

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA INGENIERÍA AGRONÓMICA



TESIS DE GRADO

ESTIMACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS Y SEDIMENTOS EN LA
CUENCA DEL RÍO PORVENIR, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL
MODELO SWAT (SOIL WATER ASSESSMENT TOOL)

Roger Reynaldo Chipana Vasquez

LA PAZ – BOLIVIA

2012

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA INGENIERÍA AGRONÓMICA

ESTIMACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS Y SEDIMENTOS EN LA
CUENCA DEL RÍO PORVENIR, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL
MODELO SWAT (SOIL WATER ASSESSMENT TOOL)

Tesis de Grado Presentado como requisito
parcial para optar el Título de
Ingeniero Agrónomo

Roger Reynaldo Chipana Vasquez

Asesores:

Ing. Ph. D. René Nene Chipana Rivera

Ing. M.Sc. Germán Mario Copa Mamani

Tribunal examinador:

Ing. Paulino Ruiz Huanca

Ing. Rolando Céspedes Paredes

Ing. Fredy Navia

Aprobada

Presidente Tribunal Examinador

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a todas las personas que
pensaron que no lo lograría

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por mandarme a que tenga valor y firmeza como también a mi familia por todo el apoyo incondicional que me dan y como no agradecer a mi amada Romina Aguilar A. Quien a pesar de mis flaquezas me dice “no tengas miedo ni te desanimes porque yo estaré contigo donde quiera que vayas”

Al Proyecto FONTAGRO por otorgarme la beca, que hizo posible realizar mi tesis, en especial al Ing. Ph. D. René N. Chipana Rivera, por darme la oportunidad y confiar en mí persona.

Agradezco al Ing. Rolando Céspedes Paredes, por apoyarme en el trayecto de la realización de mi tesis, por su sabiduría y consejos.

Agradezco al Ing. Milton Macías, Ing. Ángela Palacios, Ing. Adrian Ramos, Ing. Carlos Mena, Ing. Germán Copa, Ing. Paulino Ruiz, Ing Fredi Navi, por todo el apoyo y paciencia que tuvieron con mi persona.

Agradezco a mis amigos Igor Choque C., Lucio Vilca C., Willy Mamani, por ayudarme en momentos más arduos de mi tesis.

Agradecer a los secretarios generales de las comunidades de Malla, Bambarrillo, El Porvenir y Chirimaya, como también a los comunarios de las mismas comunidades por guiarme y ayudarme en las tomas de muestra de suelos.

Agradecer al Servicio de Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y a Servicio Geológico Tecnológico y Minería (SERGEOTECMIN) por la entrega de información.

A todos mil gracias.

Roger R. Chipana Vasquez

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Hipótesis.	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	3
2.1. Modelo hidrológico.....	3
2.2. Tipos de modelos hidrológicos.	3
2.2.1. Por su alcance temporal... ..	3
2.2.1.1. De evento.	3
2.2.1.2. Continuos.	3
2.2.2. Por su forma de calcular procesos.	4
2.2.2.1. Empíricos.	4
2.2.2.2. Mecánicos.	4
2.2.3. Por el tipo de solución.	4
2.2.3.1. Determinísticos.	4
2.2.3.2. Estocásticos.	4
2.3. Modelo digital de terreno (MDT).	4
2.4. Sistema de información geográfica (SIG).	5
2.5. Soil water assessment tool (SWAT).	5
2.6. Unidades de Respuesta Hidrológica (URH).	11
2.7. Medición de caudales.	13
2.8. Sedimentos.....	13
2.9. Cuenca hidrográfica.	15
2.10. Balance hídrico.....	16
2.11. Grupo hidrológico.	17
2.12. Número de curva.	19
3. LOCALIZACIÓN.	21
3.1. Caracterización de la zona de estudio.	21
3.2. Manejo espacial.	22
3.2.1. Zona altiplánica.	22
3.2.2. Zona del valle.	22

3.3. Aspectos físico – naturales.	22
3.3.1 Fisiográfica.	22
3.3.2. Topografía.	23
3.3.3. Geología.	23
3.4. Zonas y grados de erosión.	23
3.4.1. Serranías altas, escarpadas con erosión muy fuerte.	24
3.4.2. Serranías de altitud media y poco disectadas con erosión muy fuerte.....	24
3.4.3. Llanura pie de monte, con erosión moderada.	24
3.5. Características del ecosistema.	24
3.5.1. Clima.	24
3.6. Riesgos climáticos.	25
3.6.1. Heladas.	25
3.6.2. Mazamorra.	26
3.7. Agua.	26
4. MATERIALES Y MÉTODOS.	30
4.1. Materiales.	30
4.1.1. Materiales de laboratorio.	30
4.1.2. Material químico.	30
4.1.3. Material biológico.	30
4.1.4. Material de campo y equipo.	30
4.1.5. Material de gabinete.	31
4.1.6. Material de programas.	31
4.2. Métodos.	32
4.2.1. Procedimiento del modelo SWAT.....	32
4.2.1.1. Modelo digital de elevación (DEM).	33
4.2.2. Tipo de suelo (LandUse).	34
4.2.3. Ponderación inversa de la distancia (Inverse Distance Weighting).....	35
4.2.4. Uso de suelo.	35
4.2.5. Información climática.	36
4.2.5.1. Temperaturas máximas y mínimas.	36
4.2.5.2. Precipitaciones Pluviales.	37

4.2.5.3. Humedad relativa.	38
4.2.6. wgnMAKER4.1.	38
4.2.7. Caudales observados.	38
4.2.8. Sedimentos observados.	39
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	41
5.1. Resultados y pasos para obtener los datos que requiere el modelo SWAT.....	41
5.1.1. Resultados de la campaña de muestreo de suelos con barreno.	41
5.1.1.2. Resultados del análisis en laboratorio.	42
5.1.1.3. Descripción y resultados del lugar según el grupo hidrológico.	43
5.1.1.4. Determinación del número de curva.	43
5.1.1.5. Resultados del manejo del programa SPAW.....	45
5.1.1.6. Resultado y pasos para la elaboración del mapa de tipo de suelo.	46
5.1.1.7. Mapa geológico.	47
5.2. Resultados de la generación del mapa de uso de suelos.	50
5.2.1. Elaboración de la imagen en alta resolución.	52
5.2.2. Elaboración del mapa de uso de suelos.	52
5.3. Procesamiento de la información climática.....	53
5.3.1. Datos de precipitación.	57
5.3.2. Relleno de series diarias.	58
5.4. Características de las subcuencas.	59
5.5. Estudio de pendientes.	61
5.6. Caudales simulados vs observados.	62
5.7. Calibración y validación del modelo.	64
5.7.1. Calibración.	64
5.7.2. Validación.	67
5.8. Sedimentos simulados vs observados.	70
6. CONCLUSIONES.....	73
7. SUGERENCIAS.	75
8. BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXO.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Págs.
Ciclo hidrológico en una cuenca.....	8
Ubicación de la cuenca del rio Porvenir.....	21
SRTM V4.1 de 90 m.....	34
Ubicación de los puntos de aforo y toma de sedimentos en el rio principal usando el método de la continuidad.....	40
Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de suelos con barreno a una profundidad de 30cm	42
Mapa de tipo de suelos con codificación textural.....	47
Mapa geológico editado en formato shapefile	50
Mapa de uso de suelos generado de un mapa de alta resolución.....	53
Mapa de ubicación de las cuatro estaciones meteorológicas en la cuenca del rio Porvenir	57
Mapa de sub cuencas generadas por el modelo SWAT la cual presenta once sub cuencas	60
Mapa de pendientes generadas por el modelo SWAT.....	62

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema	Pág.
Movimiento del agua simulada por SWAT 2000 con las unidades de respuesta hidrológica	12
Distintos métodos y estructuras para la medición del caudal.....	13
Movimiento de los sedimentos de fondo y en suspensión dentro del río.....	15
Metodología en la aplicación del modelo SWAT.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Interpretación de los códigos climáticos de la cuenca del río Porvenir.....	25
Análisis físico químico del agua - Porvenir del departamento de La Paz.....	27
Análisis físico químico de agua – Azambo perteneciente al departamento de La Pa.....	28
Análisis físico químico de agua – Malla perteneciente al departamento de La Paz.....	29
Caudales mensuales observados.....	39
Sedimentos mensuales observados en la parte baja de la cuenca del río Porvenir.....	39
Resultados del análisis granulométrico obtenidos con el método de Bouyoucus.....	43
Model description and User Guide for the BASIC versión II.....	44
Resultados del número de curva.....	44
Resultados de programa SPAW.	45
Descripción estratificada del mapa geológico.....	48
Reclasificación de los usos del suelo según la tipología usada por SWAT.....	51
Características de las cinco estaciones en distancia, elevación y provincia con relación a la cuenca del río Porvenir.....	55
Característica al ingresar al modelo SWAT.....	56
Detalle de áreas, elevaciones máximas, mínimas y promedio en las once sub cuencas generadas por el modelo SWAT.....	60
Detalles de las pendientes en la cuenca del río Porvenir, generadas por el modelo SWAT.....	61
Escorrentía simulada por el modelo SWAT.....	64
Parámetros para la calibración en el modelo SWAT.....	66
Datos calibrados de escorrentía simulada por el modelo SWAT.....	70
Sedimentos observadas y simuladas.....	72

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	Pág.
Análisis de temperaturas máximas y mínimas en la cuenca del río Porvenir.....	37
Análisis de precipitaciones en la cuenca del Río Porvenir.....	37
Análisis de humedad relativa en la cuenca del río Porvenir.....	38
Cinco estaciones con datos de precipitaciones anuales de 1967 a 2011.....	53
Distancias de las estaciones con relación a la cuenca del río Porvenir.....	55
Precipitación anual de la estación de Luribay con datos de 1989 a 2011.....	58
Comparación de caudales simulados por el modelo SWAT con los caudales observados en campo.	63
Coeficiente de determinación con datos de los caudales observados vs los simulados en la primera corrida del modelo SWAT.....	63
Caudal calibrado por el modelo SWAT.....	69
Coeficiente de determinación calibrado.....	69
Sedimentos simulados por el modelo SWAT.....	71
Coeficiente de determinación.....	71

Citar esta tesis como sigue:

Chipana, R. 2012. Estimación de los escurrimientos y sedimentos en la cuenca del río Porvenir, mediante la aplicación del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool). Tesis Ing. Agr. UMSA, La Paz, Bolivia. 92 p.

RESUMEN

El Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO), realiza actividades con proyectos que se enmarcan en establecer modelos de simulación de oferta y demanda de agua, frente a diferentes escenarios climáticos para contribuir a la generación de políticas de desarrollo, fomento de riego por parte de los organismos públicos y privados, conjuntamente con la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés. El objetivo de este proyecto fue “Estimar los escurrimientos y sedimentos en la cuenca del río Porvenir, mediante la aplicación del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool)”. El área de trabajo presenta una información mínima el cual se optó por generar la información interna del modelo SWAT, con programas anexas como ser: SPAW, WGNmaker, tablas para la determinación del grupo hidrológico, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las interfaces de modelos SIG ayuda eficientemente a la creación de archivos de datos de entrada requeridos por el modelo como también es en la creación en coberturas de: suelos, tipo de suelo y aparte de todo ello se realizaron aforaciones con fin de obtener datos de caudales del lugar. La simulación de 8 series en escurrimientos con el modelo SWAT en la cuenca del río Porvenir nos muestra que en los meses de enero a marzo del año 2011 hay mayor presencia de escurrimiento con un promedio de 0.25 mm como también en los meses de setiembre a diciembre del año 2010 hay menor escurrimiento en un promedio de 0.022 mm y en promedio total de las 8 series simuladas se tiene un 0.12 mm en escurrimiento, en cambio la simulación de los sedimentos se tiene que en los meses de septiembre a noviembre del años 2010 aporta con 0 Tn/ha, mientras que en el meses de diciembre del 2010 hasta los meses de enero a marzo del 2011 presentan un promedio de 0.35 Tn/ha y en promedio total de las 8 series simuladas de sedimentos se tiene un 0.18 Tn/ha. SWAT tuvo mejor predicción de escurrimiento y sedimentos durante la calibración. Para la evaluación de la bondad

hidrológico de ajuste del modelo se cambió los escurrimientos simulados a caudales simulados y estas se compararon con las caudales observados en el sitio de estudio, utilizando dos criterios estadísticos (el coeficiente de determinación r^2 y la eficiencia del modelo o el coeficiente de Nash-Sutcliffe r^2_{ns}), dio resultados razonables: 0,59 y 0,96, mientras que en los sedimentos se tuvieron 0,95 y 0,98 respectivamente, estos datos muestran que el modelo es aceptable. El modelado de la cuenca es una tarea que consume tiempo, y más aún debido a la escasez de datos. Sin embargo, el modelo es muy atractivo para su aplicación, teniendo en cuenta que con los resultados obtenidos con la aplicación del modelo SWAT en la cuenca del río Porvenir son importantes pues los cuales son de mucha importancia en un proyecto hidrológico como también en proyectos de riego, los sedimentos que se producen pueden afectar a la vida útil de presas futuras a aplicar en la cuenca, como también permite generar escenarios en los que se simulen situaciones planteadas por el usuario, con la finalidad de comparar la situación real con posibles cambios climáticos que afectarían al futuro en la producción de agua en la cuenca del río Porvenir. Estos datos deben ser interpretados correctamente de manera que los tomadores de decisiones puedan planificar de mejor manera en base a la información que se les proporciona.

Palabras claves: SWAT, escurrimiento, sedimento, unidades de respuesta hidrológicas, cuenca.

1. INTRODUCCIÓN.

La situación es crítica en los valles interandinos de Bolivia, debido a la disminución progresiva de agua proveniente de las cordilleras, esta situación crea limitaciones en la disponibilidad de este recurso para el riego, lo que provoca una baja producción de alimentos tales como los tubérculos andinos, hortalizas y especies frutales consecuentemente afectando la seguridad alimentaria de los pobladores rurales.

El Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO), realiza actividades con proyectos que se enmarcan en establecer modelos de simulación de oferta y demanda de agua, frente a diferentes escenarios climáticos para contribuir a la generación de políticas de desarrollo, fomento de riego por parte de los organismos públicos y privados, conjuntamente con la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés.

Un modelo matemático para simulación de parámetros hidráulicos e hidrológicos se usó para representar sistemas reales (complejos) en un tiempo determinado como también el sistema hidrológico con la finalidad de proveer información, en el manejo sostenible de recursos hídricos e incrementar el bienestar humano y proteger el medio ambiente.

El modelo SWAT fue aplicado en Bolivia, con anterioridad para estudiar y determinar la producción líquida y sólida de cuencas con poca información, obteniéndose resultados aceptables y confirman la aplicabilidad del modelo en nuestro país. Se realizó la aplicación del modelo SWAT 2000 para la determinación de caudales mensuales en la cuenca Taquiña (Parra y Montenegro, 2007).

El alcance del proyecto FONTAGRO, fue contribuir a la generación de políticas de desarrollo y fomento al riego a nivel regional, donde se sistematizó la información generada en la cuenca del río Porvenir, en el que se empleó el modelo matemático SWAT para determinar la entrada, salida y el almacenamiento de agua. Además, se coadyuvó con el sistema de información geográfica (SIG).

1.1. Objetivos.

Objetivo general.

Estimar los escurrimientos y sedimentos en la cuenca del río Porvenir, mediante la aplicación del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool).

Objetivos específicos.

Determinar la esorrentía en la cuenca del río Porvenir.

Cuantificar la cantidad de sedimentos en la cuenca del río Porvenir.

Analizar la sensibilidad del modelo SWAT en base al r^2 (coeficiente de determinación) y el r^2_{ns} (Coeficiente de Nash Sutcliffe).

1.2. Hipótesis.

El SWAT es eficaz para determinar el escurrimiento y la sedimentación en la cuenca del río Porvenir.

El SWAT no es eficaz para determinar el escurrimiento y la sedimentación en la cuenca del río Porvenir.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. Modelo hidrológico.

El objetivo de un modelo hidrológico es determinar con eficiencia y precisión los componentes del ciclo hidrológico de una cuenca y estimar eficientemente el comportamiento y la magnitud (abundancia y carencia) del agua en los fenómenos de frecuencia rara. La consideración y el uso de los modelos hidrológicos es primordial para apreciar, simular, predecir los daños causados por las inundaciones, resolver problemas prácticos de inventarios, planear, diseñar, manejar (administrar) y para la toma de decisiones de los recursos hidráulicos en una cuenca, región o país (Chavarri, 2008).

2.2. Tipos de modelos hidrológicos.

Desde tiempos pasados hasta la actualidad se han creado modelos hidrológicos de los cuales se han clasificado de acuerdo al uso entre estas se presenta: por su alcance temporal, por su forma de calcular procesos y por el tipo de solución.

2.2.1. Por su alcance temporal.

2.2.1.1. De evento.

Se emplea para la simulación de una fase del ciclo hidrológico, este fenómeno estudiado es de menor duración y se utiliza para obras hidráulicas, diseño de puentes, diques, alcantarillas, lagunas de detención, terrazas, etc. Su importancia es para la prevención de los efectos naturales (Proaño y Unda, 1995).

2.2.1.2. Continuos.

Se utiliza para la comprensión de los fenómenos hidrológicos de la cuenca, análisis de consistencia de la información, extensión de series, pronóstico de caudales, diseño hidrológico, planificación y evaluación de los efectos de modificación del uso de suelo, por ejemplo SWAT (Failache, 2010).

2.2.2. Por su forma de calcular procesos.

2.2.2.1. Empíricos.

Se utilizan para las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado como las curvas provenientes de datos empíricos, recolectados en numerosos ensayos, es el caso del Número de Curva (CN) y el Método Racional Hidrología “lo que no escurre, infiltra”.

El uso se extendió a muchos modelos hidrológicos debido a la economía de “Inputs” para el cálculo de la infiltración y el escurrimiento un ejemplo es el HEC 1; TR 55; SWAT balance de aguas modelos DSSAT (Vasquez, 2010).

2.2.2.2. Mecánicos.

Calculan el balance hídrico mediante ecuaciones de infiltración de Richard, Green and Ampt. Requieren datos subdiarios de precipitación, temperaturas máximas y mínimas; parámetros de suelo (textura, punto de marchites permanente, capacidad de campo, saturación, etc.). Son las más complejas y requieren más información, no siempre son precisos (Ponce, 1989).

2.2.3. Por el tipo de solución.

2.2.3.1. Determinísticos.

Un modelo determinístico no considera aleatoriedad, los datos de entrada produce siempre una misma salida, los resultados obtenidos son para una determinada combinación de variables. (Chow, 2000).

2.2.3.2. Estocásticos.

Presentan salidas parcialmente aleatorias, estos modelos hacen predicciones a pesar de que todos los fenómenos hidrológicos implican algún grado de aleatoriedad, la variabilidad resultante en la salida puede ser pequeña cuando se le compara con la variabilidad resultante de otros factores conocidos. Estos modelos siempre tienen salidas que son variables en el tiempo (Maidment *et al.*, 1994).

2.3. Modelo digital de terreno (MDT).

Un Modelo Digital de Terreno, es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, como puede ser la temperatura, altitud o la presión atmosférica (MMAyA, 2010).

2.4. Sistema de información geográfica (SIG).

El Sistemas de Información Geográfica (SIG), son sistemas de computación espacialmente diseñados para el ingreso, manejo, análisis, modelado y presentación de datos, objetos o fenómenos reales o supuestos, que sucedieron, suceden o podrían suceder en un momento y lugar determinado (Tomlinson, citado por Gallo, 2008).

Según ZONISIG¹(2001), el SIG es una herramienta flexible, barata y rápida para combinar datos georeferenciado con otros productos para crear alternativas de decisión. En síntesis, se puede afirmar que los SIG, son solamente herramientas de trabajo. La efectividad de la herramienta dependerá de la habilidad con la que sea utilizada y la calidad de información obtenida.

2.5. Soil water assessment tool (SWAT).

Es un modelo de tiempo continuo que está diseñado para predecir el impacto de la gestión del agua, sedimentos y químicos en la producción agrícola sin datos de aforo en las cuencas hidrográficas. El modelo está basado físicamente, computacionalmente, eficientemente y capaz de simular largos periodos de tiempo continuo. Sus principales componentes del modelo incluyen el clima, hidrología, suelos, temperatura, crecimiento de las plantas, nutrientes, pesticidas y manejo de la tierra. El SWAT, divide una cuenca en varias sub cuencas, que luego se subdividen en unidades respuesta hidrológica (HRUs).

¹ Los gobiernos de Bolivia y de Holanda, acordaron la ejecución del Proyecto "Zonificación Agroecológica y Establecimiento de una Base de Datos y Red de Sistema de Información Geográfica en Bolivia" (ZONISIG).

Las HRUs representan áreas similares de suelo, tipo de suelo y pendiente, por lo tanto la simulación de datos como balance hidrológico, HRU son generados por el SWAT con datos climáticos de precipitación, temperatura máxima y mínima, datos de radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento que pueden ser ingresados a partir de registros medidos y/o generados.

La humedad relativa es necesario para el modelo de Penman-Monteith (Monteith, 1965) o Priestly - Taylor (Priestly y Taylor, 1972), la evapotranspiración (ET) es sólo necesario si el método de Penman-Monteith se utiliza en casos de crear los escenarios de cambio climático que cuenta para cambiar los niveles atmosféricos de CO₂.

La temperatura media del aire se utiliza para determinar las simulaciones de precipitación y la caída de nevada. Los datos de temperatura máxima y mínima se utilizan para el cálculo de temperaturas diarias y evaporación del agua. Los insumos para la simulación a largos periodos de tiempo se calculan a partir de tablas con contenidos de variables climáticas, que se derivan de los registros del clima a largo plazo. Además, las variables de datos climáticos dan como resultados:(1) simulación de hasta 10 años de generación para la precipitación orográfica y/o para los cálculos de fusión de nieve, (2) ajustes a los insumos del clima para simular el cambio climático y (3) predicción de los patrones del clima futuro, que es una característica nueva en SWAT 2009.

La simulación de agua para riego en las tierras de cultivo se puede realizar a partir de cinco fuentes que son el tramo de río, embalse, acuífero superficial, acuífero profundo y un cuerpo de agua externa a la cuenca de origen. Las aplicaciones de riego pueden ser simulados para fechas específicas o con una rutina de autoirrigación, que desencadena los eventos de riego de acuerdo a la tensión umbral del agua. La transferencia de agua también puede ser simulada entre diferentes masas de agua, al igual que el "uso consuntivo del agua" que se considera una pérdida del agua en una cuenca y se estiman con el modelo SWAT para los sedimentos, nitrógeno, fósforo, plaguicidas y bacterias. La producción de sedimentos se calcula con la Ecuación Universal de Pérdida Suelo Modificado (MUSLE) desarrollado por (Williams y Berndt, 1977).

La transformación y el movimiento de nitrógeno (N) y fósforo (P) se simulan en el modelo SWAT en función de los ciclos de nutrientes inorgánico formado por varios ciclos orgánicos. Las pérdidas de N y P del sistema suelo en SWAT se producen por la absorción del cultivo y la escorrentía superficial, tanto en la fase de solución y en el sedimento erosionado. Las simulaciones de las pérdidas de N también pueden ocurrir en percolación por debajo de la zona de la raíz en un flujo subterráneo lateral incluido el subsuelo de desagües y por volatilización a la atmósfera.

Las contribuciones de fuentes puntuales y áreas urbanas también cuenta en los flujos totales y pérdidas de contaminantes exportados de cada subcuenca. El transporte de sedimentos se simula en función de la velocidad del pico en el canal, es más simplificado el enfoque relativo a la metodología utilizada en las versiones anteriores del SWAT, la simulación de erosión corresponde con un factor de erosionabilidad del canal, el recorrido de los metales pesados puede ser simulado.

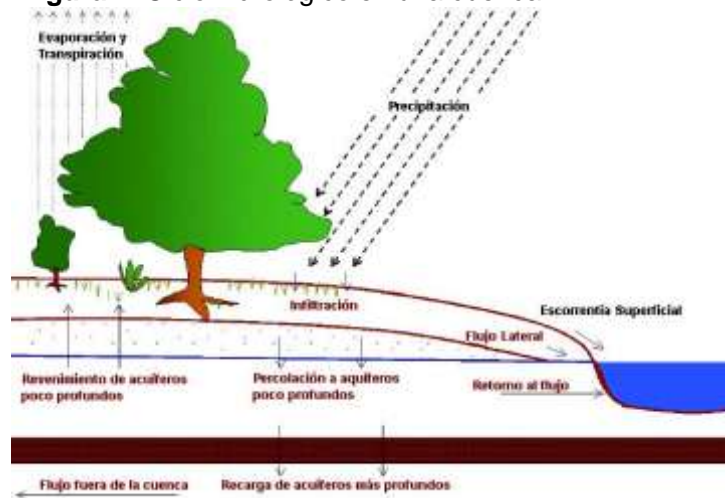
Una nueva característica en SWAT 2009, es la sensibilidad automática, calibración y análisis de incertidumbre, componente que se basa en enfoques descritos por (Van Griensven y Meixner, 2006), estos usos se pueden implementar para cualquier subconjunto de parámetros de entrada en SWAT.

