

Empleo de Sistemas de Información Geográfica, Datos de Sensoramiento Remoto y Fuentes de Acceso Libre Global, como herramienta para modelar agua, energía y cambio climático en Bolivia

Using Geographic Information Systems, Remote Sensing and Data Sources Global Open Access as a tool to model water, energy and climate change in Bolivia

Fernando Arturo Ledezma Perizza¹

¹Docente Investigador Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón Doctorante en Energía y Desarrollo-UMSSM.Sc. Geoinformatics - ITC Universidad Twente-Holanda,Diplomado en Ingeniería del Petróleo y Gas natural-UPB. Ingeniero Civil de la Universidad Técnica de Oruro FNI-UTO

E-mail: fernandoledezma.p@gmail.com

Resumen: Los modelos de evaluación hídrica generalmente empleados, requieren de bastante información. El Estado Plurinacional de Bolivia cuenta con una diversa geografía espacial, misma que es difícilmente representada por las estaciones meteorológicas que colectan datos de forma puntual, en muchos casos no se encuentran en formato digital, o presentan discontinuidad en las series conformadas o conforman un periodo en años muy corto; lo no permiten hacer una predicción al momento realizar la evaluación de recursos hídricos o de calibrar modelos.El presente artículo se aplica una moderna metodología como alternativa ante la escasa información de la red meteorológica y cobertura espacial, que emplea los Sistemas de Información Geográfica, fuentes de acceso global de datos libres y productos de sensoramiento remoto de los satélites aplicada al estudio de la determinación del potencial hidroeléctrico regional de sitios posibles. Presenta resultados obtenidos de la modelación hidrológica superficial realizada a nivel nacional empleando el modelo Soil and WaterAssessmentTool, con escenarios proyectados de cambio climático al 2050 y da conocer información general en las áreas de agua, energía y cambio climático en Bolivia.

Palabras Clave: Potencial Hidro-energético, Cambio Climático, Sistemas de Información, Geográfica, Datos de Acceso Global, Sensores Remotos

Abstract: Water assessment models generally employed, require enough information. The Plurinational State of Bolivia has a diverse spatial geography, same which is hardly represented by the weather stations that collect data in a timely manner, in many cases they are not in digital format, or have discontinuity in the series formed or make a period short years, it does not allow a prediction when the evaluation of water resources or calibrate models. This paper a modern methodology as an alternative to the limited information of the meteorological network and spatial coverage, which employs GIS, global sources of free data access products and satellite remote sensing applied to study applies the determination of regional hydroelectric potential of possible sites. Presents results of surface hydrological modeling undertaken at national level using the model Soil and Water Assessment Tool, with projected climate change scenarios to 2050 and gives general information found in the areas of water, energy and climate change in Bolivia.

Keywords: Hydro Power Potential, Climate Change, Geographic Information Systems, Global Data Access, Remote Sensing

1 Introducción

El cambio climático se ha convertido en un tema de gran relevancia a nivel mundial, debido a la interconexión de partes que se ven afectadas y el desafío que este plantea para ser solucionado. Ningún país está libre, ni puede por sí solo afrontarlo ya que exige decisiones políticas y consecuencias mundiales de gran alcance. Para hacer frente a este desafío inmenso, creatividad y cooperación entre todos es requerida. Se debe actuar en común acuerdo ahora, porque el cambio climático es una crisis de los bienes comunes, de lo que hagamos hoy dependerá el clima de mañana y las opciones que configurarán nuestro futuro.

Para resolver el problema de cambio climático se requiere acción inmediata en todos los países y una adecuada planificación en los sistemas energéticos, esto es una significativa mejora en la eficiencia energética y un cambio decidido hacia las energías de producción limpia. Se debe pensar en un enfoque de “cambio climático inteligente” ya que las necesidades climáticas del mañana nos obligarán a construir una infraestructura que pueda resistir a las nuevas condiciones sustentando a un número mayor de personas y suministrándoles alimentos suficientes.

Se puede señalar que la demanda de agua ya excede la provisión en muchas partes de mundo y debido al crecimiento poblacional sus necesidades se multiplican. La Figura 1:a muestra que para el 2050, se tendrá un incremento de aproximadamente un 50% en la población mundial[1]. La Figura 1:b presenta los sitios de escasez de agua que actualmente existen en el mundo [2].

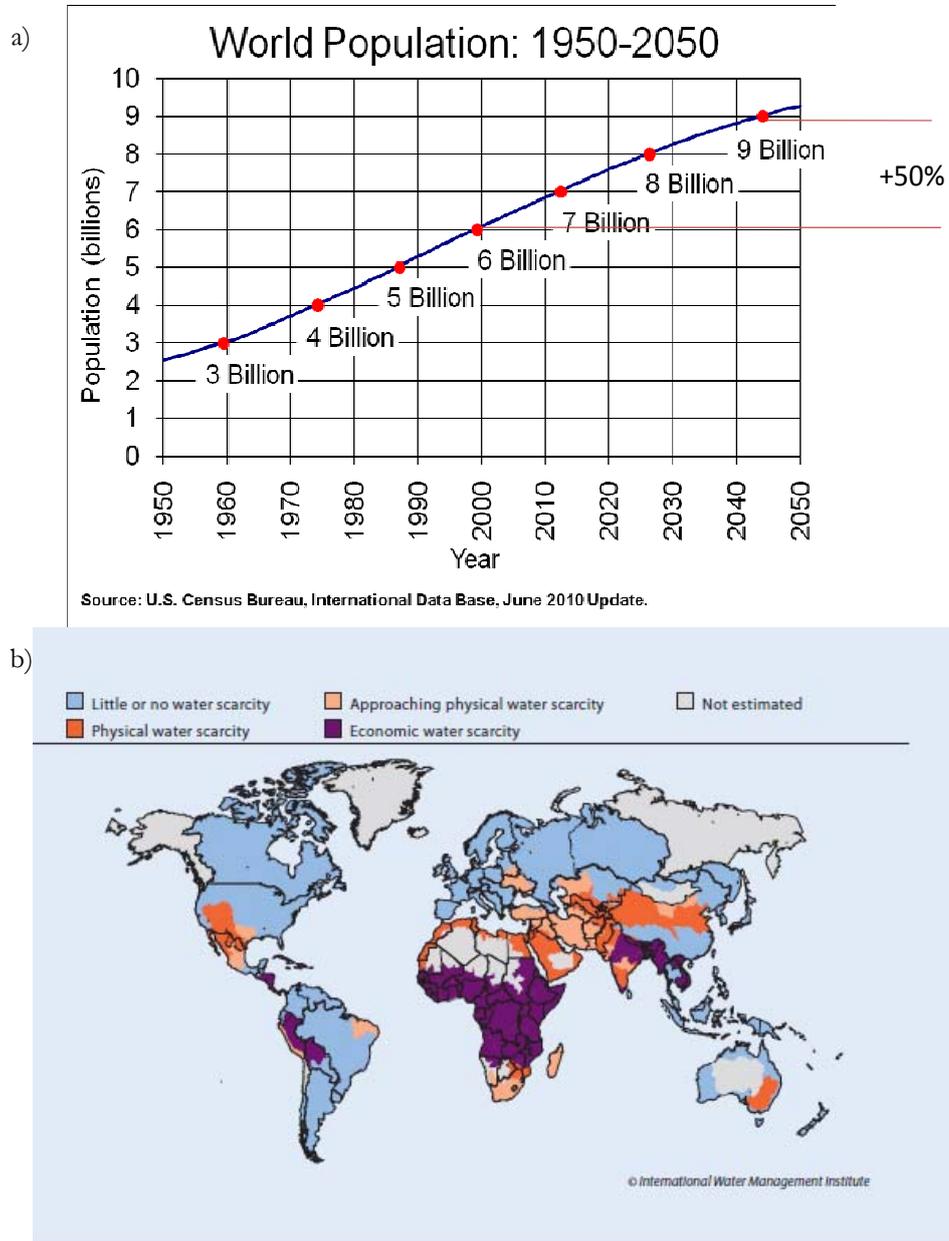


Figura 1: a) Estimaciones de la población mundial para el 2050, b) Sitios de escasez de agua.

A su vez, se estima que 4 billones de personas (la mitad de la población mundial) vivirán bajo condiciones severas de estrés de agua en el 2025 como se despliega en la Figura 2:[3], y los problemas relacionados con el agua, en el mundo

se van multiplicando como se muestra en el Mapa de Conflictos del agua de la Figura 3:[4].

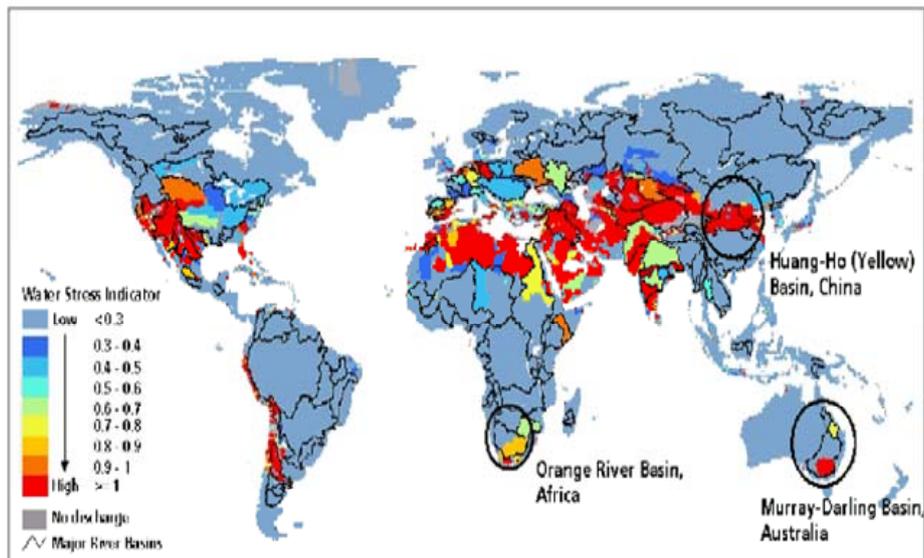


Figura 2: Mapa de estrés de Agua en el 2025.

