
| septiembre-88 | 22.19 | 29.49 | 51.89 |
| octubre-88 | 41.84 | 52.35 | 51.62 |
| noviembre-88 | 64.86 | 69.30 | 55.58 |
| diciembre-88 | 136.91 | 133.67 | 102.45 |
| enero-89 | 172.18 | 146.15 | 136.70 |
| febrero-89 | 136.22 | 128.89 | 117.67 |
| marzo-89 | 155.66 | 159.24 | 148.96 |
| abril-89 | 75.55 | 68.09 | 65.53 |
| mayo-89 | 35.68 | 38.21 | 48.04 |
| junio-89 | 22.51 | 23.38 | 31.04 |
| julio-89 | 17.71 | 19.15 | 33.29 |
| agosto-89 | 25.29 | 27.88 | 34.85 |
| septiembre-89 | 34.42 | 44.51 | 52.11 |
| octubre-89 | 45.74 | 48.69 | 42.16 |
| noviembre-89 | 71.07 | 81.64 | 90.32 |
| diciembre-89 | 102.23 | 98.47 | 97.91 |
| enero-90 | 104.47 | 110.24 | 118.01 |
| febrero-90 | 127.57 | 119.69 | 108.02 |
| marzo-90 | 99.57 | 102.78 | 102.93 |
| abril-90 | 77.14 | 72.00 | 66.58 |
| mayo-90 | 22.30 | 35.83 | 40.49 |
| junio-90 | 43.46 | 46.83 | 59.81 |
| julio-90 | 10.72 | 12.67 | 19.16 |
| agosto-90 | 22.66 | 25.43 | 34.75 |
| septiembre-90 | 28.03 | 35.74 | 47.98 |
| octubre-90 | 76.98 | 80.12 | 79.23 |
| noviembre-90 | 107.81 | 111.88 | 105.97 |
| diciembre-90 | 124.87 | 120.59 | 101.54 |
| enero-91 | 101.90 | 116.44 | 122.10 |
| febrero-91 | 131.98 | 131.07 | 128.75 |
| marzo-91 | 157.68 | 148.31 | 143.86 |
| abril-91 | 75.31 | 64.93 | 52.97 |
| mayo-91 | 34.01 | 36.04 | 44.93 |
| junio-91 | 26.69 | 31.09 | 34.57 |
| julio-91 | 7.88 | 9.33 | 14.46 |
| agosto-91 | 14.80 | 16.81 | 24.89 |
| septiembre-91 | 23.74 | 30.36 | 42.99 |
| octubre-91 | 53.06 | 52.69 | 46.09 |
| noviembre-91 | 72.14 | 77.36 | 80.07 |
| diciembre-91 | 92.26 | 80.13 | 84.50 |
| enero-92 | 101.87 | 102.02 | 114.11 |
| febrero-92 | 151.20 | 141.84 | 121.25 |
| marzo-92 | 80.31 | 83.42 | 64.25 |
| abril-92 | 31.80 | 21.26 | 9.43 |
| mayo-92 | 25.87 | 26.77 | 37.93 |
| junio-92 | 27.60 | 33.78 | 47.27 |
| julio-92 | 18.52 | 23.32 | 36.22 |
| agosto-92 | 32.21 | 38.23 | 53.83 |
| septiembre-92 | 11.51 | 25.13 | 36.86 |

| | | | |
|---------------|--------|--------|--------|
| octubre-92 | 60.53 | 64.85 | 62.28 |
| noviembre-92 | 96.44 | 112.03 | 105.46 |
| diciembre-92 | 78.85 | 80.46 | 82.23 |
| enero-93 | 211.27 | 206.39 | 186.95 |
| febrero-93 | 122.94 | 114.54 | 112.91 |
| marzo-93 | 108.58 | 105.21 | 95.47 |
| abril-93 | 105.37 | 85.40 | 51.21 |
| mayo-93 | 25.01 | 27.80 | 37.41 |
| junio-93 | 14.31 | 14.57 | 19.97 |
| julio-93 | 15.55 | 21.04 | 35.20 |
| agosto-93 | 33.62 | 36.44 | 49.33 |
| septiembre-93 | 28.51 | 33.09 | 39.94 |
| octubre-93 | 55.99 | 64.87 | 60.79 |
| noviembre-93 | 115.92 | 125.43 | 97.13 |