Otra característica atractiva del SWAT es la facilidad del interfaz SIG, es la capacidad de modificar fácilmente los parámetros de entrada como la cubierta vegetal, la distribución del suelo y datos climáticos. Los componentes de la subcuenca del modelo pueden ser agrupados en ocho grandes divisiones, los plaguicidas hidrología, el clima, la sedimentación, la temperatura del suelo, el crecimiento del cultivo, los nutrientes y la gestión agrícola (Neitsch *et al.*, 2002). La fuente de datos y parámetros de selección que tiene el SWAT son los cultivos y suelos que son datos de los EEUU.

El modelo SWAT, tiene su base en el concepto del balance hídrico que permite determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en una cuenca hidrográfica. El movimiento del agua se ilustra en la figura 1, a través de la precipitación, el agua entra en la cuenca, al llegar al suelo forma los flujos de infiltración y escorrentía. La escorrentía es el agua que fluye más rápido hasta los drenajes de la cuenca, mientras que la

infiltración es la vía por la cual se recargan los acuíferos, aunque también existen flujos subterráneos que son más lentos y descargan en los canales de drenaje (Gavilanes, 2004).

Figura 1. Ciclo hidrológico en una cuenca.



Fuente. Arnold, *et al* (2000).

La simulación de la hidrología de una cuenca con la utilización del modelo SWAT puede ser separada en dos divisiones principales: fase terrestre del ciclo hidrológico y la fase de tránsito o líquida.

a) Fase terrestre.

Controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas descargados en el cauce principal en cada subcuenca. El modelo simula el ciclo hidrológico según la ecuación del balance hídrico (Torre *et al.*, 2003).

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \text{ (Ecuación 1).}$$

Dónde:

SWt = Es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O)

SWo = Es el contenido inicial de agua y suelo en el día *i* (mm H₂O)

T	= Es el tiempo (días)
R _{day}	= Es la cantidad de precipitación en un día <i>i</i> (mm H ₂ O)
Q _{surf}	= Es la cantidad de escorrentía superficial en un día <i>i</i> (mm H ₂ O)
E _a	= Es la cantidad de evapotranspiración en un día <i>i</i> (mm H ₂ O)
W _{seep}	= Es la cantidad de agua que percola a través de la zona vadosa o zona en capacidad de campo en un perfil de suelo hacia el acuífero somero en un día <i>i</i> (mm H ₂ O)
Q _{gw}	= Es la cantidad de flujo de retorno en un día <i>i</i> (mm H ₂ O).

La asignación de subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en evapotranspiración para varios cultivos y suelos. La escorrentía se estima separadamente para cada HRU y se transita para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto incrementa la precisión y da una mejor descripción física del balance de agua (Neitsch *et al.*, 2000).

En el concepto ya tradicional de la escorrentía se inicia cuando la intensidad de la precipitación excede a la capacidad de infiltración del terreno. Bajo este enfoque, se puede considerar la escorrentía superficial como una lámina de agua extendida sobre el terreno que va almacenándose sobre el micro topografía propia del relieve de este, hasta un nivel en que las depresiones se llenan agotando su capacidad de almacenamiento.

Escorrentía: Ello da origen al desplazamiento del agua hasta los cauces cuya velocidad de movimiento dependerá de la rugosidad de la superficie del terreno y la pendiente de las laderas. Diversos autores explican la escorrentía superficial en la capacidad de infiltración del suelo a partir de la teoría de Darcy “En 1856, en la ciudad francesa de Dijon, el Ingeniero Henry Darcy fue encargado del estudio de la red de abastecimiento a la ciudad. Parece que también debía diseñar filtros de área para purificar el agua, así que se interesó por los factores que infiltran en el flujo del agua a través de los materiales arenosos y presentó el resultado de sus trabajos como un apéndice a su informe de la red

de distribución. Este pequeño apéndice ha sido la base de todos los estudios físicos matemáticos posteriores sobre el flujo del agua subterránea” del movimiento del agua en medios porosos (Mintegui, citado por Chilón, 2008).

Infiltración: El agua que penetra en el suelo o infiltración puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse subsuperficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde esta agua también llegara hasta los canales de drenaje (flujos de retorno) y recargar acuíferos profundos. En todo lado es importante recordar que el agua se mantiene en un continuo ciclo y aunque se encuentre en acuíferos profundos, esta puede hacer parte nuevamente de la precipitación.

Flujo lateral: Es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta los canales de drenaje, quebradas y ríos. El flujo subsuperficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre 0 – 2m, mediante un modelo de almacenamiento cinético que se usa la ecuación de conservación de masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control.

Percolación: Es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radical, la cual SWAT considera entre 0–2m, esta agua de percolación puede llegar hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o percollarse hasta los acuíferos profundos a mas de 25m el componente percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa del suelo. Una vez el agua es percolada al acuífero profundo, esta no puede alimentar al escurrimiento.

Flujo de retorno: Es el agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las aguas subterráneas, este flujo es el que mantiene agua en los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación (Proaño *et al.*, 2006).

b) Fase líquida.

Está definida como el movimiento de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas; de la cuenca hacia la salida de esta, siguiendo los cauces, atravesando reservorios (red de drenaje) y hasta su salida o punto de aforo. El agua se relaciona con el flujo del agua pendiente abajo, una porción puede perderse debido a evaporación y transmisión a través del lecho del cauce, otra pérdida potencial se debe a la remoción del agua para uso agrícola o humano, el caudal puede ser suplementado por la lluvia, caída directamente sobre el cauce y la proveniente de fuentes puntuales el flujo es dirigido a través del cauce usando un método variable de coeficiente de almacenamiento.

Los sedimentos son el resultado por la operación simultánea de dos procesos: depósitos y degradación. El SWAT utiliza ecuaciones simplificadas y la cantidad máxima de sedimentos que puede ser transportada desde un segmento del cauce, la cual es una función de la velocidad máxima del agua.

$$R=V*S \text{ (fórmula de Yang) (Ecuación 2).}$$

Dónde:

R = Sedimentos.

V = Es la velocidad máxima de la corriente (m^3/s).

S = Es la pendiente en grados.

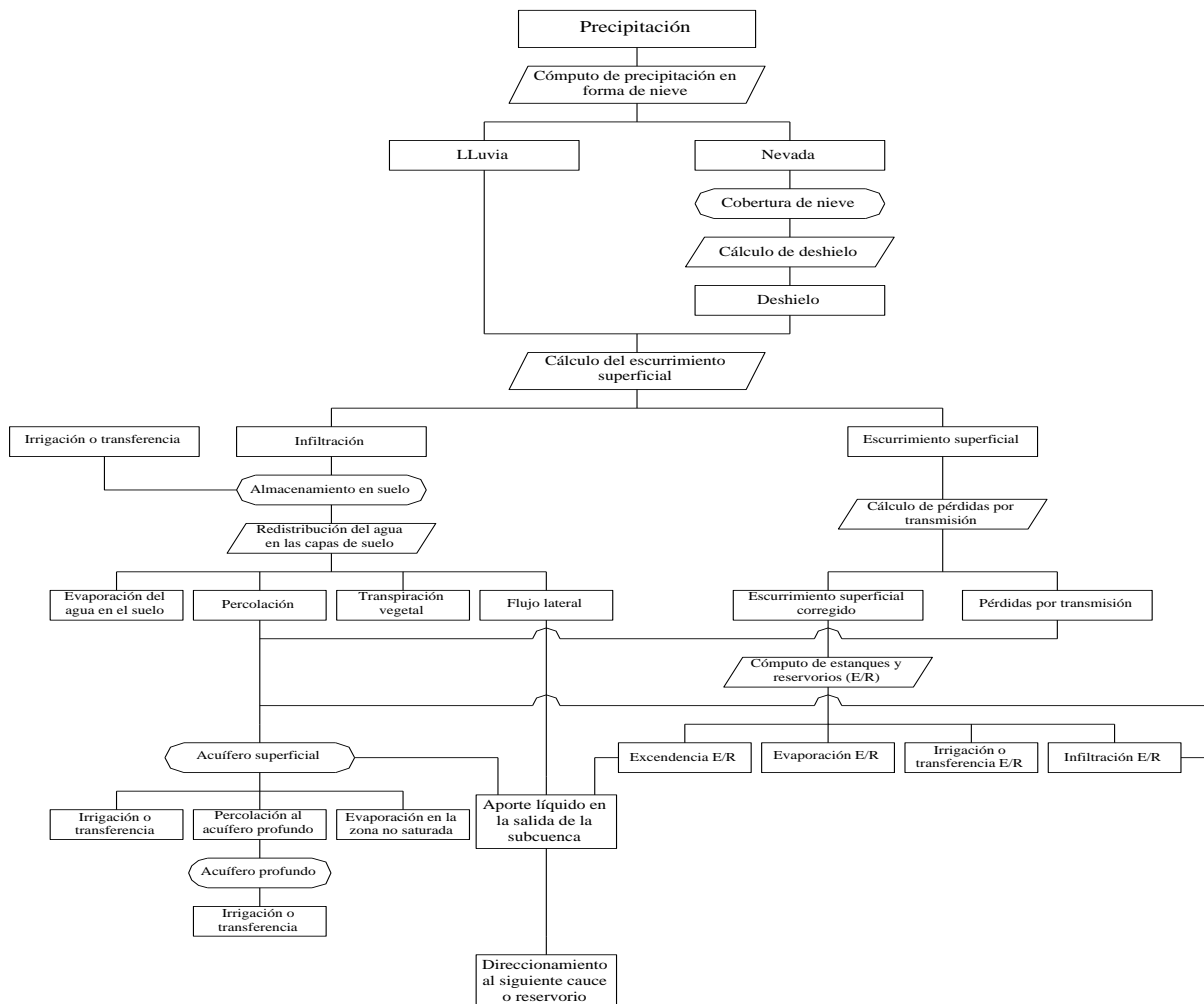
La potencia de la corriente disponible se usa para reentrar el material suelto y depositado, hasta que todo el material sea removido en el cauce, el exceso de potencia de la corriente causa degradación del lecho en el cauce, el cual se ajusta por la erosión del lecho de la corriente y la cobertura (Chanasyk , 2003).

2.6. Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

Definiéndose como Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) a las áreas de terreno dentro cada subcuenca que poseen una única cobertura vegetal, tipo de suelo y pendiente, no existiendo un límite para la cantidad de HRUs por subcuenca.

En base a lo descrito anteriormente el modelo mantiene un continuo balance hídrico, que complementado con la subdivisión que realiza de la cuenca, en subcuencas y HRU's, este puede analizar y cuantificar las diferencias que se presentan en la evapotranspiración para varios tipos de cultivos, tipos de suelo, etc. De este modo el escurrimiento es determinado separadamente para cada HRU y subcuenca para luego ser conducido y combinado con los calculados para otras subcuencas (esquema 1) obteniéndose el escurrimiento total. Esta metodología permite incrementar la exactitud del modelo proporcionándole al balance hídrico una mejor descripción física (Arnold *et al.*, 2000).

Esquema 1. Movimiento del agua simulada por SWAT 2000 con las unidades de respuesta hidrológica (HRU).

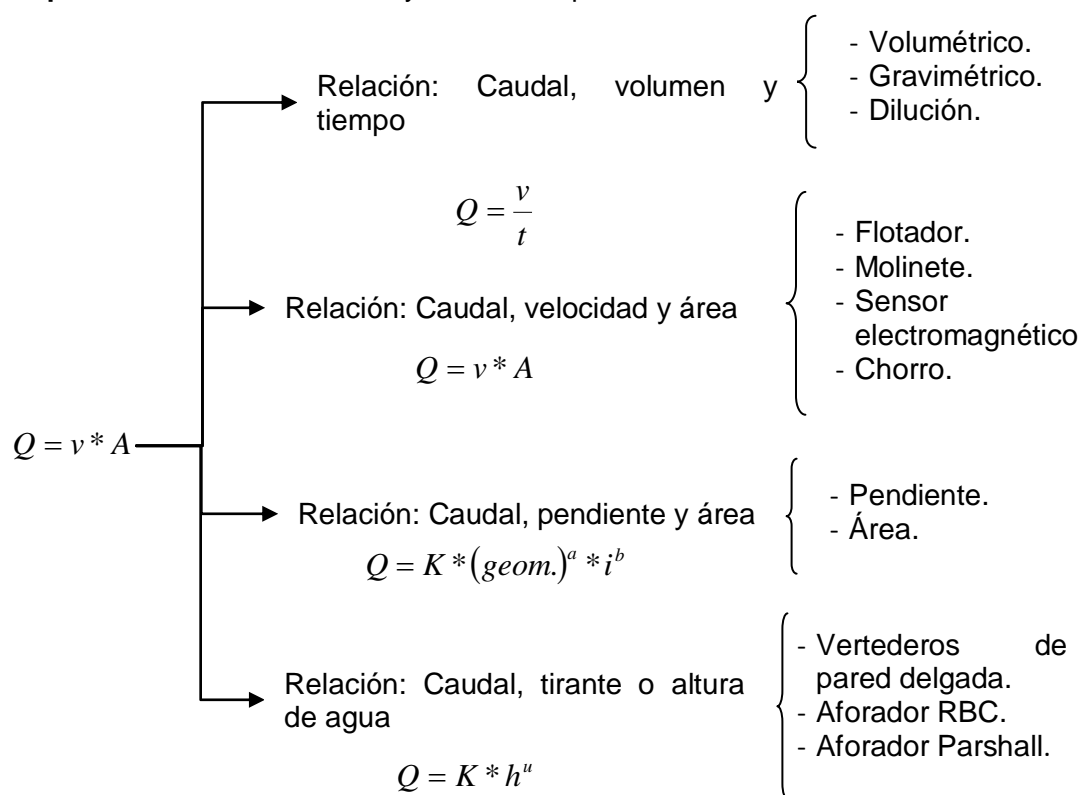


Fuente. Elaboración propia en base Arnold, *et al* (2000).

2.7. Medición de caudales.

La medición del caudal es básicamente indirecta, por ser una magnitud física derivada, aunque algunos instrumentos o estructuras de medición puedan proporcionarnos directos de caudales (Vega, 2004). La determinación de caudales está sustentada en las diferentes relaciones existentes entre el caudal y otras magnitudes físicas, teniendo como principio la definición de caudal. En base a estas relaciones se han desarrollado varios métodos y estructuras de medición de caudales (Aforo).

Esquema 2. Distintos métodos y estructuras para la medición del caudal.



Fuente. Vega (2004).

2.8. Sedimentos.

Los sólidos perdidos o sedimentos es el suelo que se pierde por acción de la erosión hídrica, el suelo es desprendido por el golpe directo de las gotas de agua lluvia y por la fricción del agua de escorrentía. El suelo desprendido son transportados por las corrientes de agua hasta los canales de drenaje por diferentes maneras siendo las

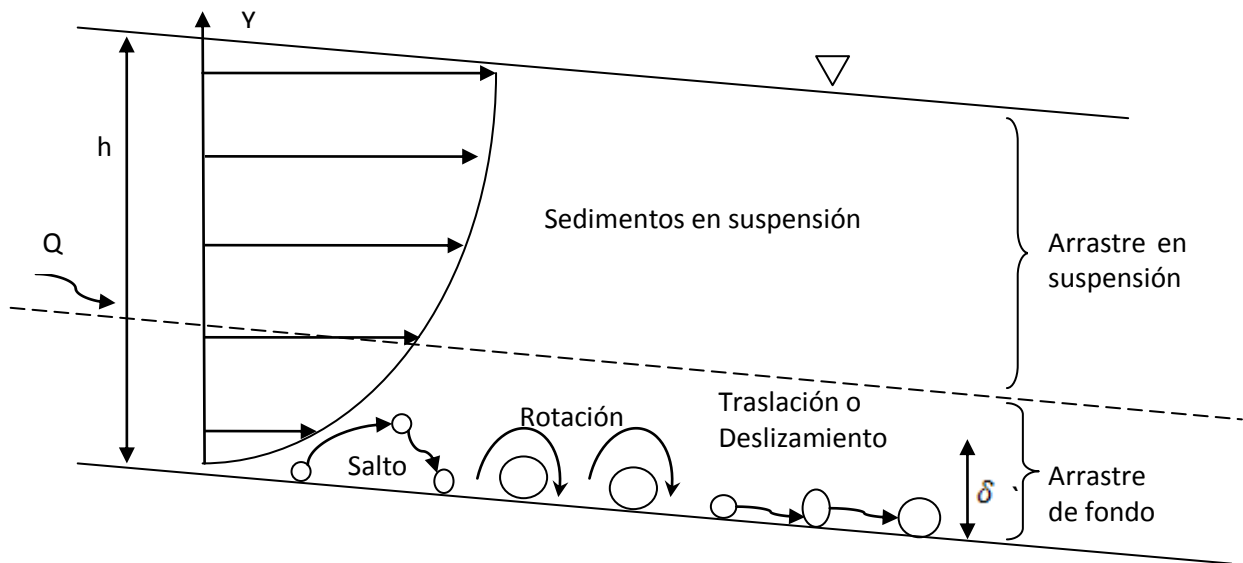
partículas granulares que constituyen el sedimento trasladados por saltos, rodaduras, deslizamientos, sobre el fondo o cerca de él o pueden ser arrastrados fuera de su lugar y quedar en suspensión. El tipo de movimiento experimentado por las partículas depende de las características físicas (tamaño, forma, peso específico, etc.), de la composición granular del sedimento y de las condiciones de la corriente (velocidad, profundidad, pendiente de las superficies, etc.), las diferentes fases del transporte de sedimentos ocurren simultáneamente en las corrientes naturales y no hay una separación neta entre ellas. Por conveniencia, el caudal de sedimento en este análisis se divide en dos categorías: caudal de sedimentos en suspensión y caudal de arrastre de fondo (OMM², 1994).

Los sedimentos en suspensión llamado arrastre en suspensión, están constituidos por las partículas más finas mantenidas en suspensión por los remolinos de la corriente y solo se asientan cuando la velocidad de la corriente disminuye, o cuando el lecho se hace mas liso o la corriente descarga en un lago. Las partículas de mayor tamaño son arrastradas a lo largo del lecho de la corriente y se designan con el nombre de arrastre de fondo. Estas partículas se transporta de diferentes formas: rodando sobre el fondo, saltando, en suspensión y deslizándose sobre el fondo, incluso se pueden presentar combinaciones de movimientos. En el esquema 3 se aprecia esquemáticamente las formas de movimiento de los sedimentos.

Las partículas gruesas generalmente ruedan o se deslizan sobre otras, dentro de una profundidad llamada capa de carga de arrastre de fondo, δ , la cual varia de 10 a 20 veces el diámetro representativo de las partículas. Por otra parte, las partículas de tamaño medio (como las arenas) ruedan sobre otras cuando la velocidad de flujo es baja, pero cuando la velocidad es alta y el escurrimiento es turbulento, pueden ser transportadas también en suspensión, generalmente, las particular finas son transportadas en suspensión.

² La Organización Meteorológica Mundial (OMM) es un organismo especializado de las Naciones Unidas. Es su portavoz autorizado acerca del estado y el comportamiento de la atmósfera terrestre, su interacción con los océanos, el clima que produce y la distribución resultante de los recursos hídricos.

Esquema 3. Movimiento de los sedimentos de fondo y en suspensión dentro del río.



Fuente. Luna, (2009).

Los sedimentos que pueden ser transportados son los que forman el fondo y orillas del cauce, además de las partículas muy finas procedentes de los diferentes suelos que componen la superficie de la cuenca.

Por ejemplo, el conocimiento de la cantidad de sedimentos que transporta una corriente natural es útil en problemas tales como: la determinación del volumen de sedimentos que entran al vaso de un presa, lo que determina la capacidad del volumen muerto y el tiempo de vida útil del mismo. También suele aplicarse para estimar la magnitud de tanques de sedimentación, la frecuencia recarga, etc. (Luna, 2009).

2.9. Cuenca hidrográfica.

Una cuenca, es un área (Unidad Hidrográfica) que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero si contribuye con flujo a otra unidad de drenaje (MMAyA³, 2010). La cuenca hidrográfica es un espacio geográfico en permanente transformación por las fuerzas naturales y las actividades de la sociedad y por tanto su manejo es otra forma de aproximar la ordenación del territorio. Como también es un espacio tridimensional (posee

³ Ministerio de Medio Ambiente y Aguas, Institución pública encargada de la conservación y mejoramiento del ambiente y los recursos naturales en Bolivia, dividida en tres viceministerio: de Saneamiento Básico y Agua Potable, de Recursos Hídricos y Riego, y de Medio Ambiente.

superficie y profundidad), que puede visualizarse como una depresión de tamaño variable que colecta y drena, hacia un punto común, las aguas pluviales y subterráneas. En el terreno, la cuenca está delimitada por la divisoria topográfica o parte aguas; la cual está conformada por las cotas de máxima elevación. La pendiente y su orientación determinan el movimiento superficial del agua en la cuenca.

Toda cuenca posee una serie de cauces (permanentes, intermitentes y efímeros), que concentran y movilizan el agua superficial. El límite superficial de la cuenca no siempre coincide con su límite subterráneo y por lo tanto pueden existir transformaciones de agua entre cuencas; lo cual es crítico cuando se realizan balances hídricos o estudios de carga de contaminantes (García, 2008).

2.10. Balance hídrico.

El balance hídrico se deriva del concepto de balance en contabilidad, es decir, que es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado, con la finalidad de poder responder a la creciente demanda actual y futura de información sobre el agua y los conocimientos necesarios para el desarrollo sostenible, es indispensable conocer el comportamiento de las diversas variables que intervienen en el ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, caudal).

El Balance hídrico es también de gran utilidad en muchos campos de la investigación por ejemplo el conocimiento del déficit de humedad es primordial para comprender la factibilidad de irrigación, ya que provee información sobre el volumen total de agua necesaria en cualquier época del año y entrega un valor importante sobre la sequedad. La información sobre los excedentes de agua y la cantidad por la cual la precipitación excede las necesidades de humedad cuando el suelo está en su capacidad de campo, es fundamental en todo estudio hidrológico, lo cual nos conllevaría a una adecuada planificación y gestión de los recursos hídricos, de tal forma que el desarrollo socioeconómico tenga como base el uso racional y armónico de sus recursos naturales (Segura *et al.*, 2010).

2.11. Grupo hidrológico.

Los componentes de la unidad asignada a un grupo hidrológico específica, que suelos tienen similares características físicas y de escorrentía. Los suelos fueron asignados originalmente al grupo de suelo hidrológico en función de la precipitación medida, la escorrentía y la infiltración (Musgrave, 1955). Desde el trabajo inicial se llevó a cabo para establecer estos grupos, la asignación de suelos a los grupos de suelos hidrológicos se ha basado en el juicio de los científicos del suelo.

Las asignaciones se han basado en la comparación de las características de los perfiles de suelos con los perfiles de los suelos ya colocados en grupos hidrológicos. La mayoría de las agrupaciones están basadas en la premisa de que los suelos encontrados dentro de una región climática con características similares en: profundidad de la capa arable, velocidad de infiltración del agua, la textura y estructura. La pendiente de la superficie del suelo no se considera cuando se asignación en los grupos de suelos hidrológicos.

Entonces las clases se basan en los siguientes factores: el consumo y la infiltración de agua bajo la condiciones de humedad máximo anual, suelo sin nevado, superficie de suelo desnudo, máxima elevación de arcillas expansivas. En su forma más simple, el grupo hidrológico del suelo se determina por la capa de agua en el suelo con la infiltración de la menor conductividad hidráulica saturada y la profundidad de cualquier capa que es más o menos impermeable al agua (por ejemplo, como la profundidad de la capa freática). La capa de por lo menos transmisible puede ser cualquier tipo de suelo u horizonte que infiltre el agua a un ritmo más lento en relación a los horizontes por encima o por debajo de ella.

Por ejemplo, un capa que tiene una conductividad hidráulica saturada de 9,0 micrómetros por segundo (1,3 pulgadas por hora) esta capa da menos infiltración en un suelo, con relación a las capas por encima y por debajo de él teniendo una conductividad hidráulica saturada de 23 de micrómetros por segundo (3,3 pulgadas por hora). Las capas de suelo impermeable de agua, se encuentran entre los tipos de capas registrados en tablas de restricción de componentes del Sistema Nacional de Información de Suelos (NASIS).

La conductividad hidráulica saturada de una capa impermeable o casi impermeable puede variar desde prácticamente 0 micrómetros por segundo (0 pulgadas por hora) a 0,9 micrómetros por segundo (0,1 pulgadas por hora). Por razones de simplicidad, cualquiera de los casos se considera impermeable con fines hidrológicos grupo de suelos. En algunos casos, la conductividad hidráulica saturada los datos no siempre es fácilmente disponibles o que puedan obtenerse. En estas situaciones, otras propiedades tales como la textura, compactación (densidad aparente), la fuerza de la estructura del suelo, mineralogía de las arcillas y materia orgánica se utilizan para estimar el movimiento del agua.

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales Americano (NRCS) clasifica las tierras en cuatro grupos hidrológicos basados en las características de la infiltración del agua en el suelo. NRCS define un grupo hidrológico como un grupo de tierra que contiene escurrimiento similar al potencial bajo tormenta y similar condición en la capa de tierra. Las propiedades del suelo influyen en el potencial del escurrimiento teniendo un impacto mínimo de infiltración para una tierra desnuda, después de un riego prolongado y cuando no ha helado. Estas propiedades son: la profundidad de la capa de agua, conductividad hidráulica saturada y profundidad a una capa muy lentamente permeable. El suelo se clasifica en cuatro grupos A, B, C y D, o en tres dobles clases, A/D, B/D y C/D. Las definiciones de las clases son:

A) Bajo potencial de escorrentía.