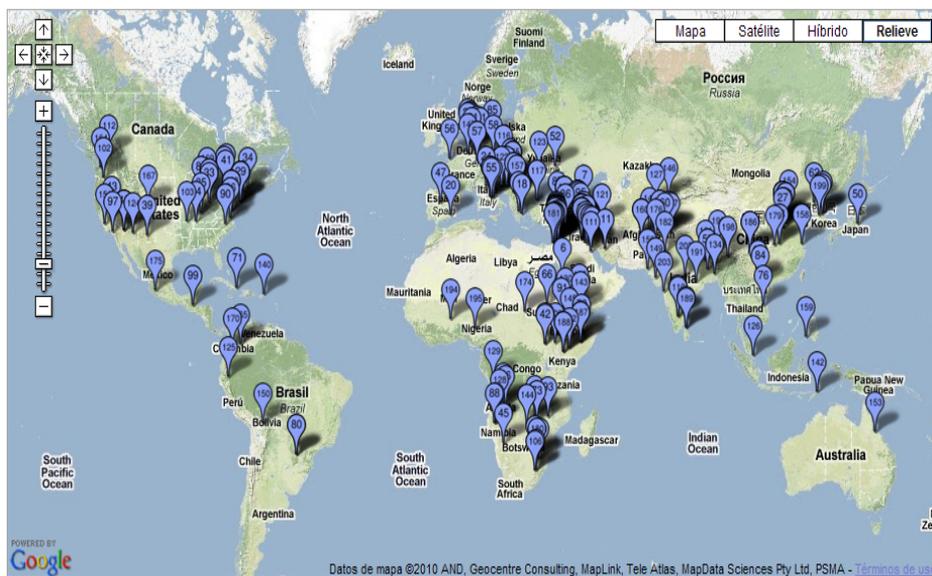


Figura 3: Mapa de Conflictos de agua.

Es conocido que en un futuro próximo, el agua tendrá un tratamiento contable y cada vez frecuentemente es necesario conocer la cantidad de agua que se requiere para producir cierto producto como lo establece el concepto de “Waterfootprint”

desplegado en la Figura 4:[5]. Por ejemplo para producir un kg de arroz son necesarios 3.000 L de agua, para producir una taza de café son necesarios 140 L de agua, para producir un L de leche son necesarios 1.000 L de agua, etc.

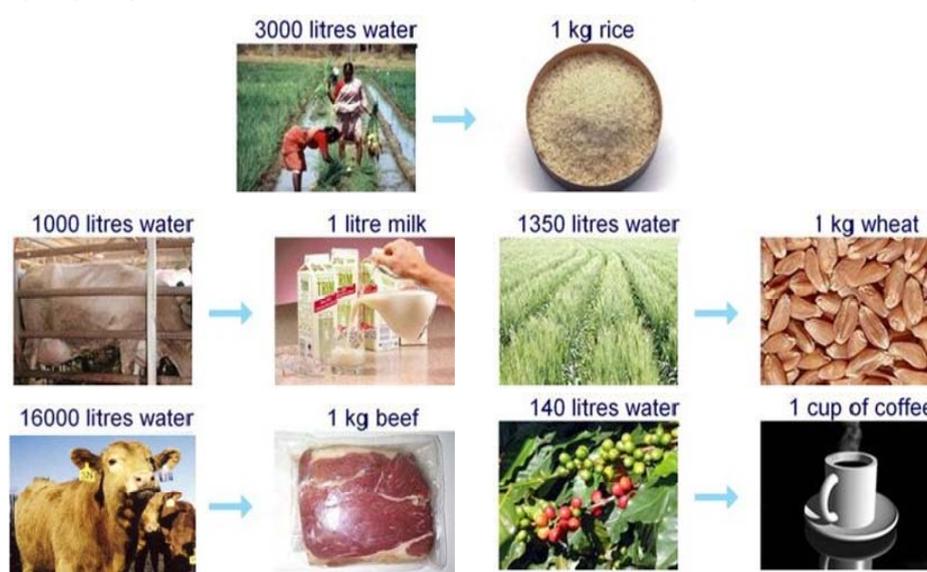
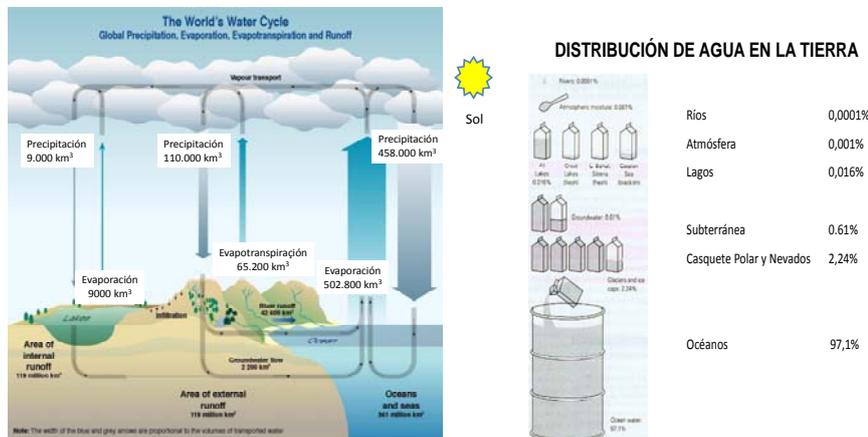


Figura 4: Cantidad de Agua requerida para obtener diversos productos "Waterfootprint".

En la Figura 5: se presenta el ciclo anual del agua, el cual proporciona una estimación gruesa de las cantidades de agua global disponibles, su distribución y tiempo de residencia [6]. Corresponde hacer notar que en todo ciclo, existe un equilibrio natural, "nada se pierde, todo se transforma" y que consecuentemente si existe por ejemplo una mayor evaporación debido al incremento de temperatura, variará la intensidad de las precipitaciones en las diferentes regiones.

2 Descripción general de Bolivia

El Estado Plurinacional de Bolivia (Bolivia), se encuentra en la parte central de sud américa y se puede describir en forma general que presenta tres regiones típicas a saber, como son La Región Andina (tierras altas). La Región Sub Andina (Valles) y la Región de los Llanos (tierras bajas) como se puede apreciar en la Figura 6:[7]. Tiene una Superficie: 1.098.580 (km²), una Población: 10.027.254 habitantes y una densidad poblacional: 9,13 (hab/km²) [8]. Como país ubicado en el centro de Sud América, Bolivia es parte de tres macro cuencas: Amazonas, Altiplano y la cuenca del Plata como se despliega el mapa hidrográfico de Bolivia en la Figura 7:[9].



TIEMPO DE RESIDENCIA

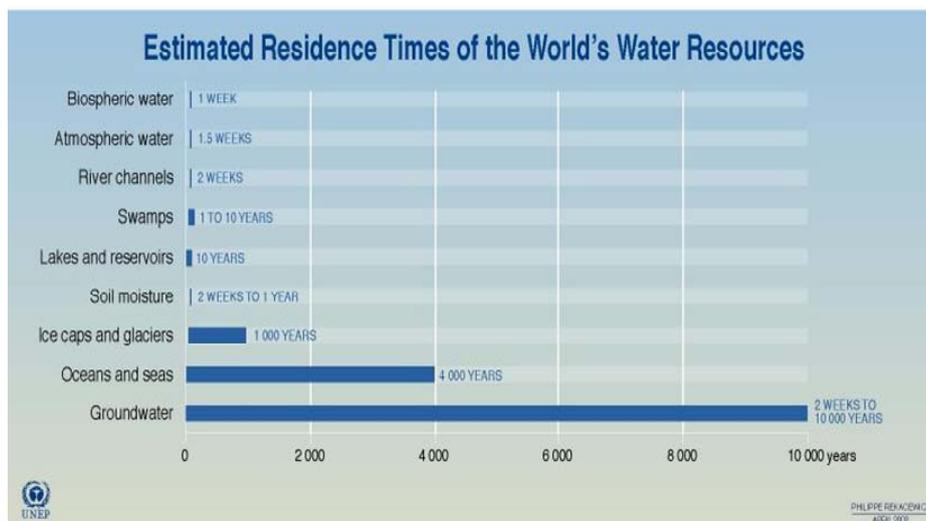


Figura 5: Ciclo anual del agua, cantidades aproximadas, distribución y tiempo de residencia.



Figura 6: Ubicación y Descripción de Bolivia.

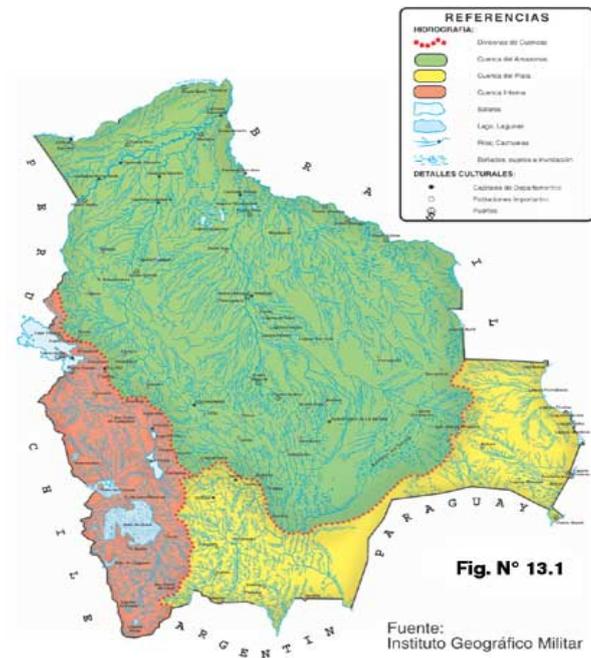


Figura 7: Mapa Hidrográfico de Bolivia.