| diciembre-93 | 147.43 | 145.20 | 142.65 |
| enero-94 | 106.56 | 101.41 | 117.71 |
| febrero-94 | 187.79 | 163.11 | 166.31 |
| marzo-94 | 138.82 | 124.46 | 139.25 |
| abril-94 | 109.91 | 84.50 | 84.46 |
| mayo-94 | 31.94 | 32.11 | 45.03 |
| junio-94 | 11.39 | 11.90 | 16.78 |
| julio-94 | 10.84 | 14.76 | 23.55 |
| agosto-94 | 14.48 | 15.08 | 20.52 |
| septiembre-94 | 34.18 | 40.01 | 42.61 |
| octubre-94 | 62.72 | 59.37 | 71.26 |
| noviembre-94 | 85.66 | 91.40 | 81.21 |
| diciembre-94 | 154.37 | 145.18 | 150.55 |
| enero-95 | 104.21 | 118.36 | 114.44 |
| febrero-95 | 147.92 | 140.00 | 105.23 |
| marzo-95 | 120.80 | 122.67 | 154.41 |
| abril-95 | 63.89 | 56.30 | 48.22 |
| mayo-95 | 25.75 | 24.19 | 39.66 |
| junio-95 | 16.87 | 21.41 | 28.90 |
| julio-95 | 19.53 | 22.96 | 34.34 |
| agosto-95 | 18.35 | 20.61 | 33.39 |
| septiembre-95 | 39.45 | 46.70 | 54.53 |
| octubre-95 | 29.28 | 34.50 | 36.87 |
| noviembre-95 | 94.01 | 109.30 | 94.21 |
| diciembre-95 | 125.77 | 126.72 | 94.53 |
| enero-96 | 189.41 | 176.51 | 158.55 |
| febrero-96 | 145.18 | 158.57 | 108.85 |
| marzo-96 | 113.24 | 114.78 | 107.87 |
| abril-96 | 82.69 | 67.61 | 59.85 |
| mayo-96 | 35.51 | 35.87 | 47.74 |
| junio-96 | 13.58 | 15.50 | 23.38 |
| julio-96 | 8.74 | 12.34 | 23.58 |
| agosto-96 | 34.81 | 39.31 | 56.05 |
| septiembre-96 | 34.15 | 43.45 | 50.84 |
| octubre-96 | 56.85 | 60.34 | 52.83 |
| noviembre-96 | 77.17 | 86.88 | 81.97 |

| | | | |
|---------------|--------|--------|--------|
| diciembre-96 | 122.87 | 128.51 | 107.37 |
| enero-97 | 167.22 | 164.80 | 141.65 |
| febrero-97 | 179.87 | 172.74 | 153.65 |
| marzo-97 | 142.42 | 149.09 | 128.98 |
| abril-97 | 68.15 | 58.94 | 53.19 |
| mayo-97 | 30.59 | 29.99 | 37.19 |
| junio-97 | 0.00 | 6.45 | 22.08 |
| julio-97 | 4.59 | 15.38 | 23.30 |
| agosto-97 | 22.95 | 30.99 | 41.08 |
| septiembre-97 | 28.95 | 34.67 | 45.38 |
| octubre-97 | 48.27 | 57.75 | 56.81 |
| noviembre-97 | 123.67 | 135.70 | 111.93 |
| diciembre-97 | 132.96 | 116.97 | 91.34 |
| enero-98 | 182.83 | 156.63 | 113.76 |
| febrero-98 | 172.59 | 177.73 | 122.16 |
| marzo-98 | 125.44 | 129.16 | 82.21 |
| abril-98 | 60.87 | 48.16 | 46.42 |
| mayo-98 | 15.03 | 15.53 | 27.91 |
| junio-98 | 9.56 | 11.38 | 17.06 |
| julio-98 | 1.25 | 4.44 | 9.80 |
| agosto-98 | 14.20 | 21.14 | 40.13 |
| septiembre-98 | 21.66 | 29.30 | 44.94 |
| octubre-98 | 59.59 | 77.40 | 77.34 |
| noviembre-98 | 90.82 | 101.29 | 86.93 |
| diciembre-98 | 127.49 | 111.31 | 116.05 |
| enero-99 | 150.21 | 130.06 | 141.24 |
| febrero-99 | 143.90 | 146.66 | 128.95 |
| marzo-99 | 136.13 | 144.50 | 121.29 |