Suelos que tienen alta tasa de infiltración aún cuando estén muy húmedos. Consisten de arenas o gravas profundas muy bien drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de infiltración de agua.

B) Moderadamente bajo potencial de escorrentía.

Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos, son suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a drenados, textura moderadamente finos a moderadamente gruesos, y

permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de infiltración de agua moderada.

C) Moderadamente alto potencial de escorrentía.

Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos, consisten en suelos con un estrato que impiden el movimiento del agua hacia abajo; suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a las sales o alcalinas o suelos con niveles freáticos moderados. Estos suelos pueden ser pobremente drenados a moderadamente drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50 a 100 cm).

D) Alto potencial de escorrentía.

Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos, consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a las sales o alcalinidad, y suelos poco profundos sobre materiales casi impermeable estos suelos tienen tasas de transmisión muy lenta.

Si un suelo es asignado a un grupo hidrológico doble (A / D, D / C, o C / D), la primera letra es de áreas drenadas y el segundo es para las áreas no drenadas. Sólo los suelos que en su estado natural, condición están en el grupo D, son asignados a clases dual.

2.12. Número de curva.

Según Paredes y España (2010), el número de curva (CN) es un parámetro hidrológico adimensional que depende del complejo hidrológico suelo vegetación, la humedad antecedente del suelo, el uso y las prácticas de manejo. La distribución espacial de este parámetro se requiere en la modelación distribuida del proceso lluvia-escorrentía

La mayoría de los modelos numéricos de simulación hidrológica emplean el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) Numero de Curva (CN), desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (NRCS), para estimar el exceso

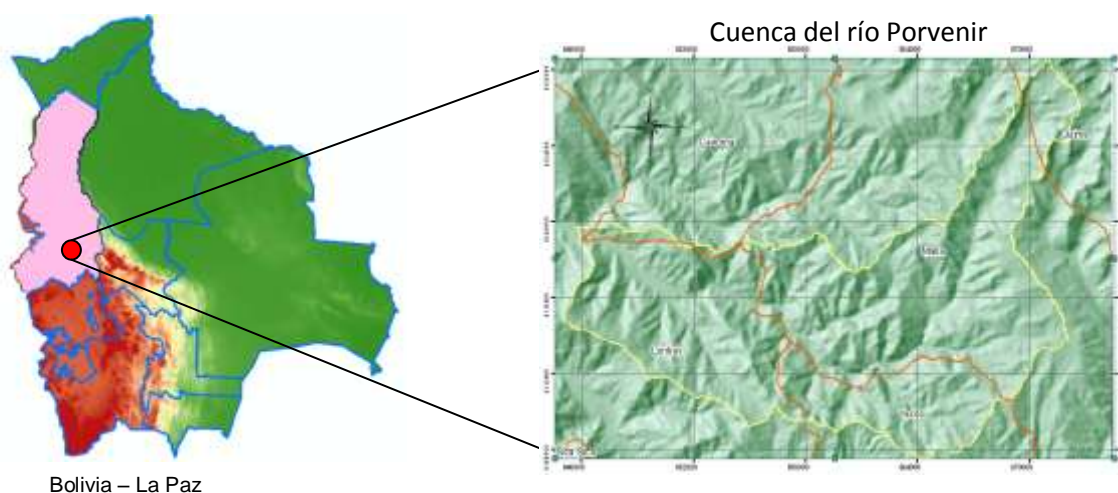
de precipitación (P_e). Este parámetro es una función de la altura de lámina de lluvia (P), la abstracción inicial (loss initial) y el potencial de retención máxima (S). El S , es una medida de la capacidad de la cuenca para retener la precipitación procedente de una tormenta. Cuando la lluvia acumulada excede la abstracción se inicia el exceso de precipitación y en consecuencia el escurrimiento (P_e). El NRCS a través de múltiples estudios de campo, relacionó S con las características de la cuenca, generando un parámetro adimensional al que denominó Número de Curva. Este varía de 30 a 100, y se relaciona con el uso de la tierra, el tratamiento o práctica de conservación, la condición hidrológica y el grupo hidrológico del suelo. La condición hidrológica es una variable difícil de estimar, pues depende del porcentaje de cobertura vegetal en la unidad hidrológica al momento de realizar la simulación.

En la mayoría de las zonas cultivadas, la cobertura vegetal cambiante dificulta la actualización de los mapas de cobertura vegetal. Por consiguiente, en estudios hidrológicos, se estiman erróneamente los gastos picos, ya que se selecciona inadecuadamente la condición hidrológica del suelo al momento de simular el sistema hidrológico de interés.

3. LOCALIZACIÓN.

La investigación se realizó en la cuenca del río Porvenir, que se ubica en la Provincia Loayza, abarcando los municipios de Cairoma, Luribay, Malla, Yaco y parte de Quime (figura 2), posee una extensión de 247,019 Km², con un perímetro de 130,4 km y teniendo las coordenadas en UTM WGS84 zona 19S de: 662681 m Este máximo y 648839 m Este mínimo; 8119071 m Sur máximo y 8109627 m Sur mínimo.

Figura 2. Ubicación de la cuenca del río Porvenir, del Departamento La Paz, Provincia Loayza, Municipio de Luribay.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

3.1. Caracterización de la zona de estudio.

La metodología que se utilizó en el análisis es el método descriptivo que se utiliza para recoger, organizar, resumir, presentar, generalizar, los resultados de las observaciones. Este método implica la recopilación y presentación sistemática de datos para dar una idea clara de una determinada situación (Zorrilla, 1997).

3.2. Manejo espacial.

3.2.1. Zona altiplánica.

La zona altiplánica como característica presenta a los centros poblados en lugares estratégicos, donde las pendientes son mínimas y se pueden realizar las edificaciones necesarias para el mejor desarrollo humano de la zona.

La distribución espacial de la población rural es dispersa, las áreas de producción son utilizadas de acuerdo a los diferentes microclimas que requieren los cultivos mientras los campos de pastoreo se encuentran en las alturas de las comunidades. El modelo SWAT encontró 6 sub cuencas dentro de la zona altiplánica.

3.2.2. Zona del valle.

En el valle, las edificaciones se presentan en el pie de monte, cercano a los caminos y dispuesto en dirección al río con la finalidad de utilizar las acequias para el riego. La distribución espacial de la población es más concentrada.

Los campos de pastoreo se encuentran en la cabecera y laderas del monte, mientras que las áreas de producción se ubican cercanas a las viviendas, en la que manejan una diversidad de cultivos de acuerdo al clima templado que presenta la zona. El modelo SWAT encontró 5 sub cuencas pertenecientes a la zona del valle.

3.3. Aspectos físico – naturales.

3.3.1 Fisiográfica.

Según los factores morfológicos, climatológicos de flora y fauna, así como la variedad de suelos, es la que divide al país en provincias fisiográficas, éstas van de Oeste a Este; Cordillera Occidental o Volcánica, Cordillera Oriental, Altiplano Sub andino, Llanuras, Escudo Brasileño y Serranías Chiquitanas.

La cuenca Porvenir se encuentra geomorfológicamente en la Cordillera Oriental y se caracteriza por presentar predominantemente un paisaje de montañas y serranías de

origen estructural, modeladas por procesos glaciales. Entre las formas definidas se observan relictos de antiguos glaciales como circos, artesas morrenas, lagos glaciales y lenguas de ventisqueros.

Sus valles son profundos y encajados con pequeñas terrazas aluviales como resultado de los procesos de erosión fluvial. También se observa erosión en forma de deslizamientos y torrentes de barro.

3.3.2. Topografía.

A pesar del potencial productivo de la cuenca, el 90% de su topografía es accidentada, típica de los valles cerrados y encajonados, caracterizándose por la formación de serranías altas, con cimas semiagudas y pendientes abruptas.

Las serranías que franquean la cuenca del río Porvenir, son como desprendimientos de la gran Cordillera de Tres Cruces, pues de ella se abren estos valles, como así los ríos que corren por el fondo de los mismos. En el fondo del valle, se encuentran las terrazas o planicies en ambos márgenes de los ríos, alcanzando anchuras que varían entre los 100 y 500 m. La pendiente de estas terrazas varía según las zonas, pero en general es relativamente apreciable, hay lugares en que la misma no supera el 2 %, pero en otros alcanza hasta el 30%. La pendiente de las serranías adyacentes a las terrazas es ya muy pronunciada, va del 40% a más del 70% (Figura 11).

3.3.3. Geología.

En la Geología del lugar se puede describir tres tipos de Eras, las cuales son: Cenozoico, Mesozoico y Paleozoico. También se tienen ocho sistemas de las cuales son: Cretácico, Cuaternario, Devónico, Jurasico, Ordovícico, Silúrico, Terciario y Terciario.

3.4. Zonas y grados de erosión.

Las zonas presentan serranías altas y muy escarpadas, con erosión muy fuerte también serranías de altitud media y poco disectadas con erosión muy fuerte así mismo la llanura pie de monte, con erosión moderada.

3.4.1. Serranías altas, escarpadas con erosión muy fuerte.

Los suelos de ésta unidad se caracterizan por presentar erosión o pérdida de suelo muy fuerte, relacionada a la erosión hídrica estimada entre 51 a 100 Tn/ha/año, este efecto se da por la escasa a moderada cobertura vegetal (menor 50%) esta cobertura conforma especies herbáceas y arbustivas bajas destinadas al pastoreo restringido, además de una actividad agrícola poco significativa por las condiciones inapropiadas del medio.

3.4.2. Serranías de altitud media y poco disectadas con erosión muy fuerte.

Son suelos con erosión hídrica o pérdida de suelos muy fuerte, estimada de 51 a 100 Tn Ha/año, con una cobertura vegetal pobre y muy rala (menor al 25%), constituida por pastos y arbustos, pastoreo muy restringido y escasa actividad agrícola en pendientes muy pronunciadas que están acelerando la degradación de las tierras.

3.4.3. Llanura pie de monte, con erosión moderada.

Presenta erosión y pérdida de suelos en forma moderada, la cual es causada por la erosión hídrica, estimada entre 11 y 30 Tn/Ha/año (Morris, 2005). La ecología de la zona es de escasa vegetación natural en las partes altas, son terrenos susceptibles a la erosión y degradación de suelos, difíciles de controlar, porque forman bolsones de agua en las partes altas provocando frecuentes mazamoras.

3.5. Características del ecosistema.

3.5.1. Clima.

Según Geológico Boliviano “GEOBOL⁴” ahora Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas “SERGEOTECMIN”, la cuenca del río Porvenir, climáticamente se encuentra en la clasificación DB´ 3 db´ 3, semiárido tercer meso termal con débil o ningún excedente de agua, normal al tercer meso termal y una evaporación anual de 855 a 997 mm.

⁴ GEOBOL: es un acrónimo de servicio geológico de Bolivia. El actual Servicio Nacional de Geología y Técnico en Minas (SERGEOTECMIN), inicia actividades hace 50 años como Departamento Nacional de Geología (DENAGEO), la misma que va cambiando de razón social a Servicio Geológico de Bolivia (GEOBOL) y posteriormente a Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN).

Tabla 1. Interpretación de los códigos climáticos de la cuenca del río Porvenir.

Tipo climático	Interpretación
D	Clima semiárido
B`3	Tercer Meso termal
D	Débil o ningún excedente de agua
B`3	Concentración térmica del verano

Fuente. GEOBOL, en la actualidad SERGEOTECMIN, 2005.

El clima en el sector del altiplano es frío, esta parte de la cuenca del río Porvenir se encuentra entre las altitudes de 5712 a 4800 m. La temperatura media varía de 5 a 15°C, con una humedad ambiental promedio de 50%. Tiene dos estaciones típicas, la seca y la lluviosa.

Presenta un clima muy variado desde sus altas montañas a sus valles profundos. Llegando en invierno hasta 3°C bajo cero, en los valles la temperatura media llega a 18°C. En la región alta las estaciones se determinan con cierta exactitud. El invierno se presenta durante los meses de mayo, junio y julio; el verano se distingue por un régimen de lluvias más o menos uniformes durante los meses de diciembre, enero y febrero.

En términos generales podemos decir que la cuenca del río Porvenir tiene dos climas bien definidos y que en la transición de uno a otro se observan climas intermedios que determinan la diversidad de sus productos: El de la zona fría (altiplano) y el clima templado seco de los valles en sus diversas graduaciones, según (Morris, 2005).

3.6. Riesgos climáticos.

3.6.1. Heladas.

Se presentan principalmente en las alturas o zona altiplánica, desde agosto a mayo y algunas veces hasta el mes de septiembre. En el valle es poco frecuente. Las heladas en la zona altiplánica afectan principalmente al cultivo de papa marchitando las hojas y se constituye en una limitante afectando en una baja producción rodeando el 90% del cultivo; cuando se presenta en el valle el cultivo más afectado es el tomate.

3.6.2. Mazamorras.

Estas se producen en la época de lluvias generalmente en los meses de diciembre hasta marzo, las cuales saturan de humedad los suelos de las partes altas, produciéndose los deslizamientos de grandes cantidades de suelo. Este es uno de los principales problemas en la cuenca en estudio, primero porque se produce la erosión de grandes extensiones de suelo y segundo que estas mazamorras afectan los caminos, dañan las plantaciones de frutales y tierras con cultivos. La mayoría de las comunidades afectadas son todas aquellas que se encuentran en el valle.

3.7. Agua.

En el área de estudio el recurso hídrico tiene dos orígenes: subterráneo y superficial, entendiéndose, como la primera, las aguas provenientes de las filtraciones, manantiales, lagunas y cualquier otra agua que emane de la superficie del suelo, y como la segunda el agua de los ríos, de las precipitaciones y deshielos. Cabe indicar que como el estudio se realizó en época de abundante lluvia, los caudales estimados promedio responden a las máximas crecidas, además es necesario indicar que las comunidades y las instituciones Municipales no disponen de información estadística de aforos, para poder realizar análisis comparativos de disponibilidad del agua.

A lo largo de la historia los ríos han cumplido una función gravitante al posibilitar el recurso agua para sus diversos empleos. Sin embargo éstas aguas tan necesarias para el desarrollo de la diversidad biológica se van contaminando por uso indiscriminado de los plaguicidas en la parte del valle y por la minería en la zona altiplánica, haciéndola no apta para el consumo humano y poniendo en riesgo la salud.

Por ello se realizaron estudios físicos químicos de aguas en el Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN), de las cuales las muestras se obtuvieron de los puntos de aforo de Azambo, Porvenir y Malla (Tabla 2,3 y 4). Los resultados de las muestras según el informe de IBTEN llegaron a la siguiente conclusión: de acuerdo con la clasificación de las aguas de la Ley 1333, las aguas de Azambo, Porvenir y Malla se clasifican como Clase B, es decir son aptas para riego y uso industrial. Los contenidos

altos de magnesio y de sólidos totales bajan la calidad del agua, pero siguen siendo de Calidad B y se requieren análisis bacteriológico para saber si son potables.

Tabla 2. Análisis físico químico del agua - Porvenir del departamento de La Paz.

Parámetro	Resultado	Unidades	Método
pH	7.11	-	Potenciometría
Conductibilidad Eléctrica	0.274	mS/cm	Potenciometría
Sodio	24.78	mg/L	Flamometría
Potasio	4.54	mg/L	Flamometría
Calcio	14.43	mg/L	Absorción Atómica
Magnesio	12.71	mg/L	Absorción Atómica
Cloruros	4.51	mg/L	Método Argentométrico
Carbonatos	0.00	mg/L	Volumetría
Bicarbonatos	70.16	mg/L	Volumetría
Sulfatos	74.22	mg/L	Espectrofotometría UV-Visible
Sólidos Suspendidos	1012.48	mg/L	Gravimétrico
Sólidos Totales	1246.84	mg/L	Gravimétrico
Sólidos Disueltos	234.36	mg/L	Gravimétrico
Boro	0.007	mg/L	Espectrofotometría UV-Visible

Fuente. Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear, 2010.

Tabla 3. Análisis físico químico de agua – Azambo perteneciente al departamento de La Paz.

Parámetro	Resultado	Unidades	Método
Ph	6.90	-	Potenciometría
Conductibilidad Eléctrica	1.153	mS/cm	Potenciometría
Sodio	10.11	mg/L	Flamometría
Potasio	14.99	mg/L	Flamometría
Calcio	44.89	mg/L	Absorción Atómica
Magnesio	105.72	mg/L	Absorción Atómica
Cloruros	8.62	mg/L	Método Argentométrico
Carbonatos	0.00	mg/L	Volumetría
Bicarbonatos	427.07	mg/L	Volumetría
Sulfatos	207.98	mg/L	Espectrofotometría UV-Visible
Sólidos Suspendidos	557.00	mg/L	Gravimétrico
Sólidos Totales	1465.25	mg/L	Gravimétrico
Sólidos Disueltos	908.25	mg/L	Gravimétrico
Boro	0.001	mg/L	Espectrofotometría UV-Visible

Fuente. Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear.

Tabla 4. Análisis físico químico de agua – Malla perteneciente al departamento de La Paz.

Parámetro	Resultado	Unidades	Método
Ph	6.38	-	Potenciometría
Conductibilidad Eléctrica	0.175	mS/cm	Potenciometría
Sodio	3.71	mg/L	Flamometría
Potasio	1.94	mg/L	Flamometría
Calcio	17.08	mg/L	Absorción Atómica
Magnesio	10.08	mg/L	Absorción Atómica
Cloruros	7.89	mg/L	Método Argentométrico
Carbonatos	0.00	mg/L	Volumetría
Bicarbonatos	36.61	mg/L	Volumetría
Sulfatos	41.64	mg/L	Espectrofotometría UV-Visible
Sólidos Suspendidos	949.20	mg/L	Gravimétrico
Sólidos Totales	1145.27	mg/L	Gravimétrico
Sólidos Disueltos	196.07	mg/L	Gravimétrico
Boro	0.55	mg/L	Espectrofotometría UV-Visible

Fuente. Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear.

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

4.1. Materiales.

4.1.1. Materiales de laboratorio.

- Agitador eléctrico.
- Agua destilada.
- Balanza.
- Estufa.
- Hidrómetro.
- Matraz de 1 L.
- Piseta con agua destilada.
- Probeta de 50 ml.
- Probeta de 1 L.
- Tamizador.
- Termómetro.
- Vasos precipitados.

4.1.2. Material químico.

- Hexametáfosfato de Sodio 5 gr. por muestra de suelo.

4.1.3. Material biológico.

- Limón (para determinar el pH del suelo).

4.1.4. Material de campo y equipo.

- Bolsas recolectoras de suelo.
- Botellas de plástico de 2 L.
- Brújula.
- Cinta adhesiva.
- Cronómetro.
- Etiquetas para la identificación de cada muestra.
- Flexómetro de 50 m.
- Mapa a escala 1:50 000.
- Marcadores indelebles.
- Mochila con capacidad de carga de 50 kg.
- Sistema de posicionamiento global (GPS)

- Soga.

4.1.5. Material de gabinete.

- Hojas tamaño resma y carta.
- Planilla de anotaciones.
- Grabadora.

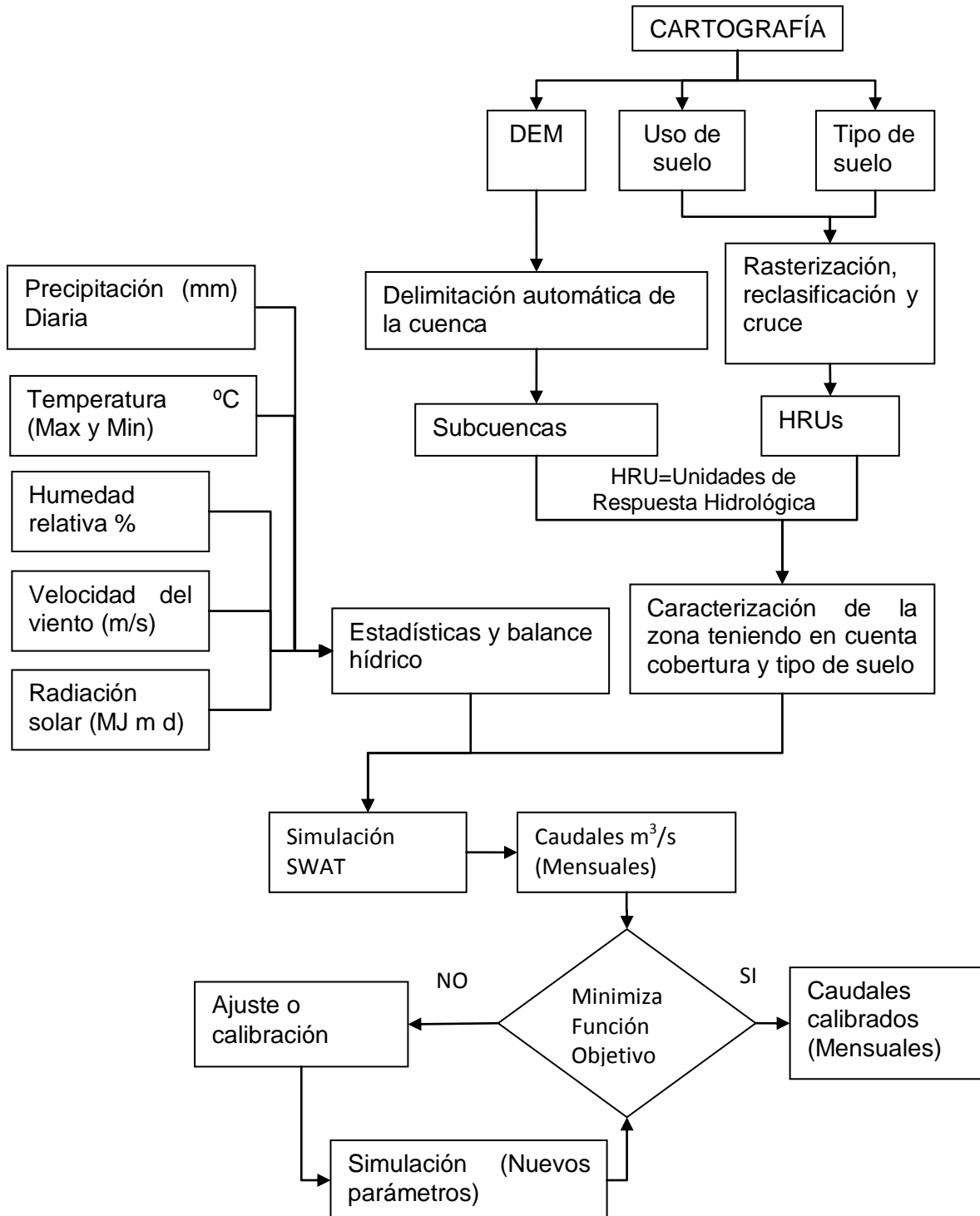
4.1.6. Material de programas.

- ArcGis 9.3.
- AVSWAT2009. (Extensión del programa ArcGis 9.x.)
- Auto CAD 2012. (En español).
- Erdas Imagine 9.2.
- Google Earth Pro original 2008.
- WGNmaker4.1.

4.2. Métodos.

4.2.1. Procedimiento del modelo SWAT.

Esquema 4. Metodología en la aplicación del modelo SWAT.



Fuente. Elaboración propia en base a Cisneros (2008).

4.2.1.1. Modelo digital de elevación (DEM).

El Modelo Digital de Elevación (DEM), es un modelo digital de terreno cuyos datos almacenados representan valores de altitud, estos modelos son símbolos ya que establecen relaciones de correspondencia con el objeto real, mediante algoritmos matemáticos que son tratados mediante el software de Sistema de Información Geográfica (SIG), estas estructuras de datos, no son solo acumulaciones de cifras, si no que tienen una estructura interna con la cual deben interpretarse dichos datos (MMAyA, 2010).

Con el fin de uniformizar los datos con los demás países de Sud América (Argentina, Chile y Uruguay), involucrados en el manejo del modelo SWAT cada uno en sus respectivas regiones de estudio y pertenecientes al Proyecto FONTAGRO, se utilizo el Shuttle Radar Topography Mission “SRTM 4.1.” de 90 m, descargado de la página web: [www.http://srtm.csi.cgiar.org](http://srtm.csi.cgiar.org).