3 Recursos Hídricos

3.1 Marco Legal

La legislación relacionada a los recursos hídricos en el Estado Plurinacional de Bolivia se detalla en el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA)[10].

Entre algunos temas de debate acerca de los recursos hídricos, están los derechos de uso y aprovechamiento en régimen de concesiones, el reconocimiento de los usos y costumbres de pueblos indígenas y campesinos, así como la transferencia de los derechos y creación de mercados. Se encuentran en discusión los usos y prioridades en el consumo humano, en el riego, la energía, la navegación y el turismo.

3.2 Potencial hídrico

Bolivia se encuentra entre los países con mayor cantidad de recursos hídricos en el planeta, estos se encuentran contenidos en glaciares, ríos, lagos, y humedales catalogados estos últimos como sitios RAMSAR. Se estima una oferta de agua dulce en Bolivia por habitante de aproximadamente 50.000 m³/habitante/año, sin embargo, el problema radica en que esta cantidad de agua está mal distribuida como se presenta en el mapa de Isoyetas de la Figura 8:[11], En el cual se puede apreciar en la parte central promedios de precipitación bastante altos y el sud-oeste valores casi nulos. Es conocido también que las precipitaciones en la parte central y el drenaje topográfico generan inundaciones en el nor-este del país como se presenta en la Figura 9:[12]. La Figura 10:presenta un resumen de los principales eventos de desastres en Bolivia, resaltando que ocupa el primer lugar las inundaciones con un 35,5%[13].

La demanda actual es de poco más de 2.000 millones de m³/año, es decir, de menos del 0,5% de la oferta total, con lo cual se puede afirmar que no existen problemas de recursos hídricos en Bolivia. El Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego[14] se encuentra actualizando el Balance Hídrico Superficial. No se cuenta con un mapa nacional que delimite la cantidad de acuíferos y a nivel local se requieren de estudios más detallados. A su vez, existen acuíferos subterráneos que todavía no están cuantificados y aunque su verdadero potencial no ha sido todavía establecido, son considerados de mucha importancia.

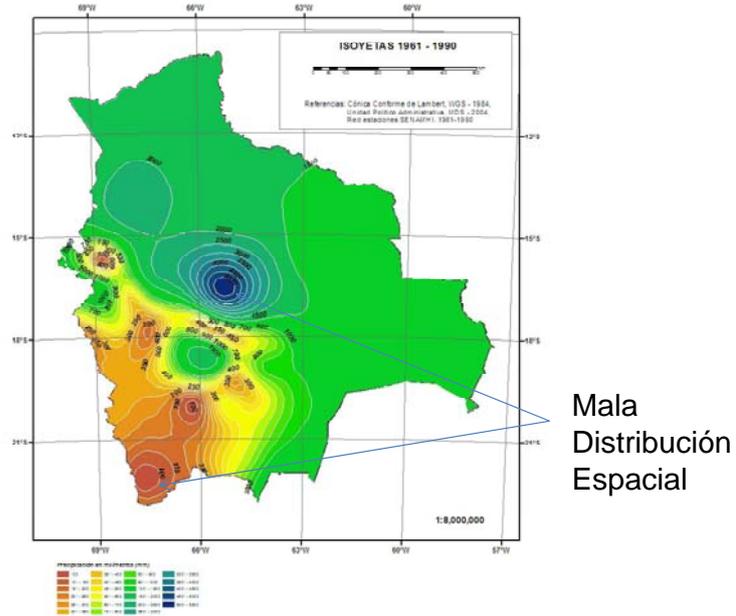


Figura 8: Mapa de Isoyetas - Mala Distribución Espacial.

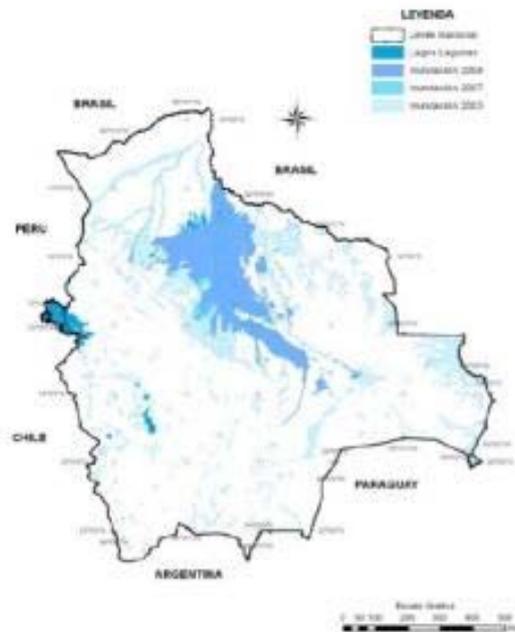


Figura 9: Mapa de Inundaciones de Bolivia composición años 2006, 2007 y 2008.

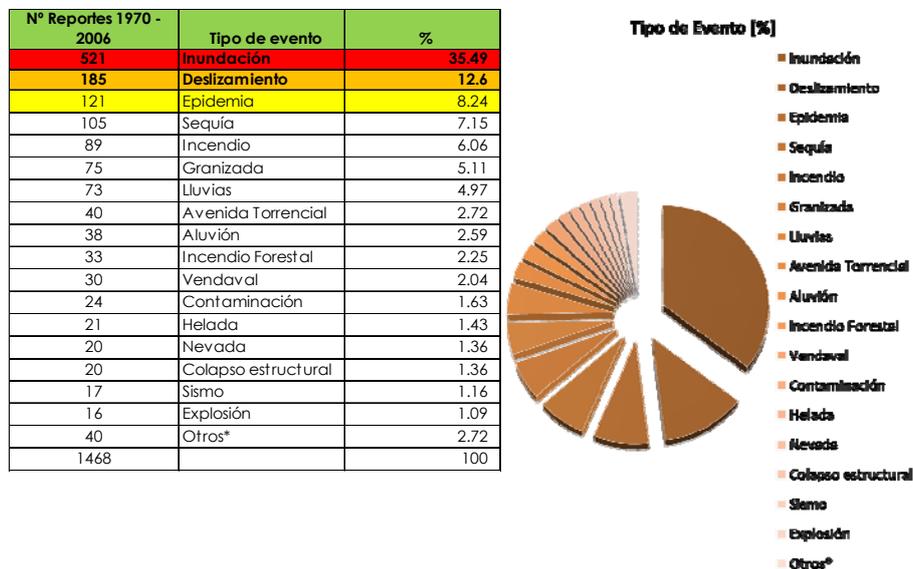


Figura 10: Registro de Desastres en Bolivia 1970–2010.

Con referencia a la calidad del recurso hídrico tienen problemas identificados la contaminación proveniente por actividades mineras, y fajas naturales regionales mineralizadas, especialmente con metales pesados, también se presenta contaminación en ríos que atraviesan las principales ciudades causadas por aguas residuales e industriales y zonas de cultivos con el uso indiscriminado de plaguicidas, se encuentra también contaminación de cursos de ríos por la explotación aurífera con índices de mercurio y precursores empleados por el narcotráfico principalmente en el sistema amazónico.

Todo esto lleva a pensar en que la política a encarar debe coadyuvar a la protección de la calidad de los recursos hídricos, promover la implementación de acciones que permitan reducir los impactos de eventos climáticos extremos, la degradación de las cuencas y los efectos del cambio climático.

3.3 Consumo y demanda de Agua

En relación al consumo, se establece que el riego es la actividad de mayor consumo en Bolivia, con alrededor del 94% de la demanda total de agua, el consumo humano está en segundo lugar con alrededor del 5% de la demanda total. Sin embargo, 2.4 millones de habitantes en Bolivia aún no tienen acceso al agua potable. La industria y minería representan aproximadamente el 1% de la demanda total[15].

4 Fuentes de Energía

La Figura 11: presenta una estimación de uso de las principales fuentes energéticas a nivel mundial proyectadas para el 2035 donde se destaca que se tendrá aún un incremento en el petróleo y gas y casi se mantendrá el carbón, esto debido a que los países asiáticos emplean generalmente este recurso energético, un incremento en biomasa nuclear y otras renovables y un crecimiento lineal de aprovechamiento hidroeléctrico [16],

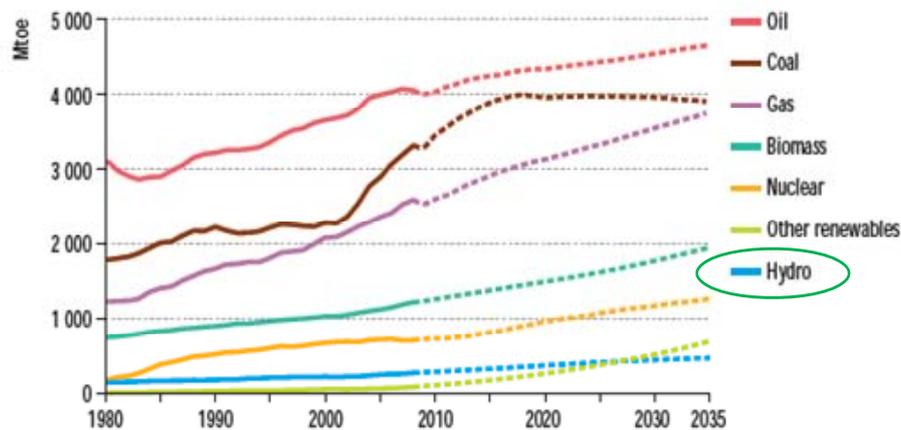


Figura 11: Estimaciones de uso de fuentes de Energía a nivel mundial para el 2035.