| abril-99 | 119.94 | 99.24 | 82.27 |
| mayo-99 | 31.04 | 34.31 | 41.25 |
| junio-99 | 11.27 | 12.55 | 23.65 |
| julio-99 | 14.69 | 17.24 | 29.55 |
| agosto-99 | 6.31 | 7.06 | 11.56 |
| septiembre-99 | 49.16 | 56.11 | 66.77 |
| octubre-99 | 41.31 | 46.75 | 46.14 |
| noviembre-99 | 55.35 | 63.87 | 62.07 |
| diciembre-99 | 163.58 | 168.15 | 139.42 |
| enero-00 | 129.63 | 119.10 | 174.62 |
| febrero-00 | 205.30 | 200.31 | 149.09 |
| marzo-00 | 128.74 | 137.46 | 119.29 |
| abril-00 | 58.47 | 39.82 | 35.88 |
| mayo-00 | 35.77 | 35.48 | 40.42 |
| junio-00 | 21.83 | 33.09 | 57.25 |
| julio-00 | 14.02 | 20.83 | 29.29 |
| agosto-00 | 28.09 | 29.08 | 36.76 |
| septiembre-00 | 23.92 | 33.35 | 50.69 |
| octubre-00 | 97.01 | 103.32 | 93.81 |
| noviembre-00 | 51.74 | 53.68 | 44.75 |
| diciembre-00 | 115.72 | 121.94 | 88.74 |
| enero-01 | 235.37 | 239.66 | 273.30 |

| | | | |
|---------------|--------|--------|--------|
| febrero-01 | 160.79 | 158.68 | 131.34 |
| marzo-01 | 178.88 | 178.77 | 149.66 |
| abril-01 | 80.40 | 69.78 | 61.40 |
| mayo-01 | 30.58 | 27.71 | 29.74 |
| junio-01 | 20.72 | 24.70 | 38.92 |
| julio-01 | 29.35 | 36.28 | 55.29 |
| agosto-01 | 27.72 | 32.03 | 45.69 |
| septiembre-01 | 25.87 | 33.97 | 50.95 |
| octubre-01 | 80.36 | 85.61 | 109.74 |
| noviembre-01 | 80.06 | 91.99 | 104.03 |
| diciembre-01 | 100.45 | 104.53 | 84.49 |
| enero-02 | 148.01 | 154.64 | 144.29 |
| febrero-02 | 230.90 | 215.45 | 175.94 |
| marzo-02 | 193.79 | 188.16 | 153.77 |
| abril-02 | 75.92 | 67.93 | 68.48 |
| mayo-02 | 32.70 | 37.78 | 44.61 |
| junio-02 | 19.81 | 25.49 | 47.98 |
| julio-02 | 49.64 | 53.70 | 71.31 |
| agosto-02 | 15.85 | 17.51 | 21.11 |
| septiembre-02 | 39.31 | 41.38 | 44.00 |
| octubre-02 | 82.72 | 92.98 | 94.38 |
| noviembre-02 | 103.39 | 110.25 | 105.84 |
| diciembre-02 | 130.28 | 130.37 | 148.47 |
| enero-03 | 179.71 | 182.62 | 189.12 |
| febrero-03 | 197.84 | 193.46 | 171.35 |
| marzo-03 | 165.42 | 169.20 | 157.94 |
| abril-03 | 65.74 | 59.59 | 47.48 |
| mayo-03 | 29.51 | 30.00 | 39.63 |
| junio-03 | 19.84 | 22.76 | 34.47 |
| julio-03 | 4.71 | 6.24 | 10.67 |
| agosto-03 | 29.00 | 31.49 | 51.02 |
| septiembre-03 | 22.02 | 25.38 | 36.25 |
| octubre-03 | 39.89 | 47.21 | 56.26 |
| noviembre-03 | 50.17 | 61.80 | 49.96 |
| diciembre-03 | 161.64 | 160.36 | 171.77 |
| enero-04 | 193.45 | 186.06 | 201.41 |
| febrero-04 | 176.42 | 173.15 | 142.49 |
| marzo-04 | 90.72 | 95.82 | 98.14 |
| abril-04 | 72.11 | 61.77 | 51.96 |
| mayo-04 | 31.73 | 31.91 | 39.71 |
| junio-04 | 18.69 | 25.41 | 32.67 |
| julio-04 | 33.73 | 39.80 | 62.89 |