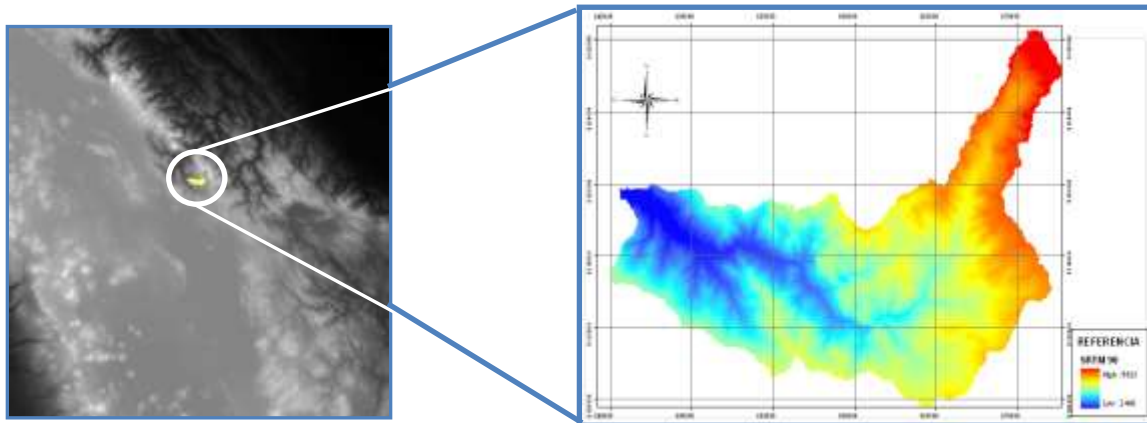
Las características del SRTM son datos distribuidos que están en formato ARC GRID, ARC ASCII y en Geotiff. Son derivados de los datos de la “United States Geological Survey” (USGS), “National Aeronautics and Space Administration” (NASA) y SRTM.

Además, el CIAT (Centro Internacional para la Agricultura Tropical) ha procesado esto datos para proveer superficies continuas libres de irregularidades en la topografía. Las áreas con falta de datos en los datos originales SRTM han sido llenados usando métodos de interpolación descritos por Reuter *et al*, (2007). Asimismo, la versión 4.1 tiene los siguientes realces:

- La máscara del océano incluye algunas islas pequeñas previamente estando perdido en los datos cortados.
- No discrimina línea de datos de pixeles a lo largo de meridianos arreglados.
- Todo GeoTiffs con 6000 x 6000 los pixeles.
- El formato de ASCII archiva la definición de proyección es incluida en archivos del .prj

- El formato GeoTiff archiva la definición de proyección está en el .tfw (EsriTiff) y un archivo del .hdr que reporta definiciones de proyección J.4 equivalente.

Figura 3. SRTM V4.1 de 90 m obtenida de la página de internet [www.http://srtm.csi.cgiar.org](http://srtm.csi.cgiar.org) para la delimitación de la cuenca del río Porvenir.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

4.2.2. Tipo de suelo (LandUse).

El modelo SWAT tiene incorporada una base de datos con suelos para los EEUU, en una escala de 1:250 000, denominado State Soils Geographic (STATSGO), no obstante, el modelo provee que se creen bases de datos de suelos para otros países o también para los EEUU a diferente escala. (Vásquez, 2008). La base de datos comprende un formato específico que permite definir hasta 10 capas (layers) de suelo (horizontes), cada suelo tiene 7 campos generales y 12 campos particulares para definir cada capa, los datos que requiere el modelo SWAT en cuanto al tipo de suelo (Land Use) son:

- (sol_zmx), la máxima profundidad de capa en el suelo (mm)
- (anion_excl), la fracción de porosidad de la cual los aniones quedan excluidos, elemento electronegativo de una molécula.
- (sol_crk), volumen potencial de la abertura para el perfil edafológico (m^3/m^3), volumen de la abertura de la calicata.
- (sol_z), la profundidad de la superficie del suelo al fondo del estrato “altura de la capa” (mm).

- (sol_bd), la densidad de la humedad de la masa (Mg m^{-3} or g cm^{-3}).
- (sol_awc), capacidad disponible de agua (mm/mm).
- Sol_cbn), cantidad de carbono orgánico en el sustrato de altura de 10 mm de suelo (%_wt).
- (sol_k), conductibilidad hidráulica saturada del primer estrato (mm/hr).
- (clay), porcentaje de arcilla.
- (silt), porcentaje de limo.
- (sand), porcentaje de arena.
- (crock), grava.
- (sol_alb), el albedo en suelo húmedo (fracción).
- (usle_k), el factor de erosionabilidad del suelo ($0.013 \text{ métrico Ton m}^2\text{hr/cm}^3_{\text{metrico Ton cm}}$).
- (sol_ec), conductibilidad eléctrica (dS/m).

Los datos, tipo de suelos son usados por SWAT y puede ser dividido en dos grupos, características físicas y químicas. Las propiedades físicas de la tierra gobiernan el movimiento de agua y aire a través del perfil y tiene un impacto mayor en el ciclo del agua dentro de las HRUs, mientras las características químicas se usan como entradas para poner niveles iniciales de los químicos diferentes en la tierra. Los suelos entran como (.sol), el archivo define las propiedades físicas y químicas para todas las capas del suelo

4.2.3. Ponderación inversa de la distancia (Inverse Distance Weighting).

Es un interpolador determinista rápido y exacta. Hay muy pocas decisiones a tomar respecto a los parámetros del modelo y ayuda a tener de buena manera un primer vistazo a una superficie interpolada al producir "los ojos de toros" en torno a posiciones de memoria, además, de tener una buena representación, ajuste y validación.

4.2.4. Uso de suelo.

El modelo SWAT contiene más de 100 tipos de cultivos en su base de datos los cuales se agrupa en siete categorías: la estación calurosa para leguminosas anuales, la

estación fría para leguminosa anuales, leguminosa perennes, la estación calurosa anual, estación fría anual, planta perenne y árboles (las plantas bianuales son clasificadas como las plantas perennes).

4.2.5. Información climática.

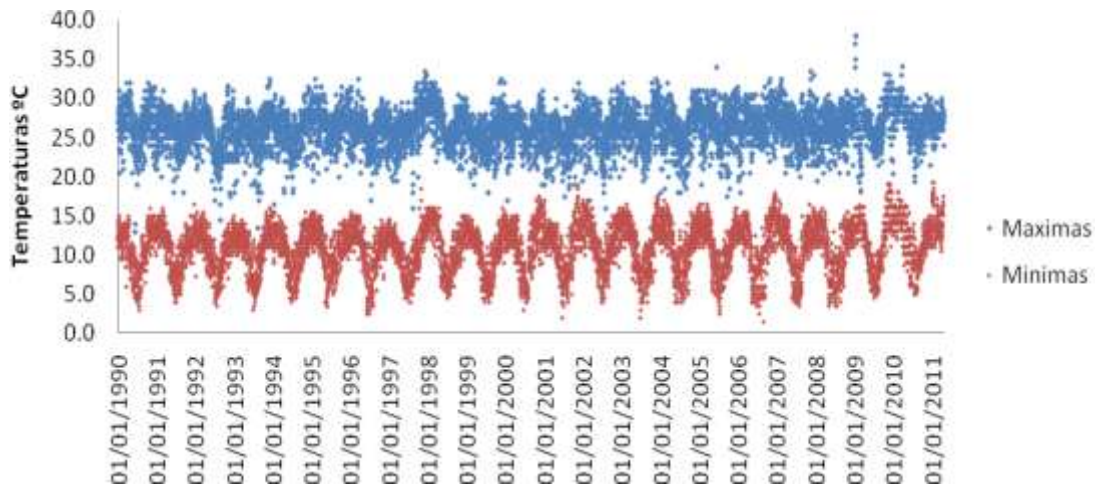
La información meteorológica que requiere el modelo SWAT es:

- a) Número de años con información de precipitaciones
- b) Coordenadas geográficas y/o proyectadas en algún sistema de coordenadas estándar (para la Cuenca en estudio se utilizó UTM WGS84 19S).
- c) Elevación donde se encuentran localizadas las estaciones meteorológicas (la estación meteorológica de Luribay se encuentra a una altura de 2575 msnmm)
- d) Temperaturas máximas y mínimas diarias en °C
- e) Precipitaciones diarias (mm)
- f) Humedad relativa diaria (%)
- g) Radiación Solar diaria ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- h) Velocidad del viento (m s^{-1}).

4.2.5.1. Temperaturas máximas y mínimas.

Según SENAMHI (2010), los datos históricos desde 1990 a 2011 obtenidos y analizados de la estación meteorológica de Luribay presentaron una temperatura media anual de 18°C, mientras que la máxima extrema llegó a 38.0°C y la mínima extrema registrada fue 1.5°C.

Gráfico 1. Análisis de temperaturas máximas y mínimas en la cuenca del río Porvenir, de la estación de Luribay con datos anuales de 1990 a 2011.

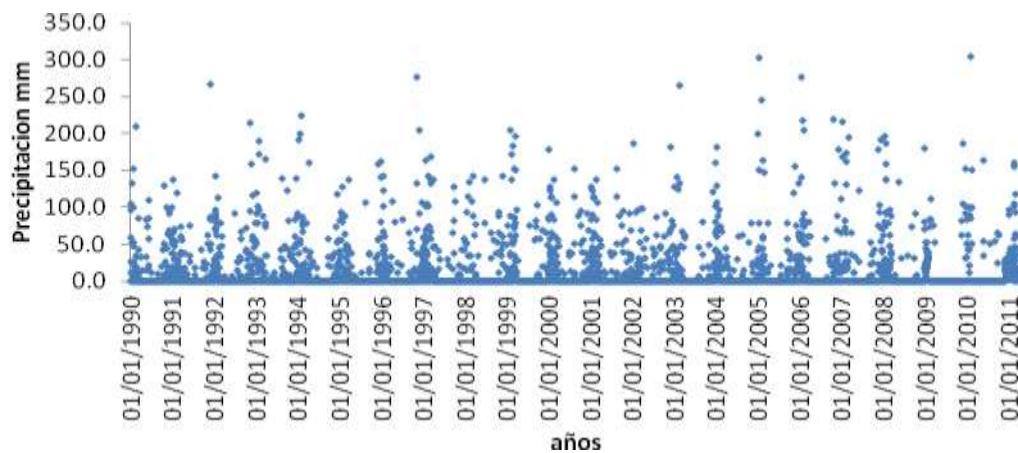


Fuente. Elaboración propia en base SENAMHI (2010).

4.2.5.2. Precipitaciones Pluviales.

Según datos proporcionados por SENAMHI (2010), las mayores precipitaciones ocurren en los meses de verano (noviembre a marzo), entre 150 - 305 mm de precipitación total mensual y en los meses de abril a octubre precipitan de 0 a 5 mm, reflejando una estacionalidad muy marcada.

Gráfico 2. Análisis de precipitaciones en la cuenca del río Porvenir, de la estación de Luribay con datos anuales de 1990 a 2011.

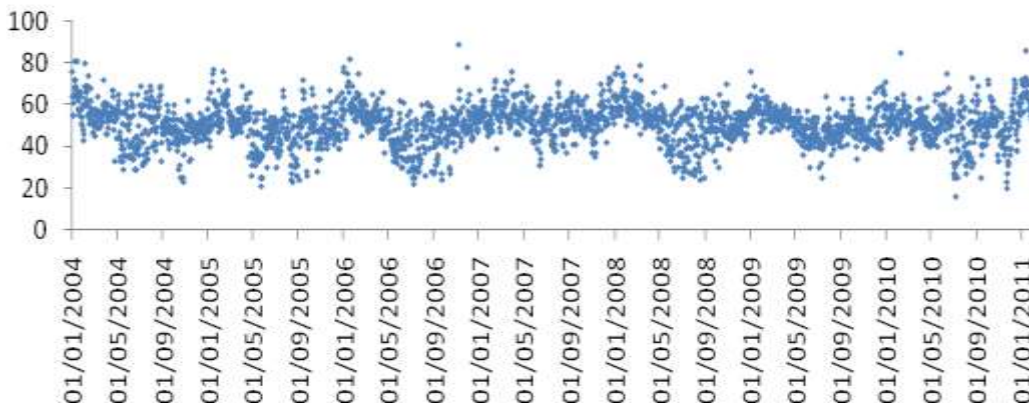


Fuente. Elaboración propia en base SENAMHI (2010).

4.2.5.3. Humedad relativa.

Según SENAMHI (2010), los promedios del último decenio el sector muestra una humedad relativa media de 50% en los meses de verano y en invierno descienden a 16%

Gráfico 3. Análisis de humedad relativa en la cuenca del río Porvenir de la estación de Luribay con datos anuales de 1990 a 2011.



Fuente. Elaboración propia en base SENAMHI (2010).

4.2.6. wgnMAKER4.1.

Es un macro de Excel se ha diseñado para rellenar o simular falta de información en los datos del tiempo en la estación meteorológica necesaria, creando un archivo para el modelo SWAT, esta requiere para funcionar dos versiones como una extensión .xls que es compatible con todas las versiones de Excel, y otro con una extensión .xlsm que sólo es compatible con las versiones 2007 o posterior, en la ejecución de la macro en una versión anterior de Excel 2007 parece ser más rápido. Sin embargo, la versión .xls no es tan flexible como la versión .xlsm.

4.2.7. Caudales observados.

Con la finalidad de calibrar el modelo, se recopilaron los caudales medidos mensuales en los tres puntos de aforo establecidos en la parte alta, media y baja de la cuenca del río

Porvenir. Los datos de caudales son de ocho meses comenzando de septiembre del 2010 hasta abril 2011.

Tabla 5. Caudales mensuales observados, obtenidos en los tres puntos de la cuenca del río Porvenir.

Años	Meses	Cuenca alta Q (m3/s)	Cuenca media Q (m3/s)	Cuenca baja Q (m3/s)
2010	Septiembre	-	0.42	0.04
2010	Octubre	-	0.84	0.72
2010	Noviembre	0.96	1.44	12
2010	Diciembre	0.73	-	14
2011	Enero	-	-	39.2
2011	Febrero	0.85	-	21
2011	Marzo	-	6.80	6.32
2011	Abril	-	2.23	3.75

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

4.2.8. Sedimentos observados.

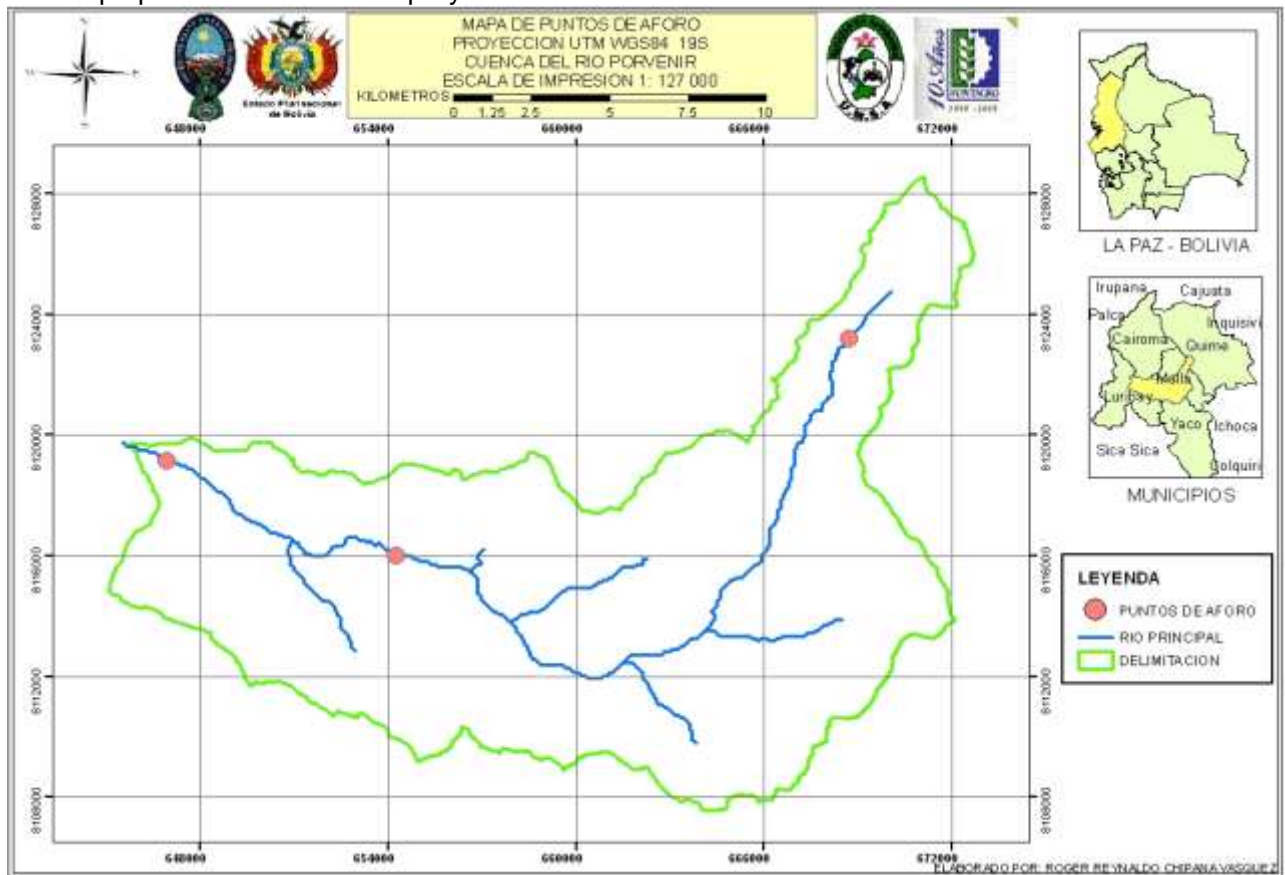
Durante el aforo realizado en campo se tomaron datos de sedimentos a profundidades de 20 cm, por debajo del nivel del agua y la concentración de sedimentos en suspensión fue aproximadamente de 400 miligramos por litro, obtenidas por el método de la botella.

Tabla 6. Sedimentos mensuales observados en la parte baja de la cuenca del río Porvenir.

Años	Meses	Sedimentos Tn/Ha
2010	Septiembre	0.01
2010	Octubre	0.02
2010	Noviembre	0.01
2010	Diciembre	0.3
2011	Enero	0.8
2011	Febrero	0.5
2011	Marzo	0.02
2011	Abril	0.01

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Figura 4. Ubicación de los puntos de aforo y toma de sedimentos en el río principal usando el método de la continuidad, con la técnica de la botella, esta se realizó en la cuenca del río Porvenir, el mapa presentado tiene una proyección UTM WGS84 Zona 19Sur.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Con la escasa información recopilada de la cuenca en estudio, se optó por generar la información faltante y muy requerida por el modelo SWAT como ser el tipo de suelo, uso de suelo y caudales observados como también sedimentos observados.

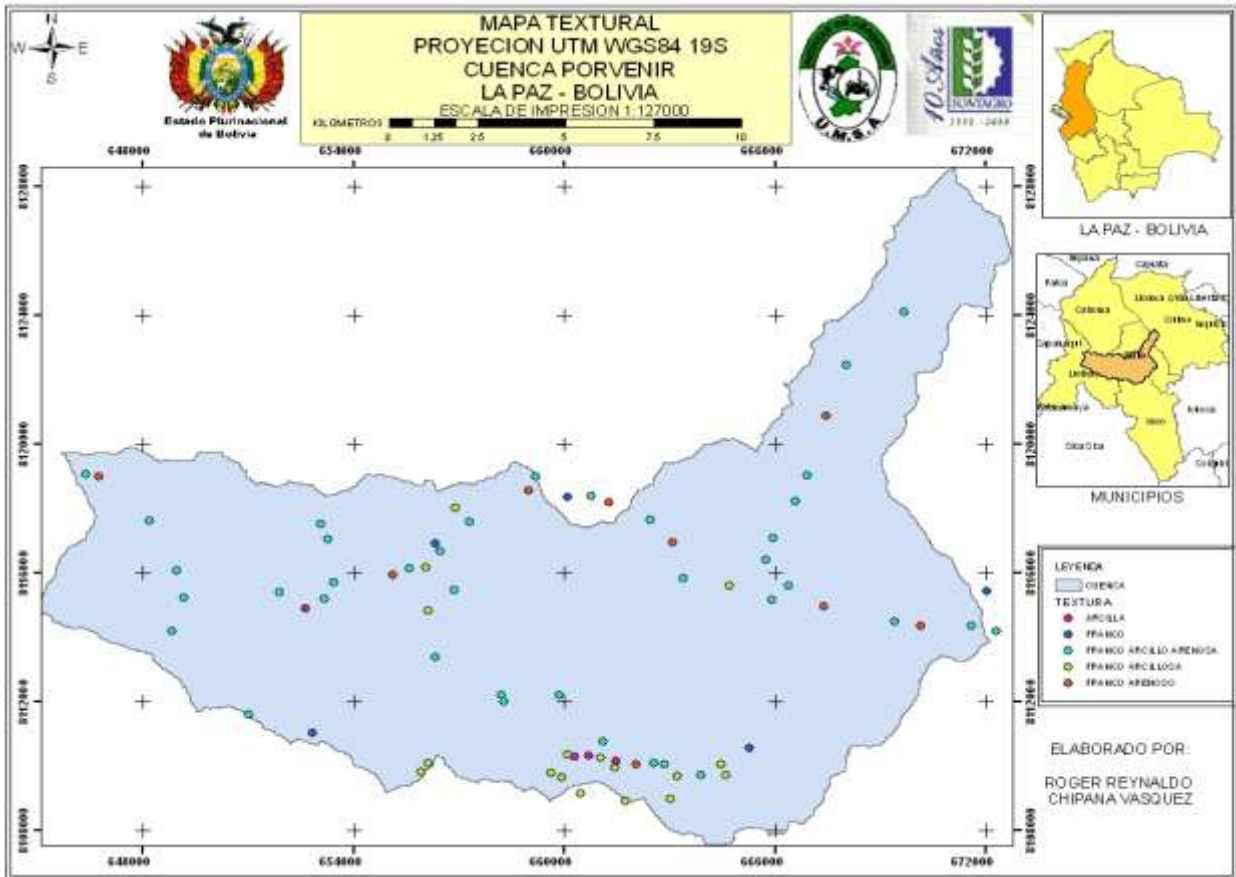
5.1. Resultados y pasos para obtener los datos que requiere el modelo SWAT en la base de datos de tipo de suelos.

La cuenca no presentaba esta información para el modelamiento, por ello se generó realizando una serie de pasos como ser: campaña de muestreo de suelos en la cuenca con barreno, determinación del grupo hidrológico, determinación del número de curva, uso del programa SPAW para determinar las características físicas del suelo y manejo de la extensión SIG (IDW) para generar el mapa de tipo de suelos. Esta se realizó con el fin de obtener un mapa de tipo de suelos del área de estudio.

5.1.1. Resultados de la campaña de muestreo de suelos con barreno.

Con la finalidad de obtener datos de suelos en la cuenca en estudio se realizó una campaña para muestreo de suelos, con trayectos largos de caminatas por que los accesos a las comunidades es mediante sendas, estas rutas es debido por el tipo de pendiente de moderado a escarpado que existe en el lugar y las 80 muestras fueron obtenidas con la herramienta del barreno con el posterior etiquetado de las mismas como también la ubicando de cada muestra con GPS (Global Position System).

Figura 5. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de suelos con barreno a una profundidad de 30cm, de la cual se obtuvieron 5 tipos de clase textural, esta se realizó en la cuenca del río Porvenir, el mapa presentado tiene una proyección UTM WGS84 Zona 19Sur.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5.1.1.2. Resultados del análisis en laboratorio.

Con el número de muestras obtenidas en campo, se realizó un análisis granulométrico (análisis físico – Bouyoucus), para obtener porcentajes de arena, limo y arcilla en cada muestra de suelo (anexo D), estos análisis se realizaron en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía. Y los resultados se agruparon en cinco categorías las cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7. Resultados del análisis granulométrico obtenidos con el método de Bouyoucus.

Textura	Porcentaje %	Ubicación en la cuenca	Grupo hidrológico
Franco Arenoso	5	Media y baja	A
Franco Arcillosa	22	Media	C
Franco Arcillo Arenosa	37	Alta, media y baja	C
Franco	32	Media y baja	D
Arcilla	3	Media	C

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5.1.1.3. Descripción y resultados del lugar según el grupo hidrológico.

En la cuenca del río Porvenir se encuentran suelos con el 32% del grupo “D”, que se caracteriza por ser suelos finos de textura franco con alta retención de agua y con contenido de materia orgánica. Estos suelos están ubicados en las aéreas de páramo, con fuertes pendientes y bajas temperaturas. Los suelos con grupo hidrológico “C” son de textura franco arcillosa con 22%, el 37% franco arcillo arenosa y el 3% de arcilla, en las partes bajas de la cuenca predominan los suelos “C”, que forman parte de las zonas urbanas y están utilizados en su mayoría por frutales. Los suelos con el grupo “A”, presentan una textura franco arenoso abarcando un 5% en la cuenca. Todos estos suelos están utilizados actualmente en cultivos de frutales, viñedos, hortalizas y pastos.

5.1.1.4. Determinación del número de curva.

En este trabajo se asignaron diferentes valores de Número de Curva (CN) para los diferentes tipos de cobertura y suelo, pues en la cuenca en estudio existen distintos tipos de suelos desde el punto de vista hidrológico, por lo que los valores de CN utilizados corresponden a cada uno de ellos con su respectiva cobertura, según Arnold *et al* (2009), el CN es una información requerida para determinar el flujo superficial, el modelo adopta el valor del (CN) para cada tipo de cobertura y solo un grupo hidrológico del suelo, pues utiliza para la asignación de sus valores la clasificación propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo (SCS). La determinación del número de curva para cada tipo de

suelo se realizó con los porcentajes de textura obtenidas en laboratorio y con la ayuda de la tabla Model description and User Guide for the BASIC versión II.

Tabla 8. Model description and User Guide for the BASIC versión II.