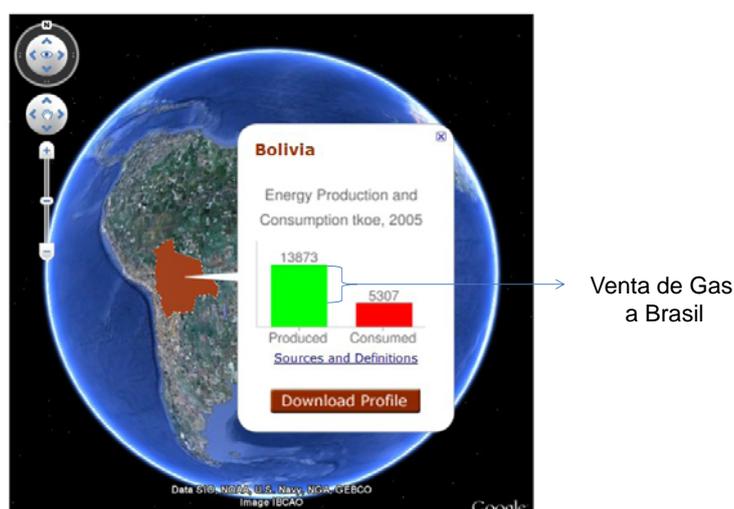
4.1 Marco Legal

La Constitución Política del Estado, hace referencia a los artículos siguientes:

- **“Artículo 20.** Es responsabilidad del Estado, la provisión de los servicios básicos entre ellos el de electricidad, misma que debe responder a criterios de universalidad, responsabilidad, accesibilidad, continuidad, calidad, eficiencia, eficacia, tarifas equitativas y cobertura necesaria; con participación y control social.
- **Artículo 378.** Las diferentes formas de energía y sus fuentes constituyen un recurso estratégico, su acceso es un derecho fundamental y esencial para el desarrollo integral y social del país, y se regirá por los principios de eficiencia, continuidad, adaptabilidad y preservación del medio ambiente.
- **Artículo 379.** I. El Estado desarrollará y promoverá la investigación y el uso de nuevas formas de producción de **energías alternativas**, compatibles con la conservación del ambiente”.

4.2 Balance Energético, Tasa de Electrificación y Red del Sistema Interconectado Nacional (SIN)

La Figura 12: presenta el balance energético de Bolivia [17], destacando que en Bolivia se produce más energía de la que se consume. Corresponde hacer notar que el gráfico no presenta déficit energético puesto que se tiene exportación de gas al Brasil.



Fuente: U.S. Energy information Administration

Figura 12: Balance Energético de Bolivia.

Con referencia a la Tasa de electrificación, Bolivia tiene aproximadamente una tasa de electrificación del 64% como se puede apreciar en la Figura 13; una de las más bajas de Latinoamérica [17], debido a que la red del Sistema Interconectado Nacional (SIN), abastece a los principales centros poblados, concentrados en la región central del país, resultando difícil la cobertura hacia las áreas fronterizas como se puede observar en la Figura 14:[18].

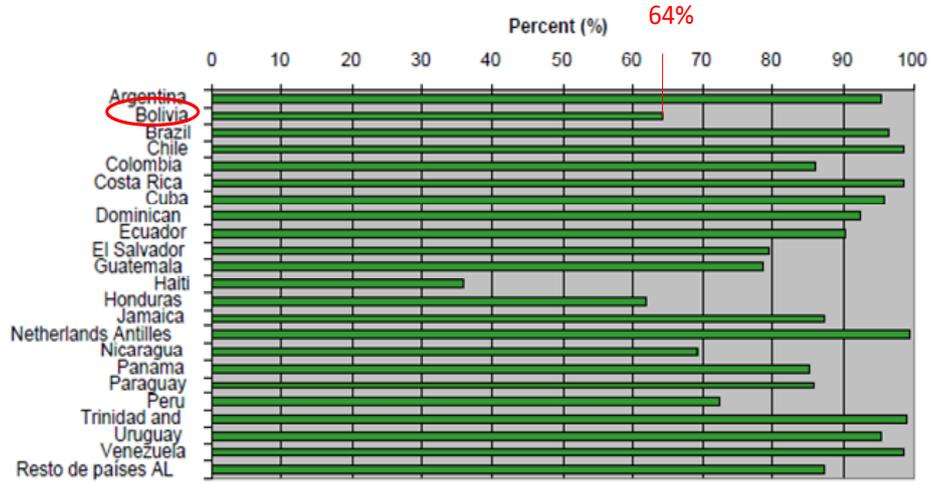
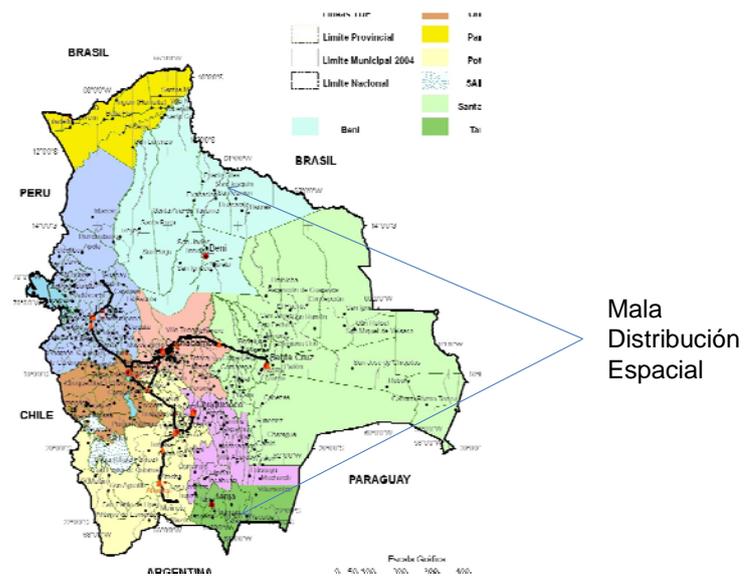


Figura 13: Tasa de Electrificación en Bolivia.



Mala Distribución Espacial

Figura 14: Red del Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Electrificación.

4.3 Cadena de la Industria Eléctrica Generación-Transmisión-Distribución y matriz energética

La cadena de la Industria Eléctrica se compone de tres áreas, la de generación, transmisión y distribución cuya información general para Bolivia se presenta en la Figura 15:[19].

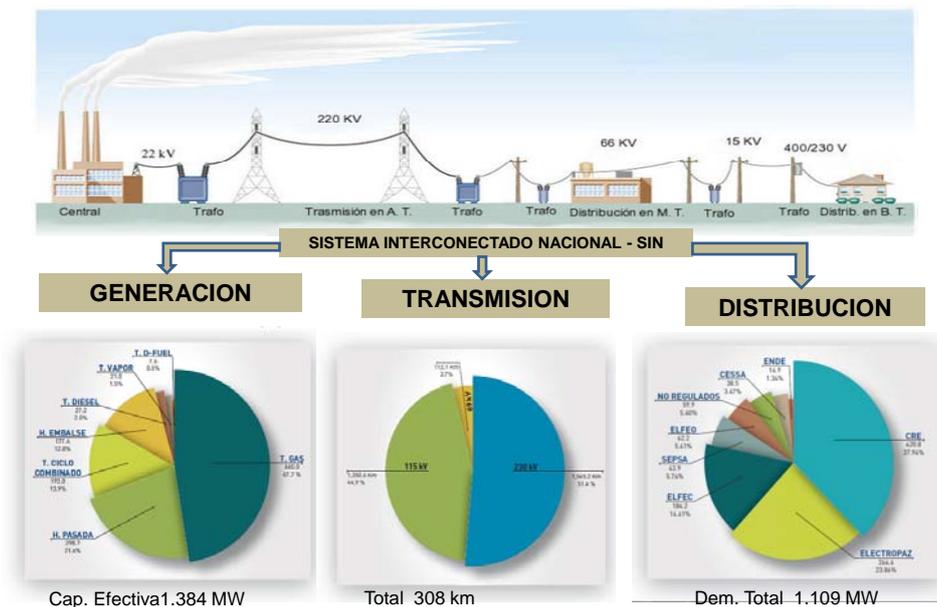


Figura 15: Cadena de la Industria Eléctrica en Bolivia.

La Figura 16; presenta el desglose de la composición de la matriz energética nacional en generación del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y sistemas Aislados (SA) al 2012 en porcentajes[19].

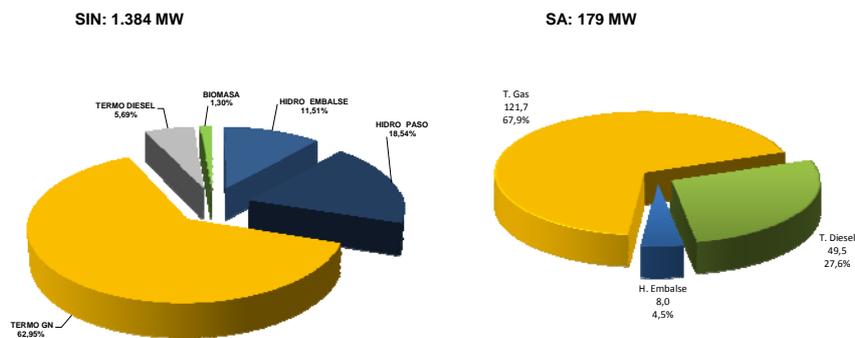


Figura 16: Composición de la matriz energética en generación del SIN y SA (%) al 2012.

4.4 Proyectos de Generación y de Transmisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN)

Los principales proyectos previstos de generación son las hidroeléctricas Miguillas, San José, Misicuni, Rositas y Termoeléctricas Laguna Colorada, Tarija al SIN, Termo del Sur, Warnes, Bulu Bulu y San Buena Aventuracuya información se presenta en la Figura 17:[19].