| agosto-04 | 41.33 | 46.16 | 59.86 |
| septiembre-04 | 53.54 | 64.45 | 70.47 |
| octubre-04 | 56.70 | 63.65 | 73.84 |
| noviembre-04 | 79.65 | 86.51 | 70.48 |
| diciembre-04 | 158.04 | 151.63 | 128.29 |
| enero-05 | 114.57 | 102.39 | 121.95 |
| febrero-05 | 151.08 | 157.62 | 133.81 |
| marzo-05 | 127.79 | 128.93 | 108.35 |

| | | | |
|---------------|--------|--------|--------|
| abril-05 | 74.97 | 64.41 | 61.64 |
| mayo-05 | 24.68 | 34.97 | 50.91 |
| junio-05 | 21.87 | 26.51 | 40.23 |
| julio-05 | 11.01 | 14.04 | 22.09 |
| agosto-05 | 22.79 | 27.22 | 40.08 |
| septiembre-05 | 7.21 | 12.94 | 21.94 |
| octubre-05 | 64.66 | 77.21 | 83.28 |
| noviembre-05 | 83.29 | 95.19 | 88.39 |
| diciembre-05 | 112.87 | 104.80 | 92.62 |
| enero-06 | 199.02 | 199.09 | 228.12 |
| febrero-06 | 174.12 | 155.84 | 97.63 |
| marzo-06 | 124.04 | 127.61 | 137.61 |
| abril-06 | 111.33 | 94.25 | 71.83 |
| mayo-06 | 4.44 | 8.20 | 16.17 |
| junio-06 | 31.69 | 38.74 | 68.11 |
| julio-06 | 0.86 | 14.28 | 27.80 |
| agosto-06 | 22.80 | 24.49 | 36.63 |
| septiembre-06 | 11.13 | 19.16 | 22.18 |
| octubre-06 | 69.95 | 79.40 | 82.08 |
| noviembre-06 | 104.60 | 112.94 | 103.88 |
| diciembre-06 | 134.07 | 144.69 | 120.87 |
| enero-07 | 177.78 | 173.15 | 198.09 |
| febrero-07 | 159.46 | 153.98 | 76.55 |
| marzo-07 | 173.99 | 170.20 | 152.61 |
| abril-07 | 104.37 | 90.29 | 76.26 |
| mayo-07 | 29.10 | 28.25 | 38.39 |
| junio-07 | 16.04 | 16.68 | 22.79 |
| julio-07 | 9.17 | 29.05 | 52.55 |
| agosto-07 | 7.32 | 6.79 | 9.13 |
| septiembre-07 | 16.35 | 20.99 | 20.66 |
| octubre-07 | 50.51 | 57.56 | 63.82 |
| noviembre-07 | 81.52 | 104.84 | 85.58 |
| diciembre-07 | 102.68 | 106.36 | 99.03 |
| enero-08 | 148.20 | 142.15 | 161.91 |
| febrero-08 | 156.15 | 146.68 | 108.22 |
| marzo-08 | 110.29 | 123.27 | 81.86 |
| abril-08 | 43.67 | 28.32 | 16.59 |
| mayo-08 | 31.73 | 29.75 | 40.30 |
| junio-08 | 29.46 | 35.66 | 59.34 |
| julio-08 | 15.31 | 21.73 | 35.02 |
| agosto-08 | 10.79 | 18.66 | 29.75 |
| septiembre-08 | 30.19 | 39.27 | 44.07 |
| octubre-08 | 69.50 | 81.39 | 93.46 |
| noviembre-08 | 80.13 | 86.96 | 89.98 |
| diciembre-08 | 151.05 | 155.28 | 154.99 |
| enero-09 | 147.03 | 131.62 | 130.44 |
| febrero-09 | 143.56 | 142.43 | 104.27 |
| marzo-09 | 104.35 | 113.07 | 107.95 |
| abril-09 | 91.58 | 72.05 | 59.36 |
| mayo-09 | 27.95 | 28.38 | 40.86 |

| | | | |
|---------------|--------|--------|--------|
| junio-09 | 18.24 | 18.21 | 27.72 |
| julio-09 | 19.30 | 25.35 | 38.44 |
| agosto-09 | 32.81 | 37.34 | 60.02 |
| septiembre-09 | 28.20 | 41.67 | 51.18 |