Código	Textura	Dap ^e (g/cc)	Cdc ^a (%)	Pmp ^b (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	GHS ^h	CN ^f
1	Arena	1.49	6.1	2.2	90	5	5	A	68
2	Arena-franca	1.49	8.4	3.7	80	15	5	A	68
3	Franco-arenosa	1.45	14.3	6.6	65	25	10	A	68
4	Franca	1.42	19.0	8.2	40	40	20	B	78
5	Franco-Limoso	1.32	25.0	10.1	25	60	15	B	78
6	Limoso	1.43	20.1	7.0	5	90	5	C	85
7	Franco-arcillo-arenosa	1.60	15.9	9.2	40	30	30	A	68
8	Franco-arcillosa	1.42	22.4	13.9	35	30	35	C	85
9	Franco-arcillo-limoso	1.40	26.1	14.9	10	35	55	C	85
10	Arcillo-arenosa	1.51	22.3	15.8	50	10	40	A	68
11	Arcillo-limoso	1.38	28.0	18.1	10	45	45	D	88
12	Arcillosa	1.39	28.5	19.6	30	20	60	D	88

^eDap: densidad aparente; ^aCdc: capacidad de campo; ^bPmp: punto de marchites permanente; ^hGHS: grupo hidrológico suelo; ^fCN: numero curva

Fuente. United States of Agriculture (1987).

El uso de esta tabla facilitó en la obtención de los resultados de CN en cada muestra textural obtenida en laboratorio, como también nos da un código para la identificación de muestra textural, teniendo cinco resultados.

Tabla 9. Resultados del número de curva, según los códigos texturales.

Id	Código	Textura USDA	Numero de curva
1	3	Franco Arenoso	68
4	8	Franco Arcillosa	85
3	7	Franco Arcillo Arenosa	68
2	4	Franco	78
5	12	Arcilla	88

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5.1.1.5. Resultados del manejo del programa SPAW (Soil, Plan, Atmosphere, Water Field And Pond Hydrology).

SPAW, es un modelo hidrológico diario de supuesto para los campos agrícolas y lagunas (humedales, lagunas, estanques y embalses). Se incluyen la programación del riego y del nitrógeno del suelo. La entrada de datos y los resultados son pantallas gráficas.

También tiene Soil Water Characteristics “Hydraulic Properties Calculator”, el programa calcula la capacidad de tensión de agua en el suelo, la conductibilidad y retención de agua basado en la textura del suelo, materia orgánica, el contenido de grava, la salinidad y la compactación.

Los datos obtenidos en laboratorio fueron agrupados e ingresados al programa SPAW para que genere la textura según el sistema inglés. Con esta información agregada al modelo también simuló el punto de marchites, capacidad de campo, saturación, disponibilidad de agua, conductibilidad de agua saturada y la matriz de la densidad de masa, siendo esta primordial información para el modelo SWAT.

Tabla 10. Resultados de programa SPAW.

ID	Textura	TEX	SAND	CLAY	SILT	GRAVEL	Punto de marchites	Capacidad de campo	saturación	Agua disponible	Conduc. Hidra. Saturada	Densidad de masa
TEX	USDA	SPAW	ARENA	ARCILLA	LIMO	GRAVA	%VOL	%VOL	%VOL	cm/cm	cm/hr	g/cm3
3	Franco Arenoso	SaL	65.5	19.5	14.9	37.79	12.9	21.8	44.5	0.07	0.45	1.71
8	Franco Arcillosa	CL	19.6	32.5	47.8	37.29	18.2	33.8	50.7	0.12	0.26	1.55
7	Franco Arcillo Arenosa	L	42.9	18.5	38.5	41.58	12.1	24.9	45.9	0.09	0.57	1.71
4	Franco	CLSa	43.0	17.5	39.4	32.4	11.7	24.6	45.6	0.1	0.71	1.63
12	Arcilla	C	26.1	45	28.9	34.51	25.2	38.6	52.1	0.11	0.13	1.5

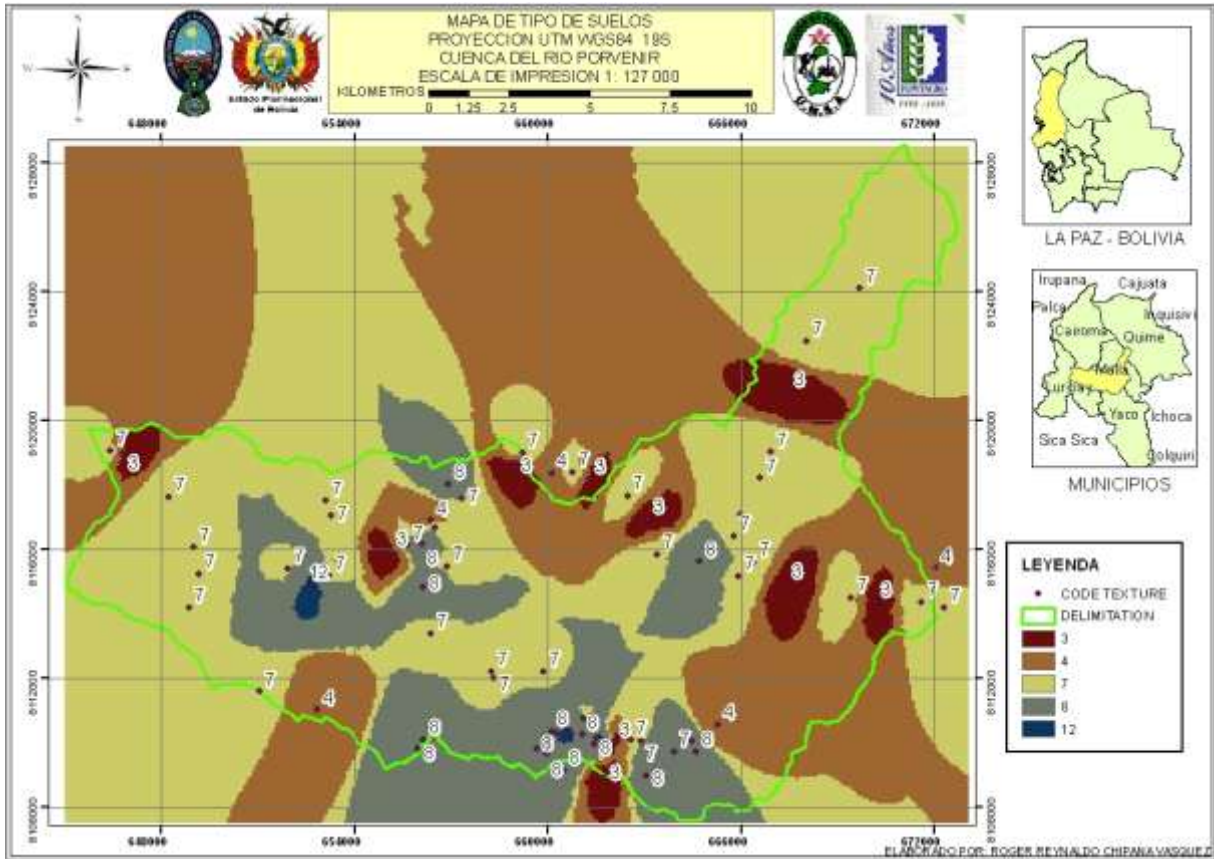
Fuente. Saxton (2006).

5.1.1.6. Resultado y pasos para la elaboración del mapa de tipo de suelo.

Para la elaboración del mapa de tipo de suelo se tuvieron que seguir varios pasos y manejo de extensiones del SIG como se denota a continuación:

- Se agregó la cuenca delimitada, los puntos texturales realizadas en campo y el mapa geológico.
- Se utilizó la extensión Geoestatical Analyst, usando el método Inverse Distance Weighting (IDW), de la cual en la pestaña database1 se incorpora los datos de los puntos texturales en input data y en la opción de atributos se le agrega el código textural. En la pestaña de validation se le agrega el mapa geológico y en la opción de atributos se le agrega el ID del mapa.
- Una vez creada este mapa se ajustó a la cuenca delimitada.
- Luego se le asignó sus rangos de códigos texturales.
- Posterior a ello se le convirtió en formato shp. Para poder agregar al mapa los códigos texturales.
- Como paso final se lo convirtió a formato GRID, para posteriormente agregarla al modelo SWAT.

Figura 6. Mapa de tipo de suelos con codificación textural, la cual fue generado por la extensión Geoestastical Analyst de ArcGis 9.3, esta se realizó en la cuenca del río Porvenir, el mapa presentado tiene una proyección UTM WGS84 Zona 19Sur.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5.1.1.7. Mapa geológico.

Las imágenes geológicas se obtuvieron del Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas (SERGEOTECMIN), obteniendo cada carta con su respectivo código:

- Carta 1: Ae-CGI-6042.
- Carta 2: Ae-CGN-6142.
- Carta 3: Ae-CGN-6143.

Las cartas geológicas vienen en formato JPEG; con grilla en UTM WGS84 zona 19 Sur. Cada carta se georeferenció con el programa ArcGis 9.3; para luego editarlas a Shapefile y tener un banco de datos correspondiente a la geología de la cuenca en estudio.

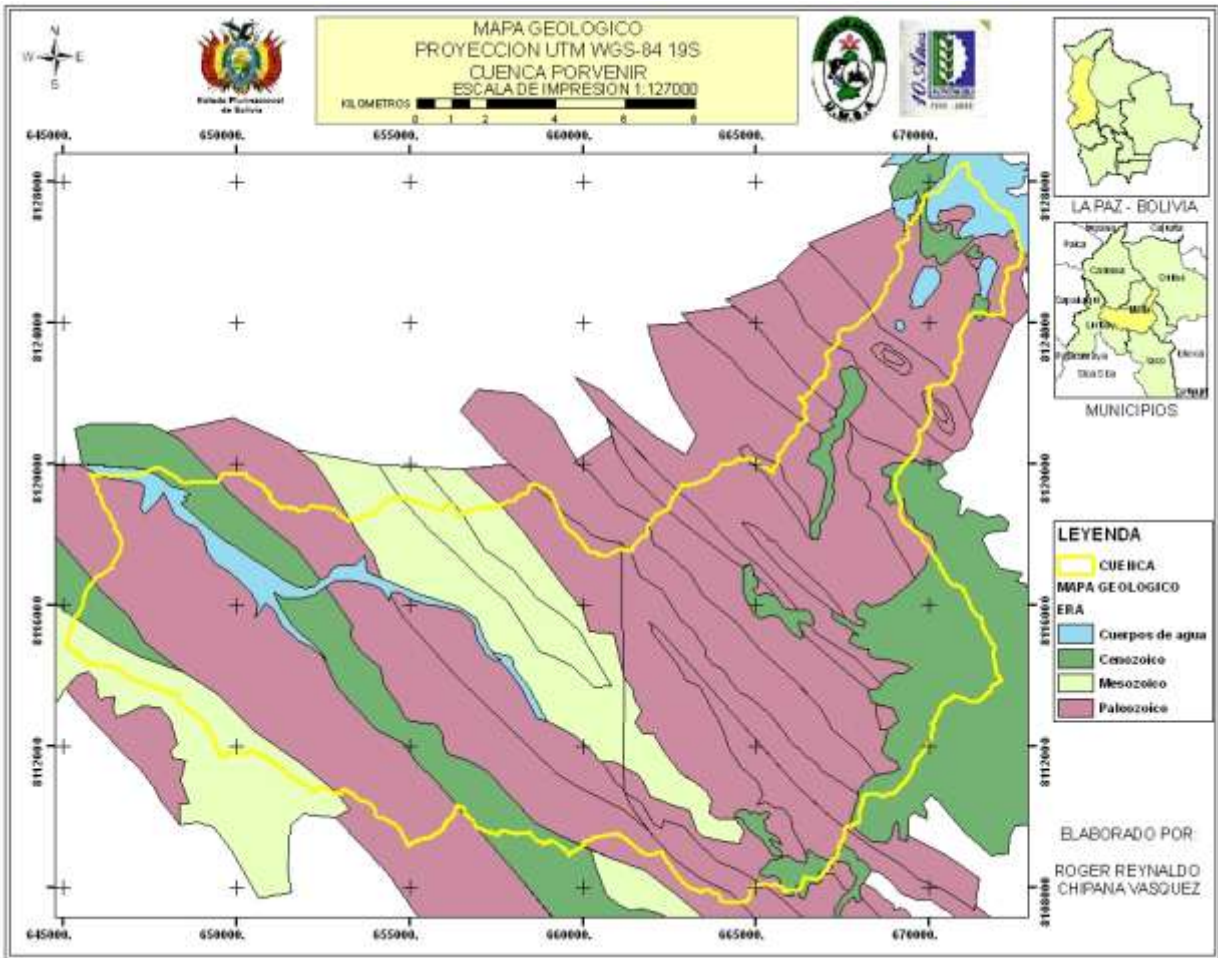
En el mapa geológico se cuenta con tres eras: cenozoico, paleozoico y mesozoico. También se tiene la información de siete sistemas: cretácico, cuaternario, devónico, jurasico, ordovícico, silúrico y terciario. En forma más detallada del mapa geológico se encuentra en el tipo estratificado, presentando 14 tipos de descripción geológica en la cuenca del río Porvenir, las cuales se describen en la tabla 11.

Tabla 11. Descripción estratificada del mapa geológico.

Cuenca	Estratificado
Alta	<p>Areniscas micaceas gris verdosas intercaladas con lutitas.</p> <p>Areniscas, areniscas cuarcíticas intercaladas por lutitas, limolitas, gris claras.</p> <p>Bloques, arenas y limos.</p> <p>Bloques, gravas y arcillas.</p> <p>Diamictitas marrones a gris verdosas, areniscas y limonitas micáceas en el tope.</p> <p>Intrusivo de granito (gn) y granodiorita (gd).</p> <p>Lutitas grises a verdosas, niveles de areniscas y limolitas verde olivo.</p> <p>Lutitas y limolitas grises a verdosas.</p>
Media	<p>Areniscas blanquecinas, amarillentas y rojizas con estratificación entrecruzada.</p> <p>Areniscas micaceas gris verdosas intercaladas con lutitas.</p> <p>Areniscas sacaroidales marrón rojizas.</p> <p>Bloques, arenas y limos.</p> <p>Bloques, gravas y arcillas.</p> <p>Calizas y areniscas calcáreas gris-amarillentas, margas verdes-violáceas.</p> <p>Conglomerados polimicticos marrón rojizas y lentes de areniscas.</p> <p>Gravas, arenas y arcillas.</p> <p>Gravas, arenas, limos y arcillas.</p> <p>Lutitas grises a verdosas, niveles de areniscas y limonitas verde olivo.</p> <p>Lutitas y limolitas grises a verdosas.</p>
Baja	<p>Areniscas sacaroidales marrón rojizas.</p> <p>Calizas y areniscas calcáreas gris-amarillentas, margas verdes-violáceas.</p> <p>Conglomerados polimicticos marrón rojizas y lentes de areniscas.</p> <p>Lutitas grises a verdosas, niveles de areniscas y limonitas verde olivo.</p>

Fuente. SERGEOTECMIN, 2010.

Figura 7. Mapa geológico editado en formato shapefile, el mismo presenta cuatro eras, esta se realizó en la cuenca del río Porvenir, el mapa presentado tiene una proyección UTM WGS84 Zona 19Sur.



Fuente. Elaboración Propia en base a los mapas geológicos de SERGEOTECMIN, 2012.

5.2. Resultados de la generación del mapa de uso de suelos.

El mapa de uso de suelos del área en estudio se generó con una imagen de alta resolución, la que se obtuvo mediante la extracción de imágenes en ikonos multiespectral con resolución de un metro por un metro del Google Earth Pro. La información se ajustó a la base de datos que dispone el SWAT de tal forma que los usos sean escogidos con base a los que ofrece el modelo. Además, sea lo más similares posible a los descritos en el mapa, los cuales representan los tipos de suelos existentes en la cuenca.

El mapa contiene cinco categorías que se encuentran diferenciados por sus características físicas, las que definen el comportamiento del agua que es receptada en el suelo. En la zona alta de la cuenca la categoría más sobresaliente de uso de suelo es la pastura, lagunas y nevado abarcando el municipio de Malla y parte del municipio de Yaco. En la zona media de la cuenca y por causa de la pendiente se encuentran predominantemente áreas arbustivas y en baja proporción de áreas de cultivos, abarcando los pueblos de Aroma, Valle unido y Bambarillo. En la zona baja se encontró cultivos de importancia económica y áreas arbustivas, estas son abarcadas por las poblaciones de Azambo, Chirrimalla y Porvenir.

En la tabla de datos contiene el código que representa cada una de las unidades de uso o cobertura, el código de la planta (CPNM): la cuarta letra codifica el crecimiento de la planta y las bases de datos urbanas que son usadas por la interfaz SIG, para unirse el uso de suelos/tipo de suelo al SWAT, al agregar nuevas especies de planta o categoría de capas de uso de suelo la cuarta letra del código debe ser único. Posteriormente el mapa generado se convierte en formato Grid, conteniendo su tabla adicional.

Tabla 12. Reclasificación de los usos del suelo según la tipología usada por SWAT.

Código de uso	Tipología de uso	Redefinición en SWAT	Código en SWAT
1	Frutales, viñedos, flores y verduras	Agricultural Land Row Crops	AGRR
2	Pasturas y arbustos menudos	Pasture	PAST
3	Arbustos y matorrales	Range grasses	RNGE
4	Nevados	Snow	SNOW
5	Laguna	Water	WATR

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5.2.1. Elaboración de la imagen en alta resolución.

Para la elaboración de la imagen en alta resolución se manejaron los programas de Google Earth Pro, Adobe Photo Shop y ArcGis 9.3. El resultado y detalle de la elaboración se describe a continuación:

- a) Las imágenes de alta resolución se obtuvieron del Google Earth Pro; en cuadros pequeños a una altura de 250 m estas imágenes tienen la característica de ser una imagen “Ikonos multiespectral” con resolución de un metro por un metro.
- b) Posterior a ello las imágenes obtenidas se unieron con el programa Adobe Photo Shop.
- c) Luego se guardó como imagen en formato JPEG; y por último la georeferenciación correspondiente con el programa ArcGis 9.3.

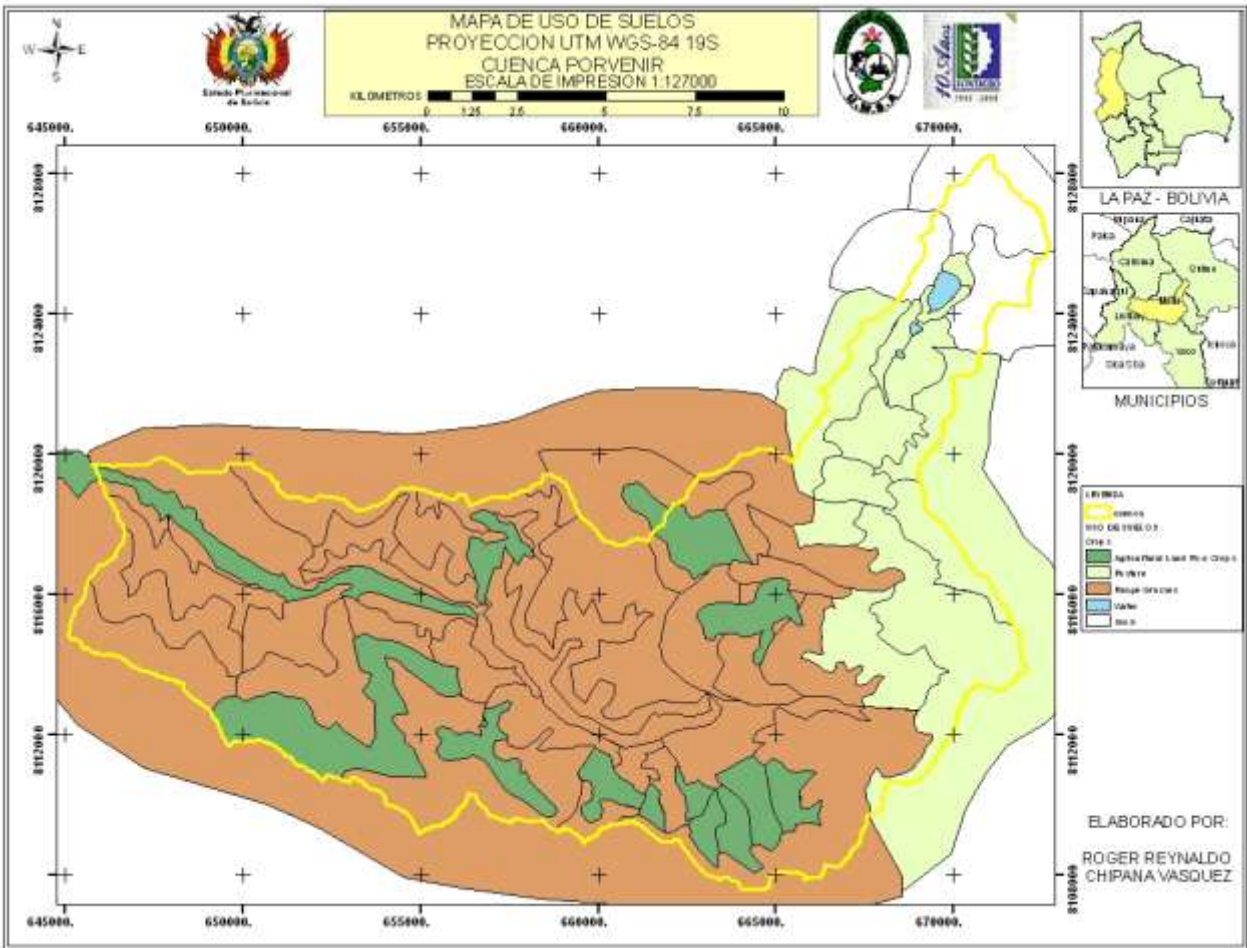
Las imágenes tomadas y el mapa resultante se muestran en el anexo B. Con la imagen de alta resolución se logró describir las aéreas de uso de suelos, el mapa generado es un requisito para el modelo SWAT.

5.2.2. Elaboración del mapa de uso de suelos.

En la generación del mapa de uso de suelos se siguieron pasos diferentes de las cuales se tuvieron que editar, crear en formato shp. Con posterior conversión del mapa en formato Grid, las cuales se detallan a continuación:

- Se agregó la imagen de alta resolución y la cuenca delimitada.
- Posterior a ello se creó áreas de uso de suelo, en formato shp, con su respectiva base de datos.
- Como paso final se lo convirtió a formato Grid.

Figura 8. Mapa de uso de suelos generado de un mapa de alta resolución. Además, presenta cinco tipos o usos de suelo, esta se realizó en la cuenca del río Porvenir a si mismo tiene una proyección UTM WGS84 Zona 19Sur.

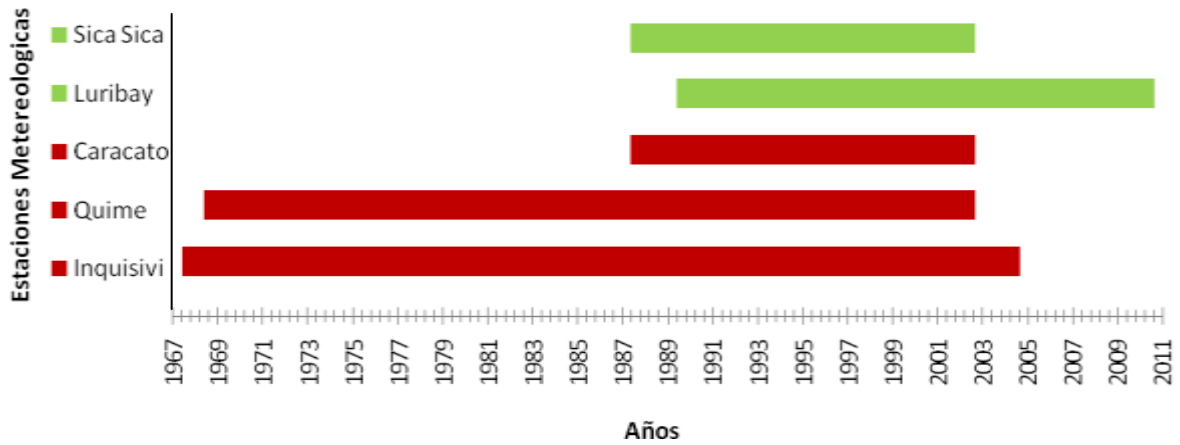


Fuente. Elaboración Propia, 2012

5.3. Procesamiento de la información climática.

Se contó con cinco estaciones meteorológicas provenientes del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), las cuales son: Luribay, Caracato, Sica Sica, Quime y Caxata, de las cuales dos estaciones Luribay y Sica Sica cuentan con información referente a la precipitación, temperatura, humedad relativa, asimismo, los restantes tres estaciones Caracato, Quime y Caxata solo cuentan con información de precipitaciones y a fin de alimentar la base de datos del generador de clima SWAT, se determinó el uso de la estación Luribay, por la distancia además de contener datos meteorológicos completos y presentar años históricos.