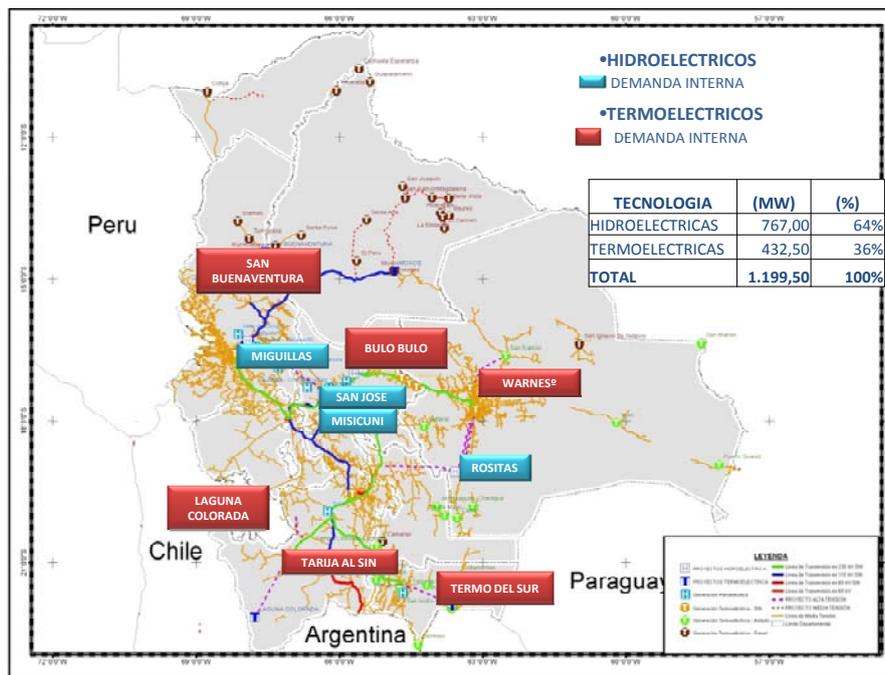


Figura 17: Proyectos de generación del SIN.

La Figura 18: presenta información de los principales proyectos de Transmisión que se tienen previstos o están en ejecución cuales son: Santivañez-Viloma-La Cumbre, Rositas-Palmar, Punutuma-Tarija, Tarija-Chaco, Laguna Colorada-San Cristóbal, Sucre-Karachipampa-Potosí[19].

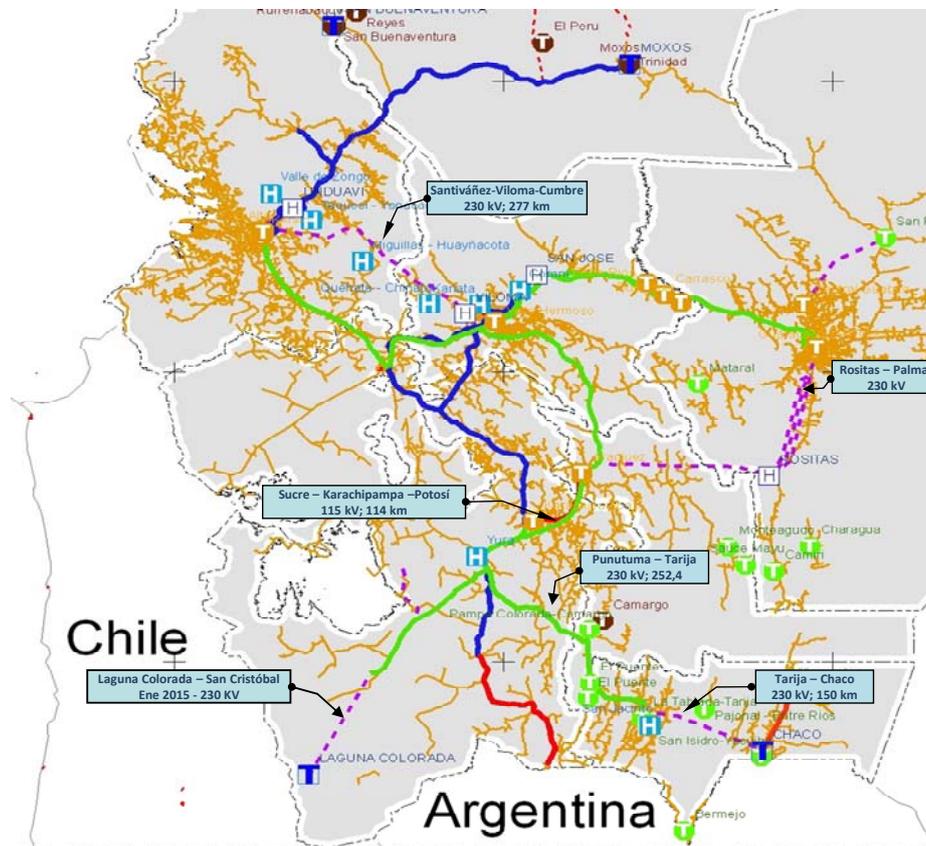


Figura 18: Proyectos de Transmisión que se tienen previstos del SIN.

4.5 Potencial Energías Renovables en Bolivia

La Tabla 1: presenta un resumen de la viabilidad Técnica del potencial de energías en renovables en Bolivia [20].

Tabla 1: Viabilidad Técnica del potencial de energías en renovables en Bolivia

Tecnología	Recursos Naturales Disponibles	Viabilidad Técnica
Solar Fotovoltaica	Uno de los países con mayor disponibilidad de Energía solar a nivel mundial	
Eólica a pequeña escala	Importantes áreas en varias zonas con buen potencial de viento.	Totalmente viable
Eólica a gran escala	Áreas específicas en varias zonas con buen potencial de	

	viento
Micro y Minihidráulica	Importantes áreas en varias provincias con recursos
Pequeña hidráulica	hídricos (suficiente caudal y caída)

Se resalta que de las energías renovables en Bolivia son totalmente viables técnicamente.

4.5.1 Estimación de la velocidad media anual de viento para Bolivia

La Figura 19: presenta un mapa de estimación de la velocidad media anual de viento a nivel nacional [21] y la Figura 20: presenta un mapa de velocidad media anual de viento a 80 m realizado por 3Tier [22].

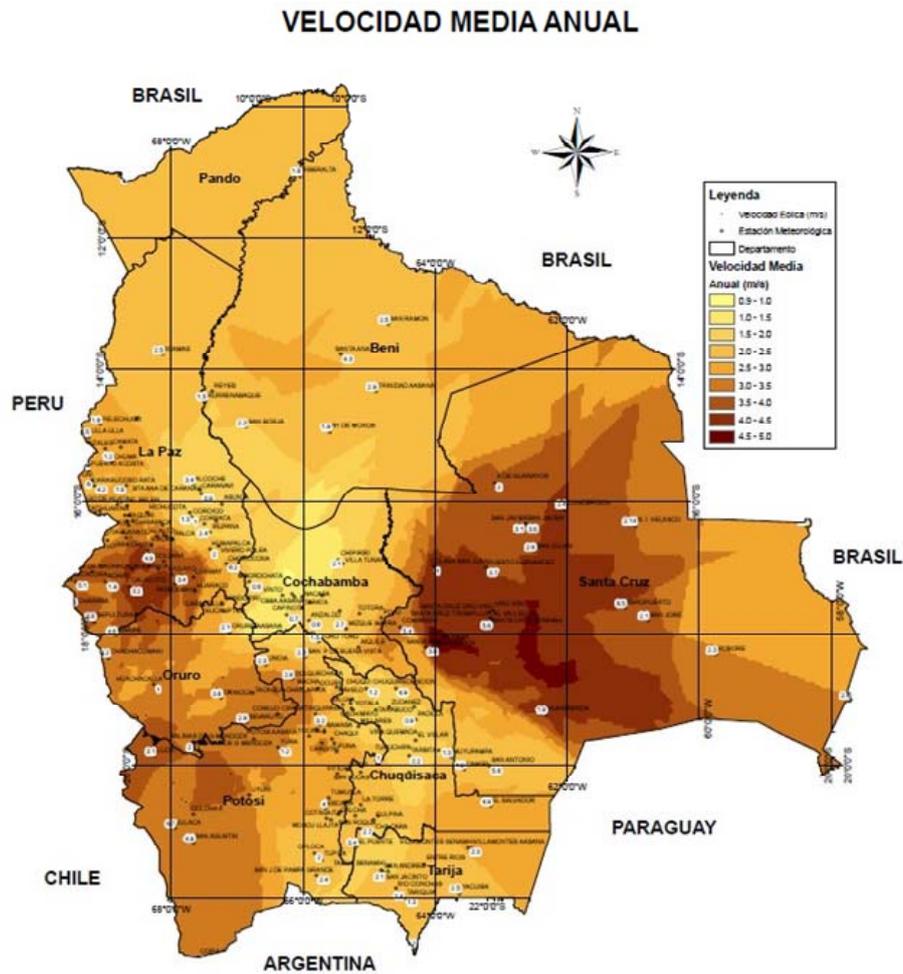


Figura 19: Velocidad media anual de viento para Bolivia.