| octubre-09 | 35.58 | 44.21 | 44.97 |
| noviembre-09 | 189.03 | 197.69 | 188.37 |
| diciembre-09 | 120.44 | 118.14 | 115.73 |
| enero-10 | 247.16 | 245.75 | 269.03 |
| febrero-10 | 135.45 | 135.33 | 118.36 |
| marzo-10 | 127.28 | 131.59 | 152.70 |
| abril-10 | 69.68 | 62.71 | 55.96 |
| mayo-10 | 34.81 | 39.66 | 55.18 |
| junio-10 | 10.67 | 9.96 | 13.77 |
| julio-10 | 16.23 | 20.15 | 37.08 |
| agosto-10 | 10.53 | 16.79 | 22.53 |
| septiembre-10 | 15.20 | 24.23 | 43.49 |
| octubre-10 | 59.75 | 70.54 | 100.96 |
| noviembre-10 | 53.14 | 71.41 | 77.47 |
| diciembre-10 | 159.31 | 152.94 | 162.34 |
| enero-11 | 137.37 | 138.90 | 159.74 |
| febrero-11 | 186.19 | 190.20 | 178.90 |
| marzo-11 | 166.25 | 162.57 | 142.24 |
| abril-11 | 91.93 | 88.62 | 76.06 |
| mayo-11 | 25.05 | 19.98 | 33.37 |
| junio-11 | 25.39 | 25.81 | 41.40 |
| julio-11 | 27.55 | 39.17 | 62.38 |
| agosto-11 | 4.10 | 14.96 | 31.24 |
| septiembre-11 | 47.01 | 50.62 | 59.54 |
| octubre-11 | 52.50 | 60.73 | 81.32 |
| noviembre-11 | 57.76 | 65.03 | 68.89 |
| diciembre-11 | 144.58 | 144.55 | 132.07 |
| enero-12 | 158.24 | 150.83 | 126.77 |
| febrero-12 | 223.56 | 206.14 | 156.55 |
| marzo-12 | 122.77 | 118.42 | 70.06 |
| abril-12 | 78.83 | 63.24 | 42.61 |
| mayo-12 | 22.98 | 18.86 | 29.37 |
| junio-12 | 14.52 | 23.86 | 42.81 |
| julio-12 | 19.41 | 23.47 | 36.48 |
| agosto-12 | 3.55 | 8.43 | 13.87 |
| septiembre-12 | 25.59 | 36.15 | 44.43 |
| octubre-12 | 44.51 | 52.53 | 58.80 |
| noviembre-12 | 106.80 | 104.98 | 124.19 |
| diciembre-12 | 220.55 | 217.52 | 216.18 |
| enero-13 | 152.30 | 149.11 | 172.02 |
| febrero-13 | 184.66 | 175.86 | 151.55 |
| marzo-13 | 122.45 | 113.22 | 138.91 |
| abril-13 | 58.17 | 46.21 | 42.95 |
| mayo-13 | 37.08 | 40.15 | 56.15 |
| junio-13 | 29.84 | 32.49 | 42.56 |
| julio-13 | 14.94 | 18.07 | 22.98 |

| | | | |
|---------------|--------|--------|--------|
| agosto-13 | 31.66 | 32.81 | 41.30 |
| septiembre-13 | 30.96 | 43.82 | 49.43 |
| octubre-13 | 95.59 | 104.94 | 116.82 |
| noviembre-13 | 100.53 | 104.08 | 102.16 |
| diciembre-13 | 185.43 | 175.90 | 195.10 |
| enero-14 | 181.77 | 163.89 | 256.77 |
| febrero-14 | 210.13 | 180.09 | 169.58 |
| marzo-14 | 106.13 | 95.40 | 122.21 |
| abril-14 | 95.38 | 77.43 | 62.62 |
| mayo-14 | 36.96 | 41.53 | 60.43 |
| junio-14 | 16.98 | 19.19 | 25.11 |
| julio-14 | 23.82 | 28.05 | 38.01 |
| agosto-14 | 23.34 | 29.55 | 35.06 |
| septiembre-14 | 31.92 | 44.47 | 50.86 |
| octubre-14 | 67.70 | 76.74 | 74.12 |
| noviembre-14 | 66.20 | 77.70 | 69.07 |
| diciembre-14 | 154.21 | 143.85 | 159.75 |