Gráfico 4. Cinco estaciones con datos de precipitaciones anuales de 1967 a 2011.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Las estaciones de Quime, Inquisivi y Caracato están de color rojo por que en estas se tienen datos de precipitaciones solamente. Con relación a las demás estaciones de Luribay y Sica Sica, son de color verde porque en estas se tienen datos meteorológicos históricos completos de precipitación, humedad relativa como también temperaturas máximas y mínimas.

Todas las estaciones presentan datos anuales de precipitaciones por ejemplo: Inquisivi tiene datos desde 1968 hasta 2004; Quime presenta datos desde 1969 hasta 2002; Carato posee datos desde 1988 hasta 2002; Luribay goza de datos desde 1990 hasta 2011 y Sica Sica ostenta datos desde 1988 hasta 2002. Pero es necesario hacer un estudio de las distancias de cada estación para verificar y comprobar cuál de las estaciones usar.

Tabla 13. Características de las cinco estaciones en distancia, elevación y provincia con relación a la cuenca del río Porvenir.

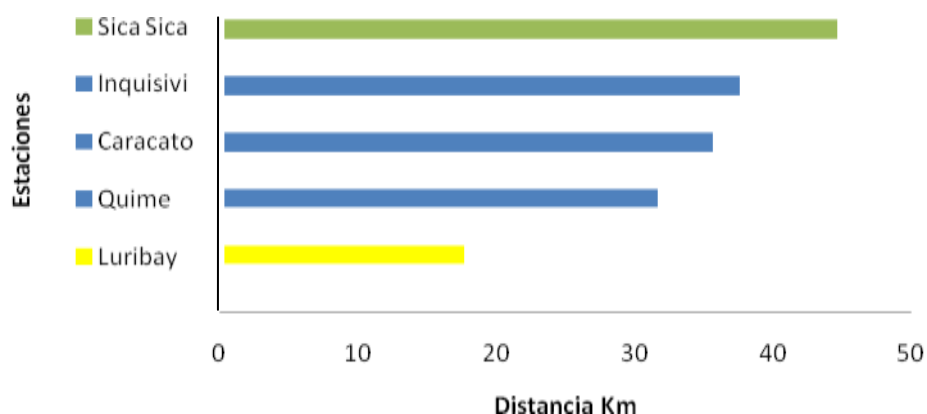
Estación	Distancia a la cuenca del río Porvenir Km.	Elevación msnm	Provincia
Caracato	35	2650	Loayza
Luribay	17	2575	Loayza
Quime	31	3190	Inquisivi
Inquisivi	37	2900	Inquisivi
Sica Sica	44	3917	Aroma – Oruro

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

La estación Caracato se encuentra a una distancia de 35 Km con relación a la cuenca Porvenir y con una altura de 2650 msnm y pertenece a la provincia Loayza, en cuanto a la estación de Quime se encuentra a una distancia de 31 Km con relaciona a la cuenca Porvenir y con una altura de 3190 msnm y corresponde a la provincia Inquisivi, ubicada al norte de la provincia Loayza.

Pero la estación de Inquisivi se encuentra a una distancia de 37 Km con relaciona a la cuenca Porvenir y con una altura de 2900 msnm y es concerniente a la provincia Inquisivi, ubicada al norte de la provincia Loayza.

Gráfico 5. Distancias de las estaciones con relación a la cuenca del río Porvenir.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

En cambio Sica Sica presenta una barra de color verde por que se encuentra a una distancia de 44 km con relaciona a la cuenca Porvenir y con una altura de 3917 msnm y es propia a la provincia de Aroma del departamento de Oruro.

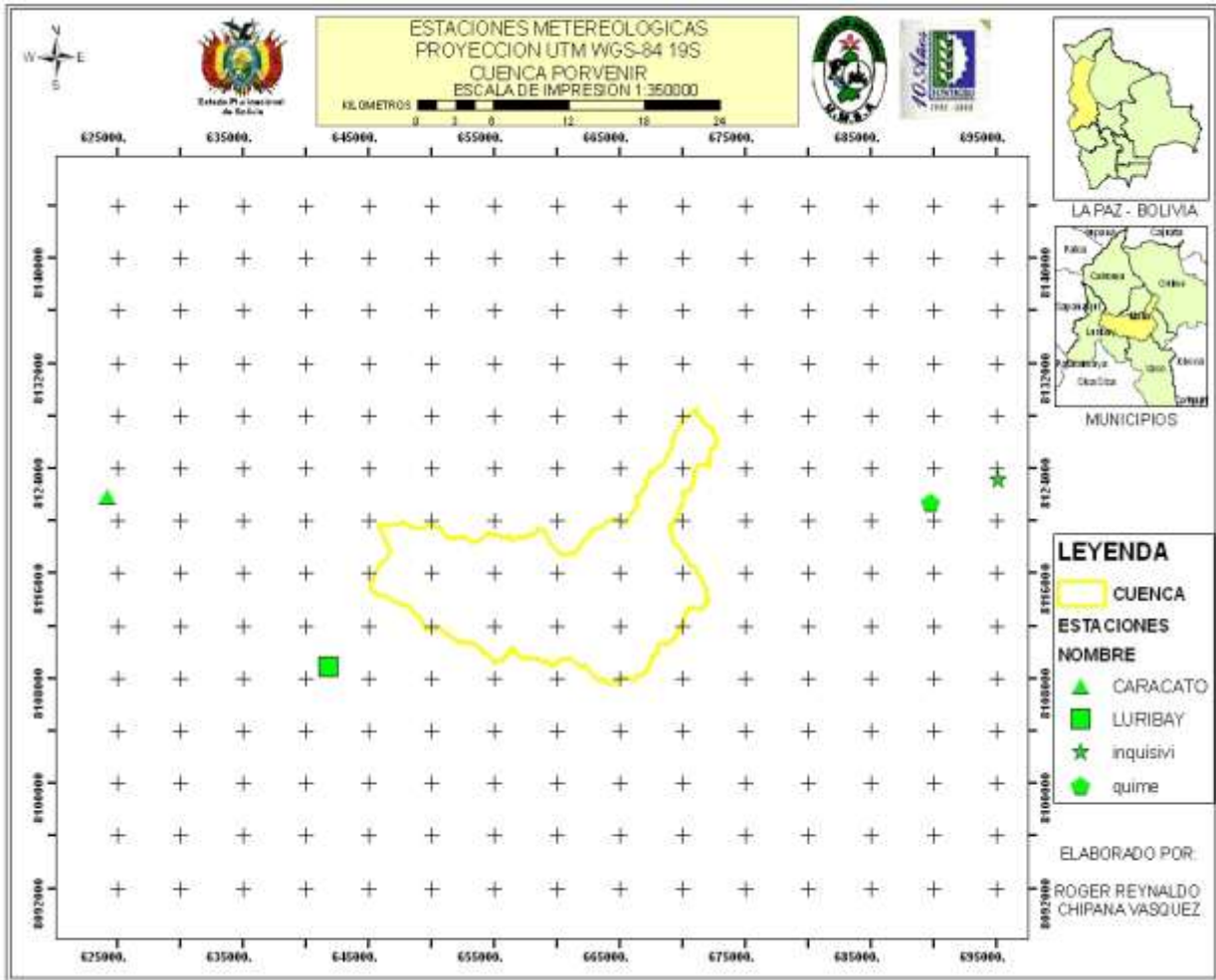
Por ello la estación de Luribay presenta un color amarillo por que se encuentra a una distancia de 17 km con relación a la cuenca Porvenir y con una altura de 2575 msnm y está relacionado con la provincia Loayza. Entonces la estación meteorológica que se agregó al modelo SWAT, es la de Luribay con la siguiente característica:

Tabla 14. Característica al ingresar al modelo SWAT.

Código SWAT	Estación	Coordenadas UTM	Altura metros
Wea43	LURIBAY	X = 642056 Y = 8108283	2575

Fuente. SENAMHI, (2009).

Figura 9. Mapa de ubicación de las cuatro estaciones meteorológicas, esta se realizó en la cuenca del río Porvenir, el mapa presentado tiene una proyección UTM WGS84 Zona 19Sur.

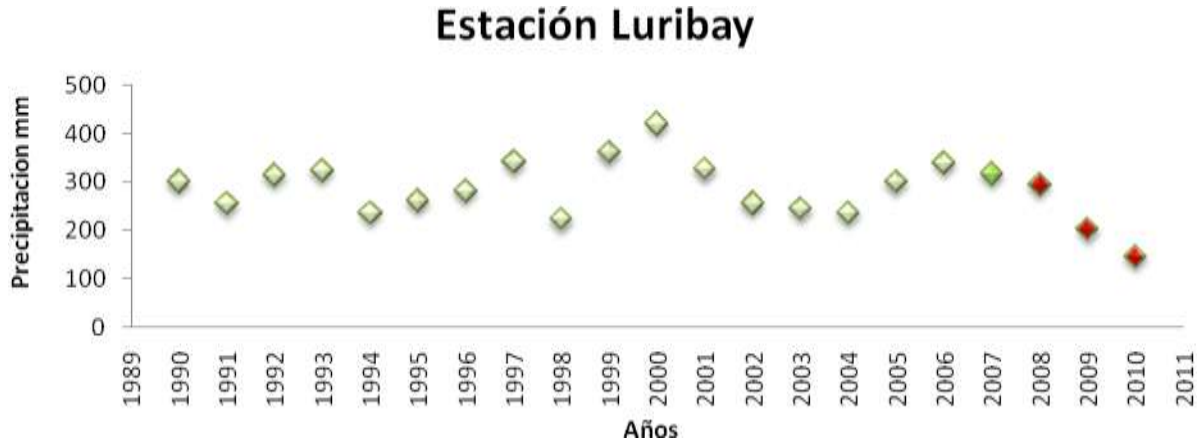


Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5.3.1. Datos de precipitación.

Posterior a la revisión de los datos diarios de precipitación de la estación Luribay, se utilizó un banco de datos que va desde el 1 de enero 1990 hasta el 15 de abril del 2011, los datos agregados están en formato .dbf, porque es uno de los formatos que reconoce el modelo SWAT.

Gráfico 6. Precipitación anual de la estación de Luribay con datos de 1989 a 2011. Presentando las columnas de color rojo no contienen datos completos, la precipitación máxima es de 420 mm y la mínima es de 224 mm.



Fuente. Elaboración propia en base a SENAMHI, 2010.

5.3.2. Relleno de series diarias.

La estación de Luribay presenta meses sin registros o bien con registros incompletos, debiendo destacarse que la ocurrencia de dichos problemas en la mayoría de los casos no fue simultánea, existiendo la posibilidad de emplear los registros de la estación o estaciones en funcionamiento para completar los datos de la estación con desperfectos en determinado día o mes.

La estación de Caracato fue empleada como estación de apoyo para el relleno de periodos en los que ninguna de las estaciones contaba con registros. No se empleó las estaciones de Sica Sica, Quime e Inquisivi, debido a su proximidad a la cuenca del río Porvenir.

Para rellenar los datos diarios de precipitación se empleó el método del U.S. National Water Service, que consiste en ponderar los valores registrados por las estaciones de apoyo por una cantidad W (distancia en kilómetros entre las estaciones) de la estación igual al recíproco de la distancia al cuadrado de cada estación vecina a la estación para la que se requiere estimar el valor de precipitación, la relación usada es:

$$P_x = \frac{\sum (P_i - W_i)}{\sum W_i} \text{ (Ecuación 3).}$$

Dónde:

P_x = Lluvia buscada (mm).

P_i = Precipitación registrada para la fecha por la estación i (mm).

W_i = $1/d^2$ siendo d la distancia en km. Entre la estación X y la estación i .

5.4. Características de las subcuencas.

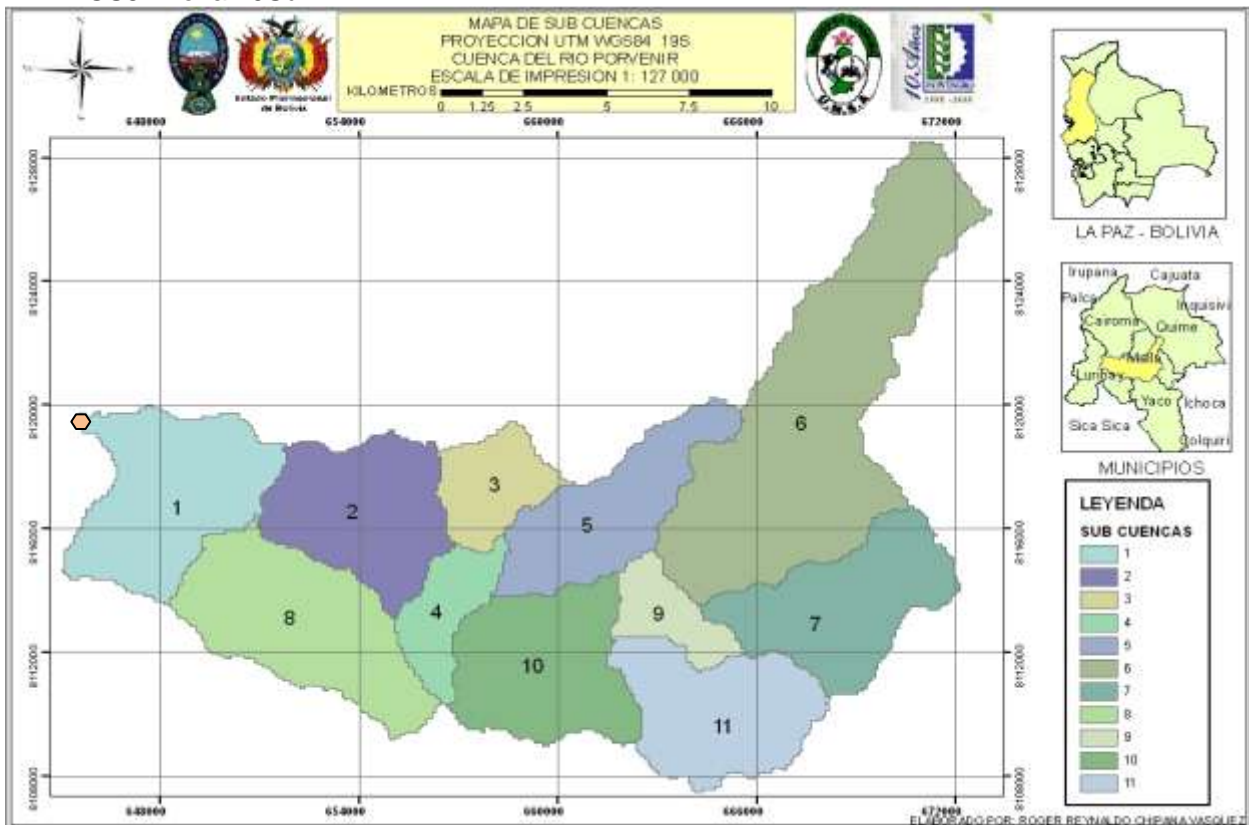
La cuenca se dividió en 11 subcuencas (figura 10), en la subcuenca 6 se presenta un nevado la cual es la fuente del río principal y es perteneciente a la zona altiplánica, en la subcuenca 1 tiene la característica de ser la parte final de la cuenca del río Porvenir donde todas las aguas desembocan en la misma, las subcuencas 5, 6, 7, 9, 10 y 11 pertenecen a la parte altiplánica pero las subcuencas 1, 2, 3, 4 y 8 son catalogadas como zonas de valle.

Tabla 15. Detalle de áreas, elevaciones máximas, mínimas y promedio en las once sub cuencas generadas por el modelo SWAT.

Subcuenca	Área (km ²)	Elevación promedio (m)	Elevación máxima (m)	Elevación mínima (m)
1	25.97	3090.26	3946	2443
2	22.10	3300.29	4026	2721
3	9.77	3813.18	4557	3011
4	8.80	3557.11	4206	2981
5	19.63	4120.27	4922	3123
6	58.08	4667.48	5623	3616
7	22.83	4451.26	5026	3618
8	27.76	3502.96	4276	2723
9	7.23	3922.57	4448	3425
10	23.27	3737.89	4359	3077
11	21.55	4117.78	4629	3476

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Figura 10. Mapa de sub cuencas generadas por el modelo SWAT la cual presenta once sub cuencas, esta se realizó en la cuenca del río Porvenir, el mapa presentado tiene una proyección UTM WGS84 Zona 19Sur.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5.5. Estudio de pendientes.

En la cuenca se realizó un estudio de pendientes en cuatro categorías de la cual se tienen los siguientes resultados en la tabla.

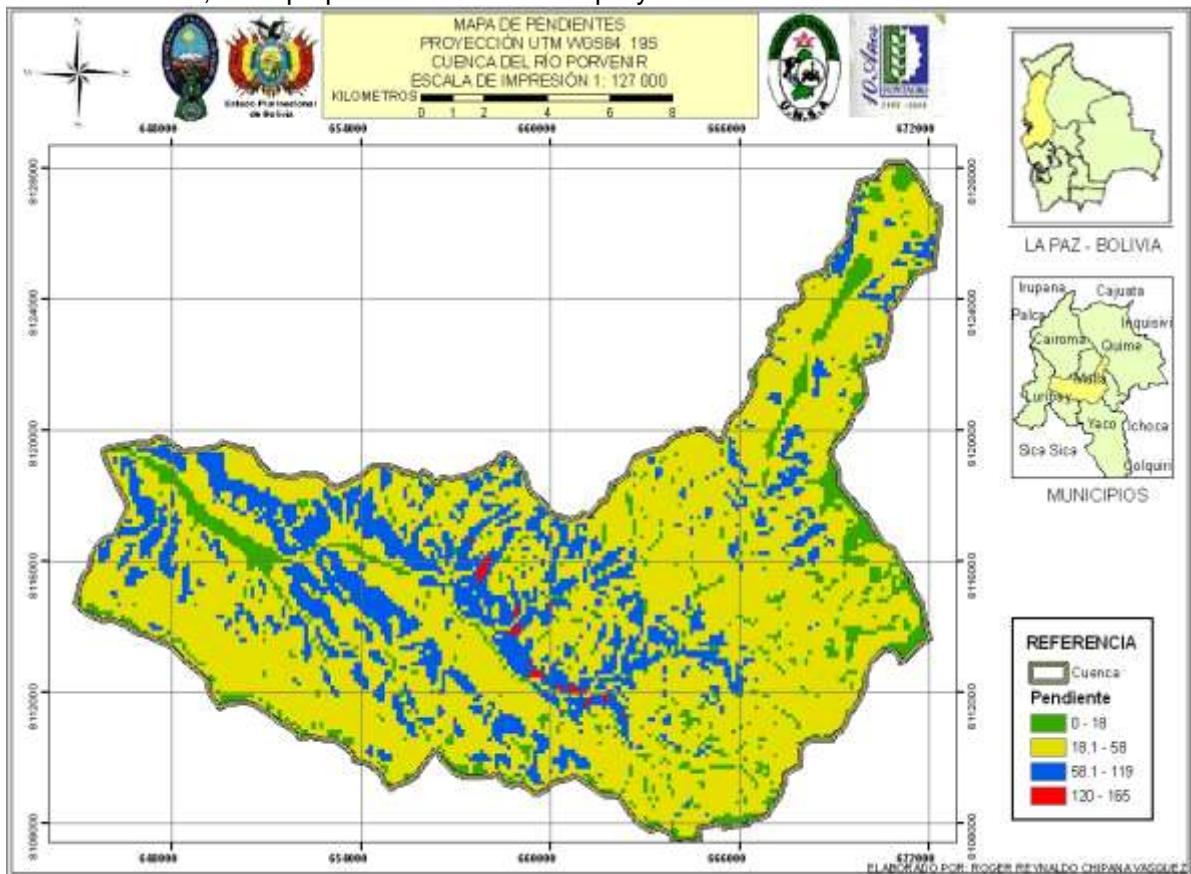
Tabla 16. Detalles de las pendientes en la cuenca del río Porvenir, generadas por el modelo SWAT.

Id	Área Km ²	Pendiente grados	Superficie %	Descripción
1	22.11	0 – 10	8.92	Suave
2	170.84	11 – 30	68.89	Moderada
3	53.90	31 – 50	21.73	Fuerte
4	0.89	51 - >	0.36	Escarpada

Fuente. Chapi, (2011).

De acuerdo a la tabla anterior las pendientes de forma escarpada en la cuenca del río Porvenir abarcan el 0.36% de la superficie total de la cuenca. Las pendientes fuertes abarcan el 21.73%, las pendientes moderadas llegan hasta el 68.89% y en cambio las pendientes suaves se encuentran en unos 8.92%. En el análisis de las pendientes se determinó que en la cuenca predominan las pendientes moderadas.

Figura 11. Mapa de pendientes generadas por el modelo SWAT, esta se realizó en la cuenca del río Porvenir, el mapa presentado tiene una proyección UTM WGS84 Zona 19Sur.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

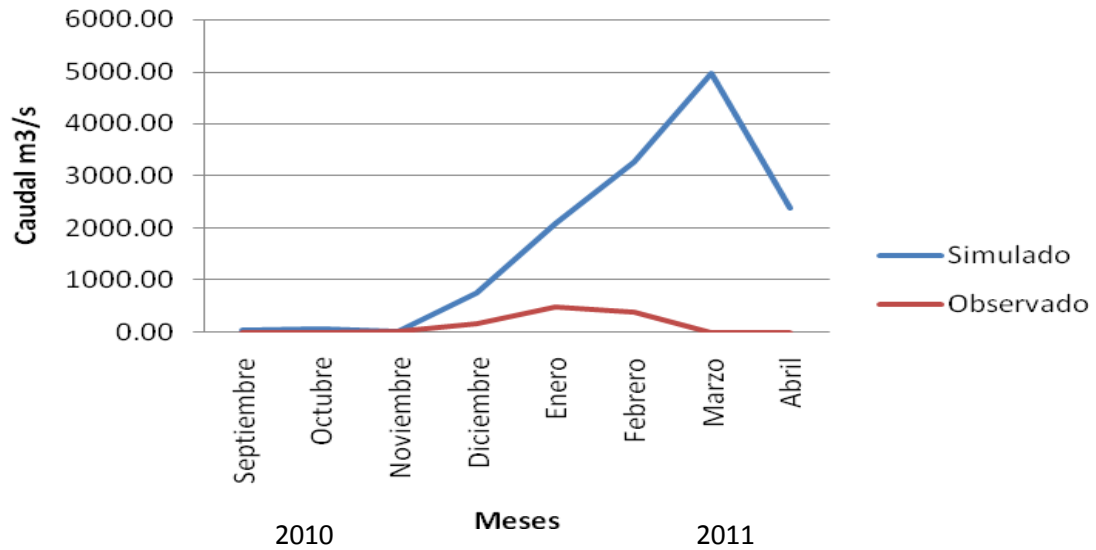
5.6. Caudales simulados vs observados.

Para el análisis de los caudales tanto simulados como observados se determinó una sección de control teniendo las coordenadas en UTM GWS84 19s de 645845 en "X" y 8119563 en "Y", esta se ubica en la subcuenca número 1 de la cuenca del río Porvenir.

Con la información ingresada en el modelo se realizaron las primeras corridas, obteniendo datos en milímetros de escorrentías simulados, estos datos se los convirtió en caudales simulados para poder comparar con los caudales reales y conocer como el modelo SWAT los estaba generando, del hidrograma resultante en el grafico 7, se puede observar que el caudal simulado está por encima del caudal observado, teniendo como resultado en el coeficiente de determinación $r^2=0.12$, esta indica que no existe una relación entre los caudales observados y simulados. El coeficiente de Nash-Sutcliffe es

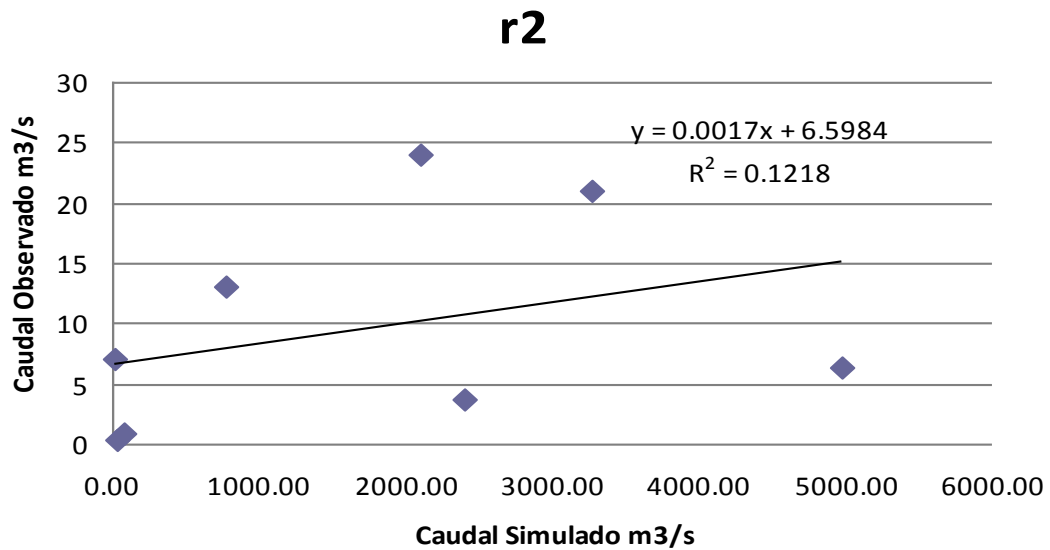
de $r^2_{ns} = -181.34$, según Arnold *et al*; (2009), el rango de rechazo del coeficiente es de $-\infty$ a 0.5 y por ello es necesario realizar la calibración del modelo.