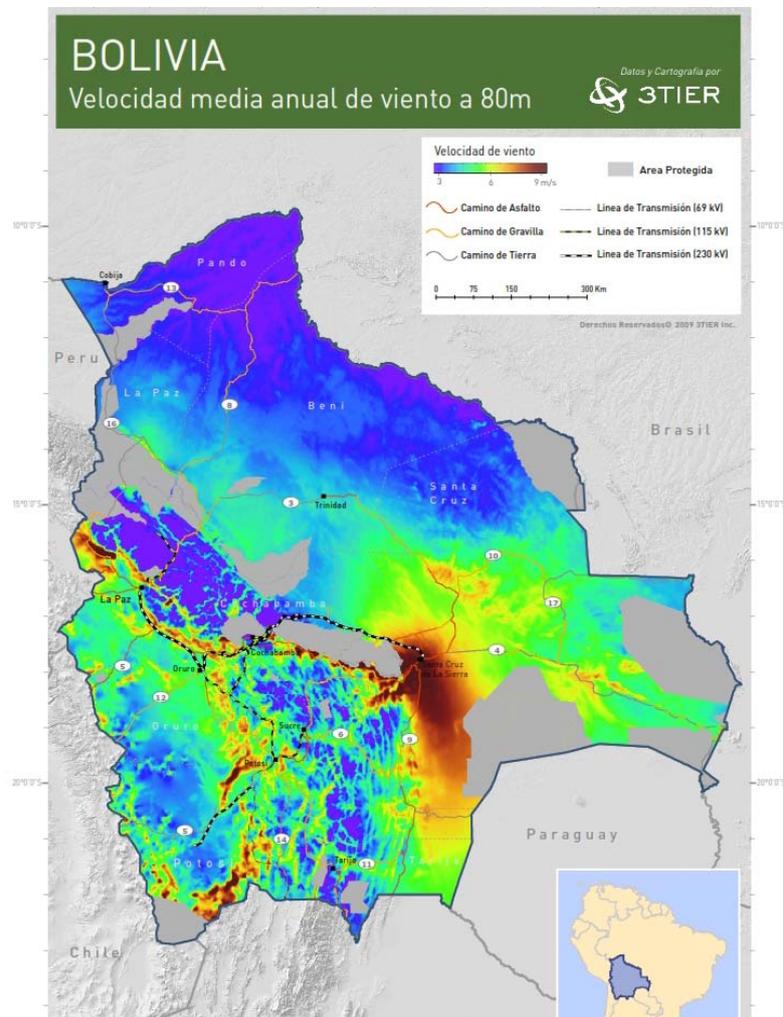


Figura 20: Velocidad media anual de viento a 80m, Empresa 3Tier.

Se observa que en el área de San Cruz y al norte de La Paz se tienen buenas velocidades promedio de viento.

4.5.2 Estimación de la radiación solar para Bolivia

La Figura 21: presenta una estimación del potencial de radiación Solar en Bolivia[23]. Se puede resaltar que en la región sud este del país se cuenta con un potencial de radiación solar bastante alto.

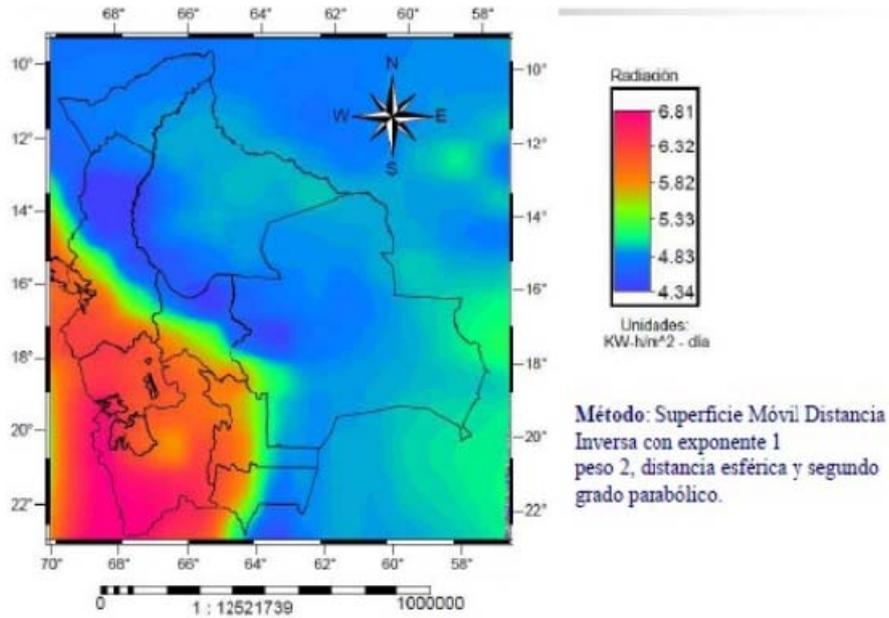


Figura 21: Estimación de la Radiación Solar para Bolivia.

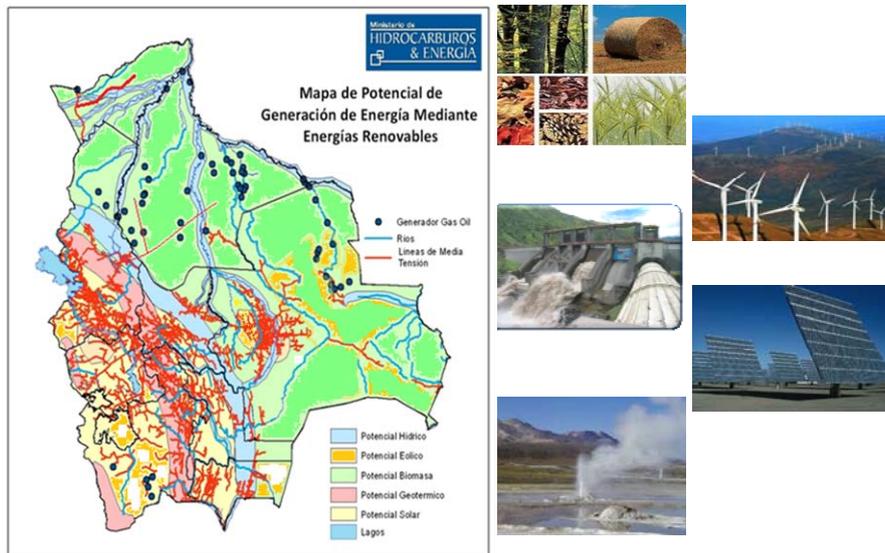


Figura 22: Mapa potencial de Generación de Energía Mediante Energías Renovables.

La Figura 22: presenta el mapa potencial de Generación de Energía Mediante Energías Renovables incluyendo potencial hídrico, eólico, biomasa, geotérmico y solar [24]. Y la Figura 23: presenta los proyectos previstos para ejecución a corto y mediano plazo de energías renovables en Bolivia [19].

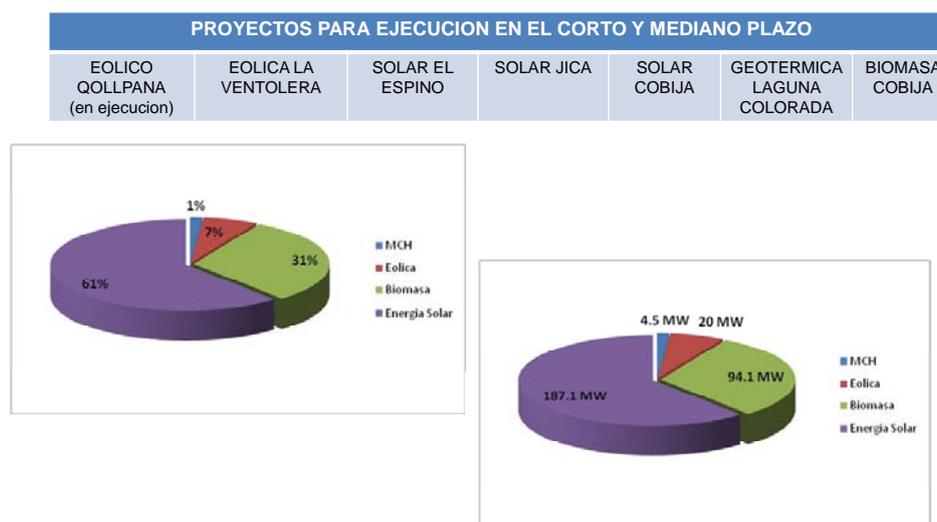


Figura 23: Proyectos previstos para ejecución a corto y mediano plazo de energía eólica, solar, geotérmica y Biomasa en Bolivia.

4.6 Potencial hidroeléctrico

La potencia instalada en centrales Hidroeléctricas en Bolivia se ha incrementado en un 60% en los últimos 12 años y constituye actualmente más de 1/3 de la generación total nacional, por ENDE, cualquier disminución o modificación tiene grandes repercusiones a nivel del sector eléctrico nacional [25].

Reservorios hidroeléctricos almacenan ambos agua y energía y llegan a ser potencialmente importantes en el manejo del cambio climático. Emplean y sueltan agua instantáneamente o con retraso pero no consumen agua. La mayor pérdida se basa en la evaporación cuando la temperatura es alta, sin embargo es conocido también que en el tiempo se debe estimar el arrastre de sedimentos de la Cuenca de aporte para realizar su mantenimiento.

La Figura 24: presenta el inventario de presas con que cuenta Bolivia [26]

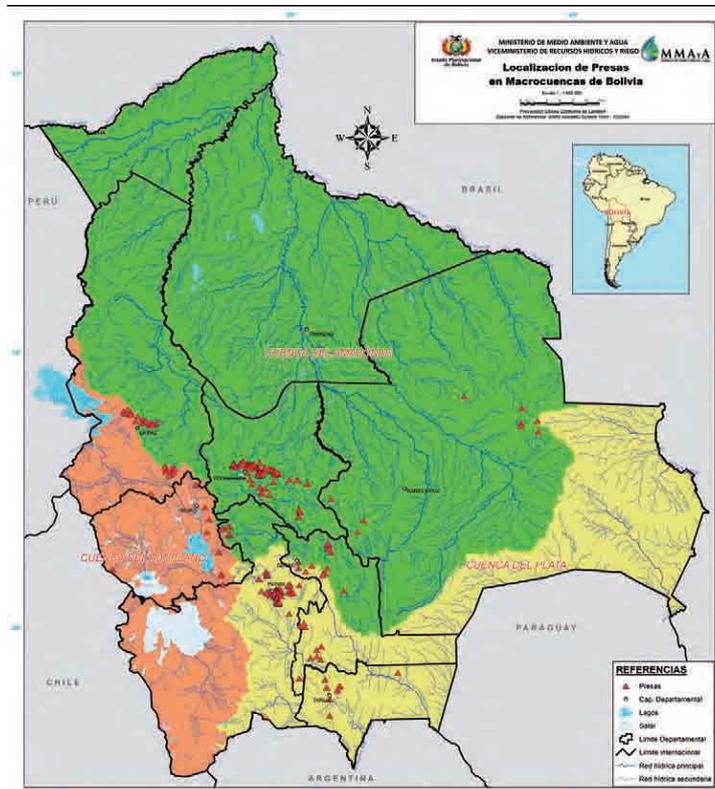


Figura 24: Inventario de presas.

Recursos hídricos transfronterizos con los que se cuenta Bolivia se presentan en la Figura 25:[27] y se detalla a continuación: (2) el acuífero Jaci – Paraná y Parecís; y (5), el acuífero Pantanal; con la República de Argentina y Paraguay (4) el acuífero Toba, Yrendá, Tarijeño y Pantanal respectivamente; con la República de Chile (3) y Perú (1) el acuífero Ignimbritas

OLADE ha estimado que Bolivia emplea menos del 1% de su potencial hidroeléctrico como se presenta en la Tabla 2:[28] y la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) por su parte, ha clasificado e inventariado 81 potenciales fuentes de aprovechamiento hidroeléctrico que permitiría alcanzar capacidad instalada de 11.000 MW [29].

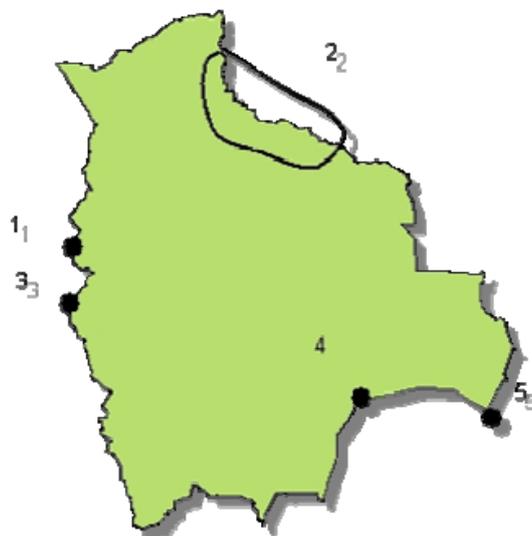


Figura 25: Recursos Hídricos Transfronterizos.

Tabla 2: Potencial Hidroeléctrico de Bolivia

AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE: NIVEL DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS
HÍDRICOS CON FINES
HIDROENERGÉTICOS, 2003 (Miles
de kilovatios)

Pais	Potencial hidroeléctrico económicamente aprovechable	Potencia hidroeléctrica instalada	Porcentaje del potencial hidroeléctrico que está siendo utilizado
Argentina	44 500	9 783	22
Bolivia	190 000	479	< 1

En el marco de la política de diversificación de la matriz energética y en el ámbito cooperación entre países, el Estado Plurinacional de Bolivia y la República Popular de China, han suscrito un Memorándum de Entendimiento (MdE), el cual permite trabajar con los proyectos hidroeléctricos que se presentan en la Figura 26:[24].

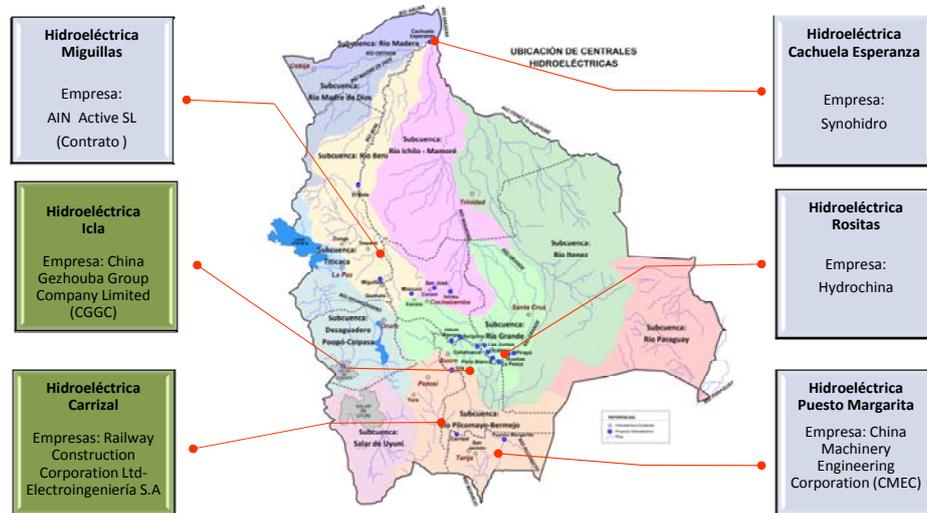


Figura 26: Proyectos Hidroeléctricos a través del Memorandum de entendimiento Bolivia - China.

5 Cambio Climático en Bolivia

El gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia tiene programas como el Programa Nacional de Cambio Climático y en abril del 2010, se realizó en Cochabamba - Bolivia la “Conferencia de Cambio Climático y derechos de la madre tierra”, cuyos documentos generados por mesa de trabajo y conclusiones, pueden encontrarse en la plataforma de cambio climático de Bolivia [30].

5.1 Experiencias en modelación del efecto de Cambio Climático

La modelación permite la evaluación de posibles escenarios futuros, facilita la integración de conocimiento científico, permite evaluar los impactos de las decisiones de gestión así como de las inversiones. Sin embargo a fin de establecer la confiabilidad de las proyecciones de la evolución futura del clima producidas por dichos modelos es necesario calibrar y validar los resultados de los mismos.

La mayor parte de los modelos utilizados en la actualidad para el estudio del clima futuro son los denominados Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (AOGCM por sus siglas en inglés). Estos modelos resuelven las ecuaciones que gobiernan a la atmósfera, el océano y otros sistemas relevantes representados por el modelo, dividiendo el espacio en “cajas” o rejillas discretas. Por razones prácticas, el tamaño de estas cajas no puede ser muy pequeño pues el tiempo de cálculo crece rápidamente conforme el tamaño de la rejilla decrece (o, equivalentemente, la resolución del modelo se incrementa). Los

AOGCMstípicamente tienen una resolución horizontal de unos 150 a 300 km [31] y entre 18 a 56 niveles verticales (que van desde la superficie hasta 0,1 hPa). Esta resolución es suficiente para analizar fenómenos a escala planetaria o sinóptica pero claramente no es adecuada para estudiar fenómenos a escala regional o peor aún local. Aún más, muchos fenómenos climáticos dependen decisivamente de la orografía por lo que regiones con gradientes altitudinales abruptos, como sucede en una parte importante del territorio boliviano, están inadecuadamente representadas por los Modelos de Circulación Global (GCMs de sus siglas en inglés).

Estas debilidades llevaron de manera natural al desarrollo de los denominados Modelos de Escala Regional (RCM por sus siglas en inglés). Estos son modelos que tienen un dominio mucho menor que los GCMs y una resolución mucho mayor a los mismos. A la fecha estos modelos pueden llegar a una resolución de kilómetros aunque típicamente trabajan entre 10 y 50 km de resolución horizontal. Los RCMs se relacionan con los GCMs a través de los bordes del dominio elegido pues las condiciones de borde son impuestas por los GCMs para asegurar consistencia general (global). Dada la complejidad del sistema climático, los modelos numéricos todavía no pueden representar ciertos procesos de forma adecuada. Uno de los factores está relacionado a la resolución espacial del modelo y otro a la complejidad de ciertos procesos, como los relacionados con las nubes. Debido a esto no queda más remedio que utilizar técnicas estadísticas que incorporen estos procesos a través de una representación paramétrica.

En América del Sur han sido realizadas algunas experiencias de desarrollo escenarios climáticos para el futuro usando modelos climáticos regionales entre las cuales se tienen a [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38][39].

Los posibles efectos del cambio climático sobre regiones como Bolivia son de mucho interés tanto a nivel científico como político. Dentro de los modelos regionales de estudio corridos en Bolivia se encuentran los estudios realizados con el modelo PRECIS [40]. De cuyos resultados extractamos lo siguiente: “La comparación de las salidas del modelo con datos de superficie para el periodo 1961-1990 muestran que en general El modelo subestima la temperatura media (“coldbias”). En términos de precipitación el modelo sobreestima la misma en la zona andina y los valles mientras que parece realizar un mejor trabajo en la zona oriental”.

“Las discrepancias entre el modelo y la observaciones parecen estar relacionadas con la pobre resolución espacial (50 km) y con problemas de parametrización, principalmente nubes y precipitación forzada por la orografía. Buen desempeño del modelo en la zona oriental de Bolivia, especialmente en lo que a precipitación se refiere, podría deberse a que esa zona es una área de

transición entre regiones de sobre y sub- estimación del modelo. También subestima la temperatura mínima pero el sesgo es menor que en la temperatura media. La temperatura máxima también es subestimada por el modelo pero muestra menor relación lineal con las observaciones. En promedio, el modelo realiza un mucho mejor trabajo en la zona oriental que en los valles y el Altiplano”.