Gráfico 7. Comparación de caudales simulados por el modelo SWAT con los caudales observados en campo.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Gráfico 8. Coeficiente de determinación con datos de los caudales observados vs los simulados en la primera corrida del modelo SWAT.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Tabla 17. Escorrentía simulada por el modelo SWAT convertida a caudal y caudal observado, periodo de calibración 2010 - 2011.

Serie	Año	Escorrentía	Caudal simulado	Caudal observado
		simulado mm	m ³ /s	m ³ /s
1	2010	0.34	32.40	0.42
2	2010	0.8	73.78	0.84
3	2010	0.21	20.01	7
4	2010	8.36	770.98	13
5	2011	22.72	2095.29	24
6	2011	32.06	3273.43	21
7	2011	53.92	4972.62	6.32
8	2011	25.11	2392.89	3.75

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5.7. Calibración y validación del modelo.

Realizada la primera corrida generalmente da a un error, por ello en las documentaciones estudiadas acerca del modelo SWAT recomiendan hacer la calibración y posterior validación de la misma para que el modelo sea aceptado (Vasquez, 2005).

5.7.1. Calibración.

La calibración es un proceso de ensayo y error de ajuste de parámetros, del hidrograma resultante en el gráfico 7, esta nos indica que el caudal no es simulado adecuadamente, por ello se siguieron los pasos de “SWAT Calibration Techniques” en Hydrologic Calibration Scenario 1 (Vasquez, 2005):

Primer paso: como se tiene datos erróneos o no confiables de precipitaciones entonces se siguieron los consejos del primer escenario de calibración “fallo en la simulación del modelo por los picos altos”, las cuales nos dicen lo siguiente:

- Resultado.

- La estación de precipitación no es representativa.
- No responde a tormentas localizadas.
- Mal funcionamiento de los años.

- Solución.

- Use los datos de precipitación representativos de estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca o área de estudio
- Revise cuidadosamente los datos de precipitación y el flujo de la duración en particular.
- Según Vásquez, (2008), indica que en la calibración se puede modificar los datos de precipitaciones, por ello se optó hacer la comparación de precipitaciones con las estaciones más cercanas a la cuenca, las cuales son: Caracato, Inquisivi, Quime y la estación que se encuentra en el interior de la cuenca “recién instalada por el Proyecto FONTAGRO el año 2010”, ubicada en la comunidad El Porvenir.

Segundo Paso: el pico de caudal simulado nos muestra que está muy por delante del pico del caudal observado, por ello se optó por seguir el escenario 3 de calibración “el flujo simulado sigue el patrón observado en los atrasos del flujo real consistentemente”

- Resultado.

- El tiempo de concentración es demasiado largo.
- Fallo en la pendiente actual para el flujo terrestre.
- Sobre estimado la superficie de rugosidad.
- Verifique los parámetros de derretimiento de la nieve.
- Verifique los coeficientes de flujo.

- Solución.
- Se decremento la pendiente (Slope por 0.045)

Tercer paso: Como se tiene caudales simulados altos con relación a los caudales observados, entonces se siguió el escenario 2 de calibración “predicción del modelo por encima del flujo”

- Resultado.
- Flujo en la superficie alto
 - Solución.
 - Se decremento los siguientes parámetros de calibración:
 - a) Coeficiente de percolación del acuífero (Rchrg_dp en un 0.95)
 - b) Capacidad de agua disponible al suelo (Sol_awc por 0.95)
 - c) Número de curva (CN2 por 0.73)
 - d) Factor de compensación de evaporación del suelo (ESCO por 0.7)
 - e) Conductibilidad hidráulica saturada (Sol_k por 0.45).

Tabla 18. Parámetros para la calibración en el modelo SWAT.

Símbolo	Parámetro	Rango	Valor final
Parámetros que gobiernan la respuesta de la superficie del agua			
Sol_awc	Capacidad de agua disponible al suelo	± 20%	0.95
Cn2	Numero de Curva	±20%	0.73
Esco	Factor de compensación de evaporación del suelo	0-1	0.7
Sol_k	Conductibilidad hidráulica saturada	0-1	0.45
Parámetros que gobiernan la respuesta subsuperficie del agua			
Rchrg_dp	Fracción de percolación de la profundidad del acuífero	0-1	0.95
Parámetros que gobiernan la respuesta de la cuenca			
Slope	Empinamiento común de la cuesta	± 2	0.045

Fuente. Manual del usuario del modelo SWAT 2009.

5.7.2. Validación.

Después de que cada parámetro ha sido ajustado, los caudales observados y simulados son validados empleando fórmulas para la estimación del error, esta nos sirve para la optimización de la función del objetivo por tanto en el presente estudio se aplicaron dos ecuaciones de validación las cuales son la correlación lineal “el rango es de 0 a 1, donde los valores están entre 0 a 0.5 el modelo se encuentra en zona de rechazo por tanto hay que verificar los parámetros nuevamente pero si se encuentra entre los 0.6 a 1 entonces el modelo es aceptable”, y el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe “ se utiliza para determinar la energía del modelo hidrológico, por tanto este método se puede utilizar para describir la exactitud predicativa del modelo mientras haya datos observados para comparar los resultados modelados o simulados, los rango de aceptación y rechazo son de 0 a 1, donde si se presentan con un 0 a 0.5 el modelo se rechaza y hay que verificar los datos nuevamente, pero si esta en 0.6 a 1 el modelo se acepta” (Nash 1970).

$$R2NS = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Sim_t - Obs_t)^2}{\sum_{t=1}^n (Obs_t - Obs_{prom})^2} \right] \quad \text{Ecuación 4 (Nash Sutcliffe).}$$

Dónde:

Sim= valores simulados

Obs= valores observados

Obs_{prom}= promedio de las observaciones

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{prom})(P_i - P_{prom})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{prom})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{prom})^2}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 5 (Correlación lineal).}$$

Dónde:

O = valor observado

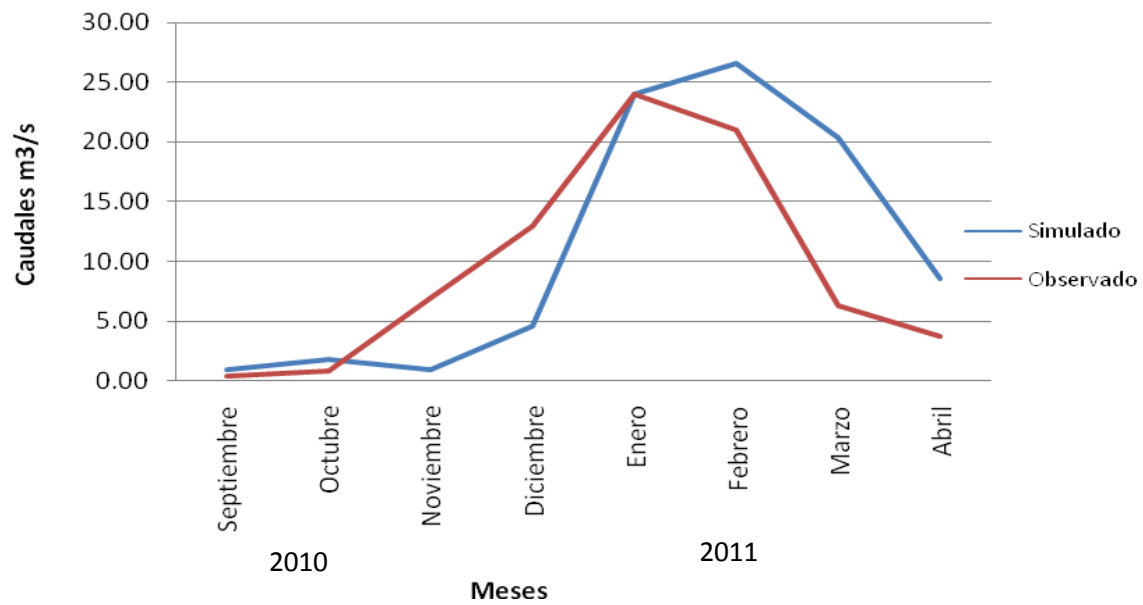
P = valor simulado

O_{prom} = promedio de las observaciones

P_{prom} = promedio de los simulados

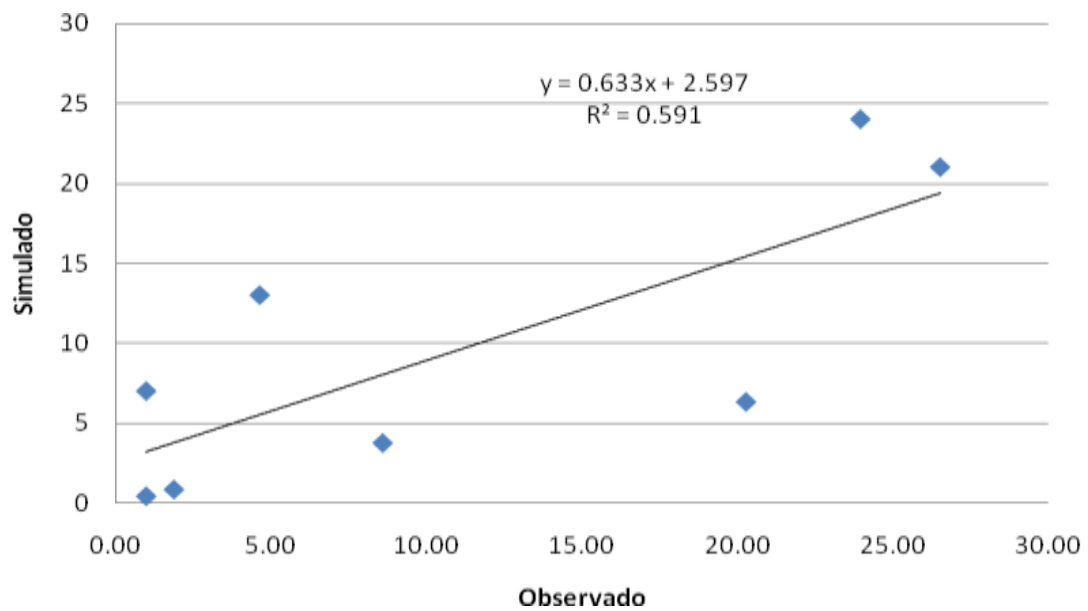
Con la calibración y validación de los caudales que reporta la salida del SWAT, para la cuenca del río Porvenir, puede visualizarse en el gráfico 9 donde se manifiesta la dinámica y magnitud de los caudales en forma mensual de los valores observados y los simulados por el modelo; en el gráfico también son apreciables los cambios en los meses de noviembre y diciembre del año 2010 donde los valores observados se muestran por encima de los simulados pero en los meses de febrero, marzo y abril del año 2011 los valores simulados están por encima de los observados, en la tabla 19 se muestran los valores de los caudales. No obstante, las variaciones mostradas son a pequeña escala en cuanto a los valores absolutos del caudal para la serie estudiada. En el gráfico 10 se muestra la regresión entre los valores totales de los caudales observados y los simulados, presentando claramente que mantienen buen ajuste, el análisis de regresión reporta un coeficiente de correlación $r^2=0.59$, revelando que el caudal simulado se compara favorablemente con los datos observados, los cuales son considerados como aceptables. Así mismo se calculó el coeficiente de Nash Sutcliffe, obteniendo un valor de $r^2_{ns}=0.96$ el mismo está en el rango de aceptabilidad del modelo.

Gráfico 9. Caudal calibrado por el modelo SWAT.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Gráfico 10. Coeficiente de determinación calibrado.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Tabla 19. Datos calibrados de escorrentía simulada por el modelo SWAT convertida a caudal y caudal observado, periodo de calibración 2010 - 2011.

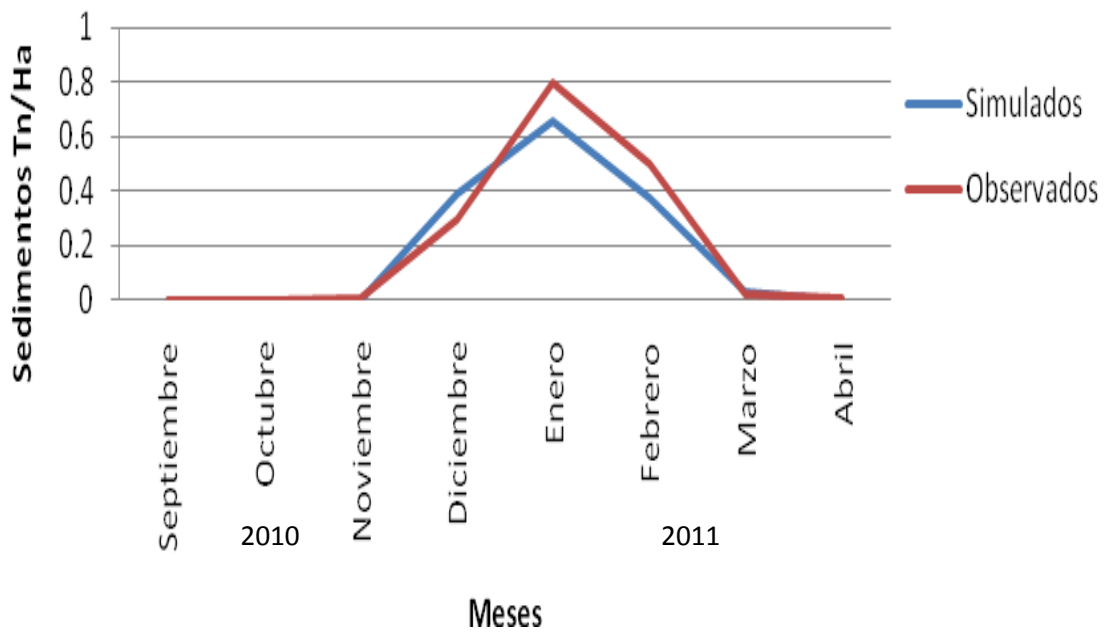
Serie	Año	Escorrentía simulado mm	Caudal simulado m ³ /s	Caudal observado m ³ /s
1	2010	0.01	0.95	0.42
2	2010	0.02	1.84	0.84
3	2010	0.01	0.95	7
4	2010	0.05	4.61	13
5	2011	0.26	23.98	24
6	2011	0.26	26.55	21
7	2011	0.22	20.29	6.32
8	2011	0.09	8.58	3.75

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

5.8. Sedimentos simulados vs observados.

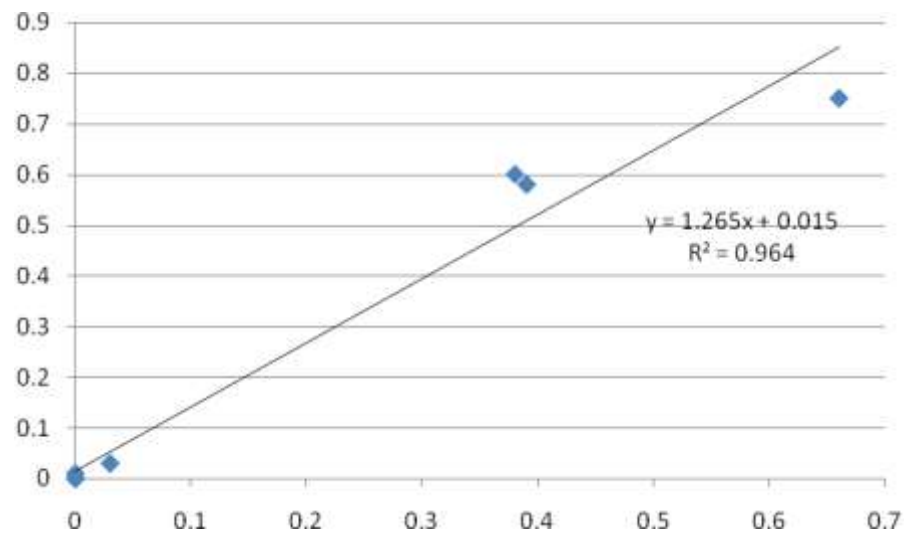
En el grafico 11, se observar que hay una similitud entre las curvas de sedimentos de lo simulado como las observadas, la curva de los sedimentos simulados se muestra por encima de los observados en los meses de noviembre a diciembre del 2010 mientras en los meses de enero a marzo del 2011, los valores observados están por encima de los simulados, en la tabla 20 se muestran los valores de los sedimentos, la diferencia entre las curvas tiene un coeficiente de determinación $r^2=0.96$ presentando un buen ajuste en el modelo como se puede ver en el grafico 12. Así mismo se calculó el coeficiente de Nash Sutcliffe, obteniendo un valor de $r^2_{ns}=0.82$ el mismo está en el rango de aceptabilidad del modelo.

Gráfico 11. Sedimentos simulados por el modelo SWAT.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Gráfico 12. Coeficiente de determinación.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Tabla 20. Sedimentos observadas y simuladas, periodo de calibración 2010 - 2011.

Serie	Año	Sedimento observada Tn/ha	Sedimento simulado Tn/ha
1	2010	0	0
2	2010	0	0
3	2010	0	0
4	2010	0.58	0.39
5	2011	0.75	0.66
6	2011	0.6	0.38
7	2011	0.03	0.03
8	2011	0.01	0

Fuente. Elaboración Propia, 2012.

6. CONCLUSIONES.

De acuerdo a los resultados obtenidos con el modelo SWAT en la cuenca del río Porvenir se tienen las siguientes conclusiones:

- La simulación de 8 series en escurrimientos con el modelo SWAT en la cuenca del río Porvenir nos muestra que en los meses de enero a marzo del año 2011 hay mayor presencia de escurrimiento con un promedio de 0.25 mm como también en los meses de setiembre a diciembre del año 2010 hay menor escurrimiento en un promedio de 0.022 mm y en promedio total de las 8 series simuladas se tiene un 0.12 mm en escurrimiento.
- En la simulación de los sedimentos se tiene que en los meses de septiembre a noviembre del años 2010 aporta con 0 Tn/ha, mientras que en el mes de diciembre del 2010 hasta los meses de enero a marzo del 2011 presentan un promedio de 0.35 Tn/ha y en promedio total de las 8 series simuladas de sedimentos se tiene un 0.18 Tn/ha.
- Los escurrimientos en mm mostrados por el modelo SWAT, se las cambio a caudales (m^3/s), esta con el objetivo de analizar, comparar, calibrar y validar, con los caudales observados.
- En proceso de la calibración para los caudales se manejaron parámetros que gobiernan el flujo superficial, el flujo subsuperficial y respuesta de la cuenca.
- Posterior a la calibración de los caudales simulados se realizó la validación de los resultado, presentando un coeficiente de determinación $r^2=0.59$ y el coeficiente de Nash Sutcliffe $r^2_{ns}=0.96$ los resultados obtenidos en la validación nos dice que el modelo es óptimo y que los datos son confiables.
- Los sedimentos mostraron una aceptabilidad del modelo en el proceso de validación pues los resultados en el coeficiente de determinación presentaron un $r^2=0.95$ y en el coeficiente de Nash Sutcliffe $r^2_{ns}=0.98$.
- Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo SWAT en la cuenca del río Porvenir son importantes pues los cuales son de mucha importancia en un proyecto hidrológico como también en proyectos de riego, los sedimentos que se producen pueden afectar a la vida útil de presas futuras a aplicar en la cuenca, como también

permite predecir el impacto que originan las prácticas de manejo del suelo en el curso del agua. Estos datos deben ser interpretados correctamente de manera que los tomadores de decisiones puedan planificar de mejor manera en base a la información que se les proporciona.

7. SUGERENCIAS.

- Se sugiere generar escenarios en los que se simulen situaciones planteadas por el usuario, con la finalidad de comparar la situación real con posibles cambios climáticos que afectarían al futuro en la producción de agua en la cuenca del río Porvenir.
- Se sugiere realizar estudios en el derretimiento de la nieve en los nevados que se encuentra en la cuenca del río Porvenir, esta nos lleva a analizar que en el país existen pocos estudios necesarios que aclaren lo que está sucediendo con la reducción de los glaciares de los nevados en Bolivia.
- Teniendo en cuenta la carencia de datos que existe en el país como son las precipitaciones diarias, caudales medidos y otros parámetros hidrológicos. Se sugiere instalar más estaciones meteorológicas.
- Se sugiere seguir haciendo estudios similares a este en otras cuencas, en pos de obtener bases para establecer los planes de manejo pertinente.

8. BIBLIOGRAFÍA.

- Arnold, J; Allen, P. 2009. A comprehensive surface-ground water flow model hydro. p. 47- 69.
- Arnold, J; Allen, P; Skipworth, W. 2002. Assessment of bedrock channel erosion in urban watersheds. J. Amer. Water resour. p. 1477-1492
- Chapi, N. 2011. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tools) en la cuenca de Mizque. MMA y A. La Paz, Bolivia. p. 15
- Chanasyk, D. 2003. Hydrology applied soil physics reclamation water quality (en línea). consultado 20 mar. de 2011. disponible en www.ualberta.ca/~chanasyk/contact.html
- Chavarri, E. 2008. Métodos de análisis en ingeniería de recursos hídricos: recursos hídricos - orientación ingeniería de los recursos hídricos. Escuela de Post Grado. Maestría, Universidad Nacional Agraria "La Molina". p. 55 - 57
- Chilón, E. 2008. Gestión integrada de recursos hídricos y manejo integral de cuencas: la cuenca y el manejo integrado de la cuenca. Post Grado en Ciencias del Desarrollo, Diplomado – UMSA. La Paz, Bolivia. 116 p.
- Chow, V. 2000. Hidrología aplicada. Ed. E Suarez. (correo electrónico). p. 12-14
- Failache, N. 2010. En Programa de formación Iberoamericana en materia de aguas: algoritmos de calibración de modelos hidrológicos de simulación continua. Montevideo, Uruguay. p. 50-52.
- Gallo, V. 2008. Gestión integrada de recursos hídricos y manejo integral de cuencas. Diplomado. UMSA. La Paz, Bolivia. 31 p.
- García, E. 2008. La cuenca y el manejo integrado de la cuenca: gestión integrada de recursos hídricos y manejo integral de cuencas. Diplomado, UMSA. La Paz, Bolivia. p. 6

- Gavilanes, C. 2004. Construcción de escenario para una propuesta de redelimitación de la reserva ecológica el Ángel usando como herramienta un sistema de información geográfica. Facultad de Ingeniería Geográfica. Ecuador. p. 77
- Luna, J. 2009. Transporte de sedimentos: puertos y vías navegables. (correo electrónico). p. 4
- Maidment, D; Williams, J; Arnold, J. 1994. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. s.l. p. 171-183
- MMAyA. 2010. Conservación y mejoramiento del ambiente y los recursos naturales en Bolivia. La Paz, Bolivia. p. 18
- Monteith, J. 1965. Evaporation and the environment: in the state and movement of water in living organisms. XIXth symposium. Cambridge university press.
- Morris, G. 2005. Plan de Desarrollo Municipal de Luribay (correo electrónico). La Paz, Bolivia
- OMM. 1994. Manual on operational methods for the measurement of sediment transport: informe de hidrología operativa número N°29. Ginebra, Suiza. 560 p.
- Musgrave, G. 1955. How much rain enters the soil: year book of agriculture, Washington. p. 151-159
- Nash, J; Sutcliffe, V. 1970. Pronóstico del flujo del río a través de modelos conceptuales parte I- una discusión de principios, diario de la hidrología. (en línea). consultado 20 sept. de 2010. disponible en www.wikipedia.com/doc.nash_shutcliffe.
- Neitsch, S. 2000. Soil water assessment tool. Grass land, Soil land water research laboratory o agricultura research service. s.l. User manual 2000. 781 p.

- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Williams, J; King, K. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentación: version 2000. Texas water resources institute, college station, TX.
- Paredes, F; España, R. 2010. Estimación del número de curvas de escurrimiento a partir de imagenes satelitales Sport 5 en los llanos centrales de Venezuela. Rev. 25-28, Unell. Cienc. Tec. p. 28
- Parra, J; Montenegro, E. 2007. Aplicación del modelo SWAT 2000 para la determinación de caudales mensuales. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. 100 p.
- Ponce, V. 1989. Apuntes de hidrologia: modelos hidrológicos. Edit. Prentice Hall. p. 20
- Priestly, C; Taylor, R. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large- scale parameters: monthly weather. Rev. p. 81-92
- Proaño, O; Unda, B. 1995. Aplicación del modelo de simulación hidrológica SWRRB (simulador de recursos hídricos en cuencas rurales) en la cuenca hidrográfica del Ecuador. Ecuador. p. 60
- Proaño M, Gavilanes C, Valenzuela P, Cisneros C. 2006. Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato. Proyecto Cuencas Andinas – CODESAN-GTZ. Ecuador. p. 32
- Reuter, H; Nelson, A. 2007. Una evaluación de métodos nulos de interpolación del terreno para datos SRTM. Publicación internacional de ciencia geográfica de información. p. 983-1008.
- Saxton, K. 2006. SPAW (en línea). consultado 20 ener. de 2011. disponible en <http://www.ars.usda.gov/ba/anri/hrsl/ksaxton>

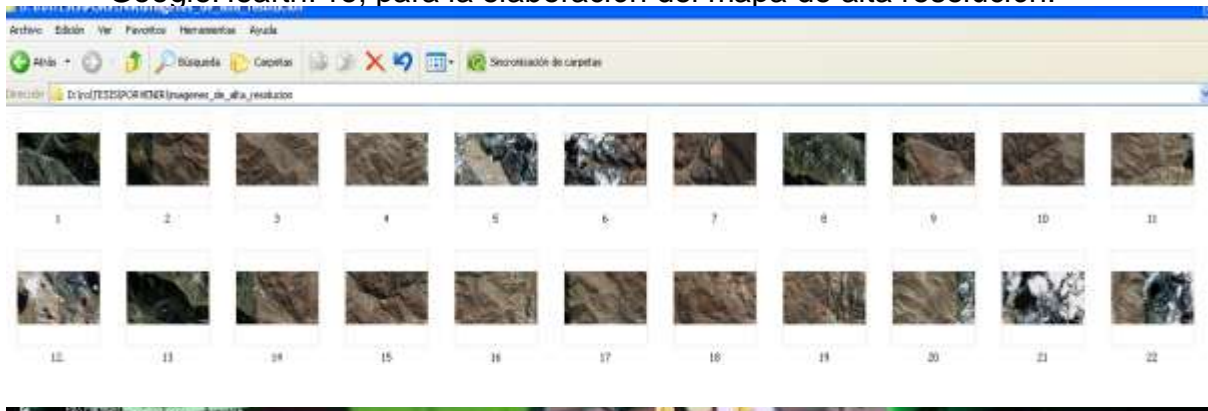
- Segura, E; Alvarado, E; Rosas, J. 2010. Gestión integral y adaptativo de recursos ambientales para minimizar vulnerabilidad al cambio climático en Micro cuencas alto andinas. Cusco, Perú. p. 57
- SENAMHI. 2010. Datos meteorológicos e hidrológicos (planillas de registro mensual e historico).
- SERGEOTECMIN. (2005). Servicio nacional de geología y técnico (cartas geológicas).
- Torre, E; Fernández, D. 2003. Aplicación del modelo matemático de simulación hidrológica SWAT en la cuenca " El tejocote". (en línea). Estado de Mexico. consultado 20 ago. de 2010. disponible en www.chaping.mx/terra/contenido/22/4/437.
- Van Griensven, A; Meixner, T. 2006. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. Water Sci. Tech. p. 51-59
- Vasquez, G. 2005. Modelos hidrológicos de simulación aplicados a cuencas rurales. Calibración y validación uso del simulador climático (análisis de riesgo). (correo electrónico). p. 30
- Vasquez, G. 2010. Evaluación de los Cambios en la productividad del agua frente a diferentes escenarios climáticos en distintas regiones del Cono Sur. Taller, modelación hidrológica. p. 15
- Vega, D. 2004. Vertederos de pared delgada, rectangular y triangular: estructuras de medición de caudal en serie. Cochabamba, Bolivia. p.28
- Williams, J; Berndt, H. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Trans. ASAE. p. 4-6
- ZONISIG. 2001. Zonificación agroecológica y establecimiento de una base de datos y red de sistemas de información geográfica en Bolivia. República de Bolivia. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. Vice Ministerio de

Planificación Estratégica y Participación Popular. Dirección General de Planificación y Ordenamiento Territorial. La Paz, Bolivia.

Zorrilla, S. 1997. Introducción a la metodología de la investigación. Ed. León y Cal . Mexico. p. 25

ANEXOS

ANEXO A. Toma de imágenes a una altura de 250 m del programa GoogleHearthPro, para la elaboración del mapa de alta resolución.

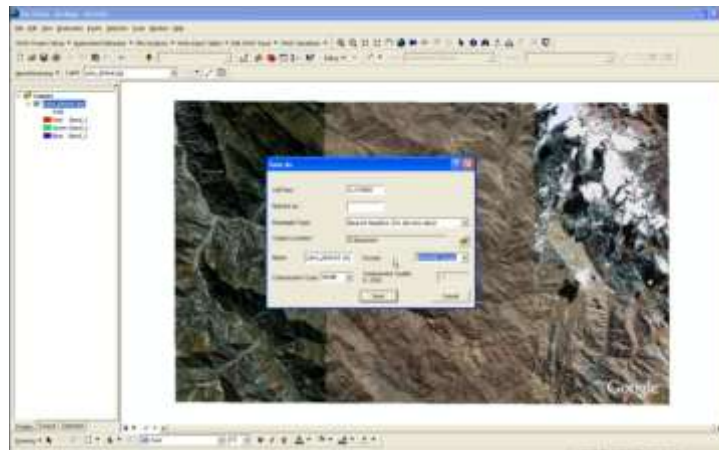


Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Realización de un cuadrado para ubicar puntos de referencia en el programa Google Earth Pro.

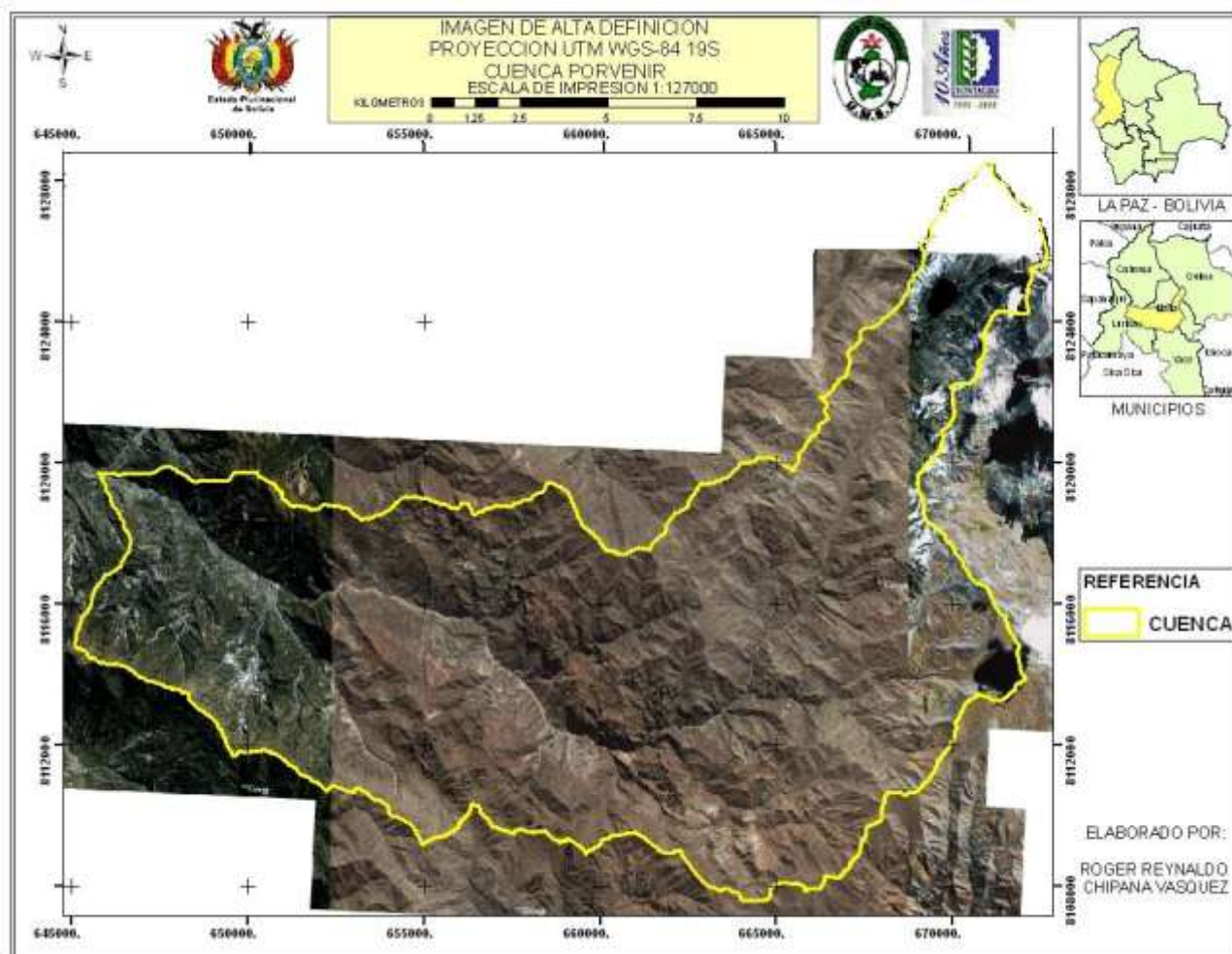


Ubicación de los puntos para la georeferenciación y posterior guardado de la misma, realizado en el programa ArcGis 9.3.



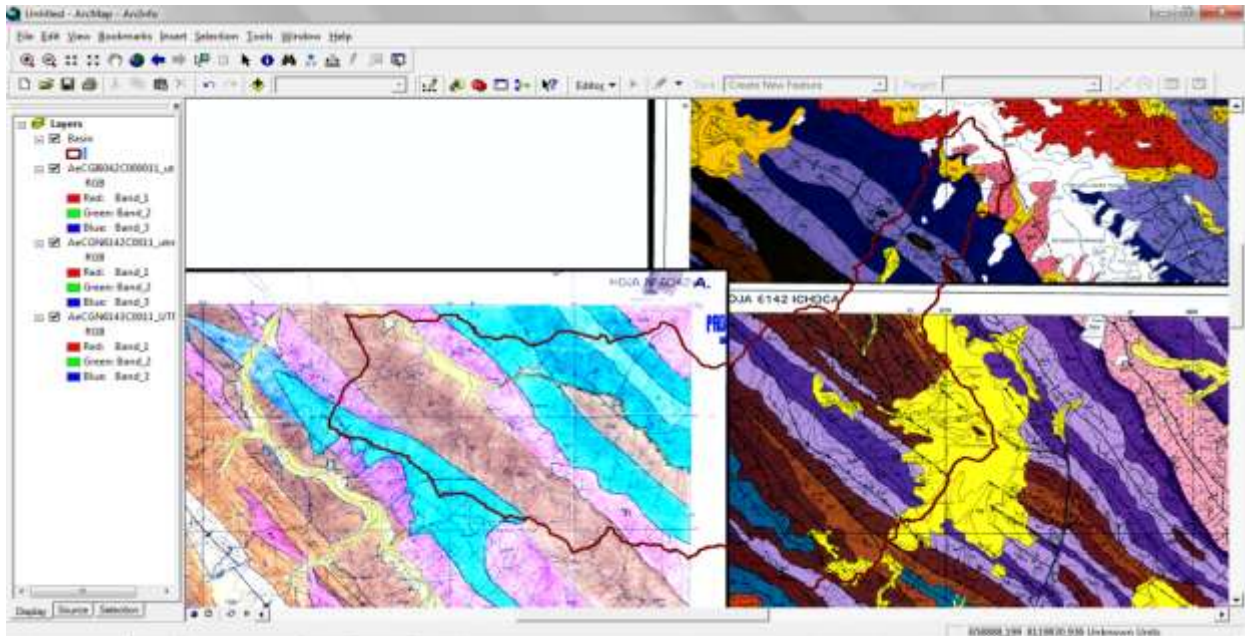
Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Anexo B. Mapa de alta resolución.



Fuente. Elaboración Propia, 2012.

Anexo C. Imagen geológica georeferenciado.



Fuente. SERGEOTECMIN.

Anexo D. Resultados del análisis de suelos, el proceso se realizó en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés.

MUESTRA	Arcilla	Arena	Limo	Clase textural	Grava
	%	%	%		%
A-14	15.6	70.4	14	FRANCO ARENOSO	29.82
BAR 25	19.7	66.4	13.8	FRANCO ARENOSO	48.27
BAR 3,B	22.4	48.24	29.3	FRANCO	21.74
BAR 3.A	17.8	54.4	27.7	FRANCO ARENOSO	3.08
BAR 31	18.8	73.6	7.6	FRANCO ARENOSO	53.67
M-12	17.7	60.4	21.8	FRANCO ARENOSO	41.78
M-14	17.7	54.4	27.8	FRANCO ARENOSO	43.46
M-22	19.7	54.24	26	FRANCO ARENOSO	41.36
M-3	17.6	70.4	12	FRANCO ARENOSO	55.03
M-8	19.6	60.24	20	FRANCO-ARENOSO	39.66
A-1	35.6	24.4	39.9	FRANCO ARCILLOSO	55.7
A-10	27.7	34.24	38	FRANCO ARCILLOSO	62.51
A-11	33.8	40.4	25.7	FRANCO ARCILLOSO	28.17
A-15	33.7	36.4	29.8	FRANCO ARCILLOSO	34.26
A-17	35.7	36.4	27.8	FRANCO ARCILLOSO	24.64
A-2	27.6	44.24	28.1	FRANCO ARCILLOSO	37.39
A-20	33.7	42.4	23.8	FRANCO ARCILLOSO	24.85
A-3	33.7	42.4	23.8	FRANCO ARCILLOSO	42.88
A-4	31.7	38.4	29.8	FRANCO ARCILLOSO	32.71
A-7	31.6	40.4	27.9	FRANCO ARCILLOSO	37.95
A-8	31.6	40.4	27.9	FRANCO ARCILLOSO	50.52
BAR 17	32.4	30.24	37.3	FRANCO ARCILLOSO	37.98
BAR 21	38.4	44.4	17.2	FRANCO ARCILLOSO	39.72
BAR 22	35.7	36.4	27.8	FRANCO ARCILLOSO	36.37
BAR 4	32.4	38	29.6	FRANCO ARCILLOSO	20.04
BAR 5	37.2	39.6	23.2	FRANCO ARCILLOSO	19.85
M-16	34.4	26.4	39.2	FRANCO ARCILLOSO	48.42
A-12	19.7	54.4	25.8	FRANCO ARCILLO ARENOSA	22.22
A-13	22.5	59.6	17.8	FRANCO ARCILLO ARENOSA	38.21
A-5	29.6	52.4	17.9	FRANCO ARCILLO ARENOSA	19.02
A-9	21.7	50.4	27.8	FRANCO ARCILLO ARENOSA	25.84
BAR 1	26.4	48.24	25.3	FRANCO ARCILLO ARENOSO	14.26
BAR 10	26.4	54.24	19.3	FRANCO ARCILLO ARENOSO	32.61
BAR 11	28.4	56.4	15.2	FRANCO ARCILLO ARENOSO	29.28
BAR 12	22.4	60.24	17.36	FRANCO ARCILLO ARENOSO	45.23
BAR 13	32.8	49.6	17.6	FRANCO ARCILLO ARENOSO	38.03
BAR 14	26.4	60.24	13.3	FRANCO ARCILLO ARENOSO	16.37
BAR 15	30.4	54.16	15.4	FRANCO ARCILLO ARENOSO	54.04
BAR 16	30.8	53.6	15.6	FRANCO ARCILLO ARENOSO	68.49
BAR 18	28	50.4	21.6	FRANCO ARCILLO ARENOSO	38.48
BAR 19	20.4	62.4	17.2	FRANCO ARCILLO ARENOSO	39.63
BAR 2	23.7	58.4	17.8	FRANCO ARCILLO ARENOSO	12.34

BAR 20	30.4	50.24	19.3	FRANCO ARCILLO ARENOSO	31.4
BAR 24	20.8	65.6	13.6	FRANCO ARCILLO ARENOSO	66.23
BAR 26	20.2	70	9.76	FRANCO ARCILLO ARENOSO	52.35
BAR 27	20.2	66	13.7	FRANCO ARCILLO ARENOSO	68.6
BAR 29	24.6	55.6	19.7	FRANCO ARCILLO ARENOSO	46.23
BAR 30	26	58.4	15.6	FRANCO ARCILLO ARENOSO	52.24
BAR 32	22.4	64.24	13.3	FRANCO ARCILLO ARENOSO	63.47
BAR 7	24.2	48	27.7	FRANCO ARCILLO ARENOSO	30.98
BAR 8	28.4	50.24	21.3	FRANCO ARCILLO ARENOSO	31.54
BAR 9	27.2	65.6	7.2	FRANCO ARCILLO ARENOSO	18.75
M-1	21.7	68.4	9.84	FRANCO ARCILLO ARENOSA	56.5
M-11	23.6	48.4	28	FRANCO ARCILLO ARENOSA	40.04
M-13	21.6	68.4	10	FRANCO ARCILLO ARENOSA	21.33
M-15	21.7	50.48	27.76	FRANCO ARCILLO ARENOSA	61.15
M-2	23.7	54.4	21.84	FRANCO ARCILLO ARENOSA	62.99
M-21	26.4	54.32	19.2	FRANCO ARCILLO ARENOSA	47.66
M-23	21.7	62.24	16	FRANCO ARCILLO ARENOSA	50.78
M-24	21.7	50.4	27.8	FRANCO ARCILLO ARENOSA	45.88
M-4	27.7	60.4	11.8	FRANCO ARCILLO ARENOSA	41.25
M-5	20.4	58.24	21.3	FRANCO ARCILLO ARENOSA	46.94
M-6	25.7	48.4	25.8	FRANCO ARCILLO ARENOSA	27.31
M-7	27.8	54.4	17.7	FRANCO ARCILLO ARENOSA	66.44
M-9	25.6	64.4	9.92	FRANCO ARCILLO ARENOSA	55.95
A-6	20.6	47.6	31.7	FRANCO	38.33
BAR 23	23.7	40.4	35.8	FRANCO	52.75
BAR 6	26	46.4	27.6	FRANCO	18.5
M-10	19.7	48.24	32	FRANCO	38.53
M-20	15.7	52.4	31.8	FRANCO	13.9
A-16	45.7	26.4	27.8	ARCILLA	28.28
A-18	41.6	36.24	22.1	ARCILLA	45.45
A-19	57.6	12.4	29.9	ARCILLA	19.22
BAR 28	44.4	30	25.6	ARCILLA	45.1
CH1 (SOKUOOSANE)	44.1	32.4	23.4	ARCILLA	48.14
CH2 (CERRO LAURANE)	42.4	32.24	25.3	ARCILLA	41.25
IGOR	40.8	31.6	27.6	ARCILLA	34.34
LUCIO	33.1	45.6	21.2	FRANCO ARCILLOSO	59.59
P 1	20.2	70.4	9.36	FRANCO ARCILLO ARENOSO	49.9
PO 2	26	36.4	37.6	FRANCO	35.62
TOKOPAMPA 2	29.7	42.4	27.84	FRANCO ARCILLOSA	15.23
WILLY	42.4	18.24	39.3	ARCILLA	20.3

Ing. Roberto Miranda C.
 DOCENTE EDAFOLOGÍA
 RESP. LABORATORIO DE SUELOS.

Anexo E. Instalación de la estación meteorológica, por el proyecto FONTAGRO.



Pluviómetro



Anemómetro



Pluviómetro de la estación



Panel solar y antena

Anexo F. Guías que colaboraron en la obtención de las muestras de suelo en la cuenca del río Porvenir.



Comunidad Azambo



Comunidad Bambarillo



Comunidad Condoriri



Comunidad Rodeo



Comunidad Umalaco



Comunidad Asiriri



Comunidad Qenturani



Comunidad Porvenir



Lucio Villca



Profesores de Bambarillo



Comunidad Aroma

Anexo G. Aforos realizados en la parte alta, media y baja de la cuenca del río Porvenir.



Parte media



Parte alta



Parte baja

Anexo H. Análisis de suelo en el laboratorio de la Facultad de Agronomía



Medida del químico



Probetas en reposo



Incorporación del suelo



Material químico y general para el análisis de suelo.

Anexo I. Paisaje de pendientes en la cuenca del río Porvenir.



Sendas con caídas y pendientes abruptas, se encuentra generalmente en la parte media de la cuenca del río Porvenir.



Las pendientes son caracterizadas entre fuertes a escarpadas estas se encuentran en la parte baja y media de la cuenca del río Porvenir.



En las pendientes se encuentra vegetación suculenta.

Anexo J. Ríos, nevados y barrenaciones en la cuenca del río porvenir.



La cuenca presenta aproximadamente 5 afluentes



El río principal tiene como fuente el deshielo del nevado.



Equipo de trabajo



muestra de suelo con barreno

Anexo K. Resultados del programa wgnMAKER 4.1.

The following tables represent the data shown in the screenshots:

Table 1: STATION

	STATION	WADITHUS	WLONGWLE	WVGLU	WAIN_90	WTHPUS	WTHUS2	WTHPUS	WTHPUS4	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS
Wagnool	3 sample	11.85	-85.09	179.3	10	11.7	13.5	18.3	23.8	27.6	32.3	34.8	34.9	
Wagnool	4 wca42	11.83	-85.92	179.3	10	11.48	13.54	18.31	21.61	27.61	32.31	34.87	34.93	
Wagnool	21 wca80	11.85	-85.95	179.3	10	11.65	13.54	18.32	21.62	27.61	32.32	34.87	34.93	
Wagnool	22 wca80	11.85	-85.95	179.3	10	11.65	13.54	18.32	21.62	27.61	32.32	34.87	34.93	
Wagnool	(Medio)	64734	810205	2575	0	14.29	24.26	28.95	26.82	34.21	24.96	23.52	25.08	

Table 2: WADITHUS

	WADITHUS	WLONGWLE	WVGLU	WAIN_90	WTHPUS	WTHUS2	WTHPUS	WTHPUS4	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS
Wagnool	18.2	11.9	5.9	1.2	7.26	0.94	4.47	4.74	3.98	3.41	3.27	3.38	4.44
Wagnool	18.17	11.9	5.69	1.21	7.36	0.94	4.47	4.74	3.98	3.41	3.27	3.38	4.44
Wagnool	18.19	11.9	5.63	1.21	7.36	0.94	4.47	4.74	3.98	3.41	3.27	3.38	4.44
Wagnool	18.19	11.9	5.69	1.21	7.36	0.94	4.47	4.74	3.98	3.41	3.27	3.38	4.44
Wagnool	13.1	12	13.86	13.3	2.72	2.58	2.23	1.91	1.84	2.06	2.22	2.34	2.25

Table 3: WLONGWLE

	WLONGWLE	WVGLU	WAIN_90	WTHPUS	WTHUS2	WTHPUS	WTHPUS4	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS
Wagnool	0.19	0.47	6.1	5.58	5.59	4.63	3.72	2.76	2.06	2.24	1.96	5.46	5.42
Wagnool	0.19	0.47	6.1	5.58	5.59	4.63	3.72	2.76	2.06	2.24	1.96	5.46	5.42
Wagnool	0.19	0.47	6.1	5.58	5.59	4.63	3.72	2.76	2.06	2.24	1.96	5.46	5.42
Wagnool	0.19	0.47	6.1	5.58	5.59	4.63	3.72	2.76	2.06	2.24	1.96	5.46	5.42
Wagnool	2.19	2.4	1.8	2.45	1.8	1.82	2.32	2.95	2.05	2.19	1.87	1.82	1.94

Table 4: WVGLU

	WVGLU	WAIN_90	WTHPUS	WTHUS2	WTHPUS	WTHPUS4	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS
Wagnool	72.5	89.8	120	129.2	93.1	81.9	66.4	83.6	87.9	81.3	77.1	12.7	14.2
Wagnool	72.5	89.8	120	129.2	93.1	81.9	66.4	83.6	87.9	81.3	77.1	12.7	14.2
Wagnool	72.5	89.8	120	129.2	93.1	81.9	66.4	83.6	87.9	81.3	77.1	12.7	14.2
Wagnool	72.5	89.8	120	129.2	93.1	81.9	66.4	83.6	87.9	81.3	77.1	12.7	14.2
Wagnool	47.78	32.59	7.67	4.07	5.06	4.71	8.37	11.25	14.65	20.81	47.78	4.4	3.9

Table 5: WAIN_90

	WAIN_90	WTHPUS	WTHUS2	WTHPUS	WTHPUS4	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS	WTHPUS
Wagnool	27.78	24.29	19.05	18.51	16	22.1	20.32	19.56	16.2	2.28	2.27	0.91	0.94
Wagnool	27.8	24.3	19	18.5	16	22.1	20.3	19.6	16.1	2.21	2.27	0.91	0.94
Wagnool	27.8	24.3	19	18.5	16	22.1	20.3	19.6	16.1	2.21	2.27	0.91	0.94
Wagnool	27.8	24.3	19	18.5	16	22.1	20.3	19.6	16.1	2.21	2.27	0.91	0.94
Wagnool	1.22	1	1.13	0.89	1.47	1.44	1.82	2.58	3.88	2.45	1.48	3.99	7.2

Anexo L. Resultados del programa SWAT.

```
swat_calibrado_Pr_Porvenir - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
SWAT April '6 VER 2010/Rev. 433
General Input/output section (file.cio):
03/03/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV
Annual summary for watershed in year 1 of simulation
UNIT      WATER      SED
TIME      YIELD      YIELD
          (mm)      (t/ha)
   9      0.01      0.00
  10      0.02      0.00
  11      0.01      0.00
  12      0.05      0.39
2010      0.09      0.39
SWAT April '6 VER 2010/Rev. 433
General Input/output section (file.cio):
03/03/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT interface AV
Annual summary for watershed in year 2 of simulation
UNIT      WATER      SED
TIME      YIELD      YIELD
          (mm)      (t/ha)
   1      0.26      0.66
   2      0.26      0.38
   3      0.22      0.03
   4      0.09      0.00
2011      0.83      1.07
```