5.2 Modelación hidrológica Superficial de Cambio Climático para Bolivia

Entre enero 2009 y mayo 2010 el Banco Mundial (BM) realizó un esfuerzo preliminar de modelar las cuencas principales a nivel nacional con información disponible a través de una Asistencia Técnica No Reembolsable (ATNR) buscando el Fortalecimiento de Capacidades para la Adaptación a la Variabilidad y al Cambio Climático en el Ámbito de los Recursos Hídricos. La modelación tuvo como objetivo simular la precipitación, escorrentía superficial, evapo-transpiración, sedimentos y caudales generando escenarios de cambio climático a la década centrada en el año 2050 a nivel nacional.

5.2.1 Selección, Construcción y Evaluación del Modelo Hidrológico

El modelo Empleado fue el Soil and Water Assessment Tool (SWAT)[41] desarrollado por la Universidad de Texas A&M para el Servicio de Agricultura de los Estados Unidos, fue elegido por ser un modelo que presenta un buen detalle espacial y temporal el cual basa su análisis en un balance hídrico dentro del análisis de unidades hidrológicas de respuesta (UHR). Una UHR es un área de una cuenca que representa las mismas condiciones hidrológicas incluyendo en el análisis de la topografía, clima, cobertura y uso de suelo, y permite la modelación conjunta del suelo, agua y clima. El SWAT trabaja sobre la plataforma del software ArcGIS[42], ampliamente empleado en Bolivia.

5.2.2 Establecimiento de La Base de Datos

La tarea de recopilación de información se realizó con la participación de consultores nacionales e instituciones públicas como el SENAMHI [11] y el Programa Nacional de Cambio Climático (PNCC), la Universidad Mayor de San Simón[43], Fundación ProINPA[44], entre otros.

Los datos empleados fueron los que se encuentran disponibles en el Centro Digital de los Recursos Naturales de Bolivia [45] incluyendo un Modelo de Elevación Digital Global SRTM de 30x30m² de resolución espacial [46], mapa de suelos de la FAO[47] y cobertura de uso actual de tierra [48].

5.2.3 Construcción del Modelo Hidrológico para Cada Macro-Cuenca

La modelación se realizó a nivel nacional y para 11 macro- cuencas cuales son: Beni, Desaguadero-Poopo-Coipasa-Uyuni, Grande, Ichilo-

Mamoré, Itenez, Madera, Madre de Dios, Paraguay, Pilcomayo- Bermejo, Salar de Uyuni y Titicaca.

En el caso de las cuencas transfronterizas, solo se consideró la porción de las cuencas en territorio Boliviano, dada la disponibilidad de información. Esta limitante tendrá que ser superada en los futuros. Asimismo, es importante mencionar que durante la modelación no se consideró el trasvase de aguas entre las macro-cuencas por efectos naturales (ríos que ingresan a una cuenca a otra, movimiento de aguas subterráneas, etc.) o por acciones humanas (acueductos, túneles, sifones, etc.)

5.2.4 Construcción de Posibles Escenarios Futuros de Clima

Para la construcción de los escenarios climáticos futuros se utilizaron los 17 MGC para el escenario marcador A2 del Reporte Especial de Escenarios de Emisiones del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (SRES) en sus siglas inglesas, el que corresponde a un contexto de desarrollo más regional y con una relativa continuidad en el crecimiento de la concentración de CO₂ a nivel global. Se seleccionó el escenario marcador A2 por el hecho de ser el menos conservador. Sin embargo, de acuerdo a las evidencias actuales parece que el escenario marcador A2 sub-estima las emisiones actuales de CO₂.

Para el escenario marcador A2, se obtuvieron los deltas de precipitación (en valor porcentual) y temperatura (en valores absolutos) mensuales agregados a nivel de las 11 macro-cuencas de Bolivia para los 17 modelos generales de circulación. La agregación a nivel de las macro-cuencas se hizo en base al promedio ponderado de las áreas en base a la resolución nativa de los modelos. Los deltas representan la diferencia entre las líneas base representadas por cada modelo entre el período base (1960-1990) y la década entorno al año 2050 (2045-2055). Cabe recalcar, que se seleccionó la década del 2050 para la generación de los escenarios futuros y no otra más cercana por el nivel de ruido inherente a los MGC en el corto plazo—cuanto más largo es el plazo, el nivel de incertidumbre en los MGC es menor.

5.2.5 Corrida del modelo

La Figura 27: muestra el área de estudio y las características de las 11 Macro-cuencas de estudio que son: Río Beni, Desaguadero-Poopó-Coipasa-Uyuni, Río Grande, Ichilo-Mamoré, Río Itenez, Río Madera, Río Madre de Dios, Paraguay, Pilcomayo-Bermejo, Salar de Uyuni y Lago Titicaca e información general de las mismas.

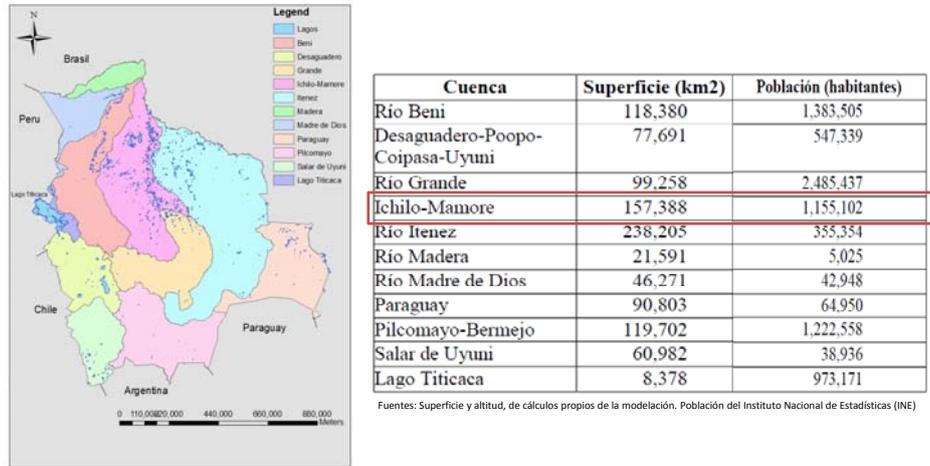


Figura 27: Área de Estudio en información general de las 11 Macrocuencas.

La Figura 28: presenta la ubicación de las Estaciones Hidrométricas y la Figura 29: la ubicación de estaciones meteorológicas y que presentan datos por ejemplo de caudal que se emplean para calibración del modelo.

En las Figura 28: y Figura 29:, se puede observar una débil red meteorológica y escasa información representada, esto debido a que en muchos casos los datos no se encuentran en formato digital, o presentan discontinuidad en las series conformadas o conforman un periodo en años muy corto. Por tal motivo Estaciones virtuales de la NOAA y La NASA fueron incluidas estableciendo un total 127 estaciones de las cuales 82 son del SENAMHI, 33 DE LA NOAA Y 12 DE LA NASA, disponiendo para estas estaciones un período de datos del 1996 al 2008.

La Figura 30:la corrida secuencial del modelo y metodología aplicada empleando SWAT.

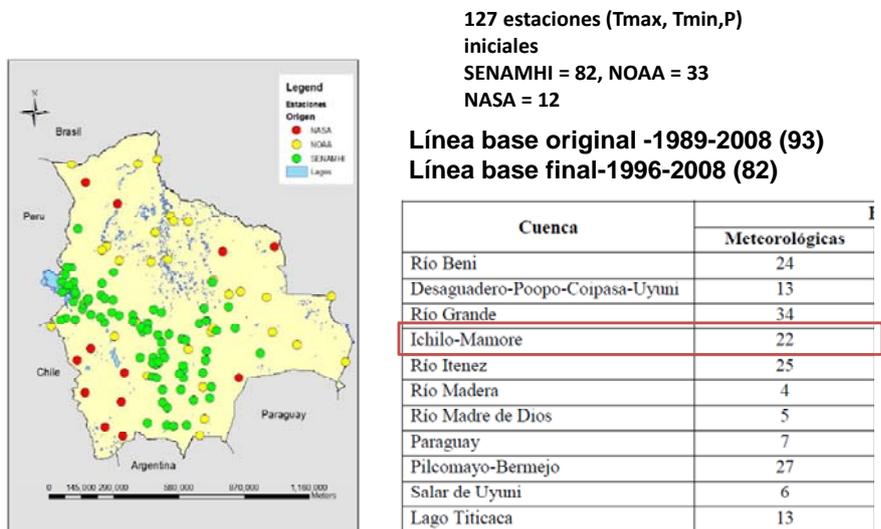


Figura 28: Ubicación de las Estaciones Hidrométricas.

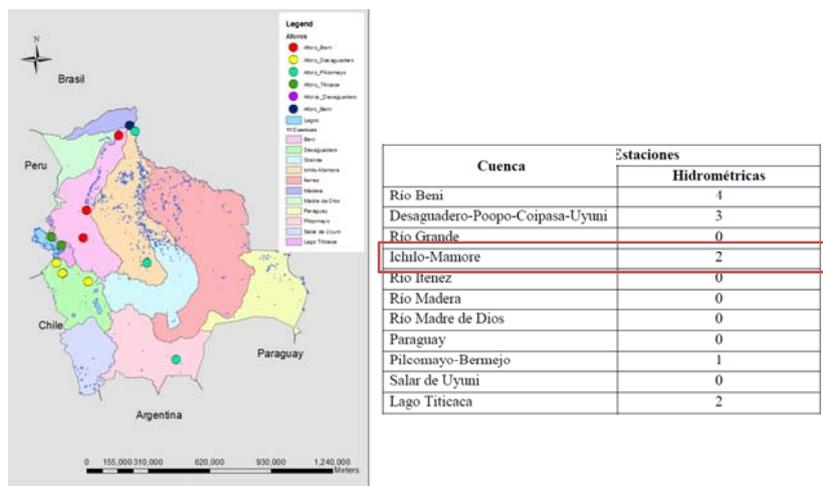


Figura 29: Estaciones con datos de aforo para calibración (inferior).

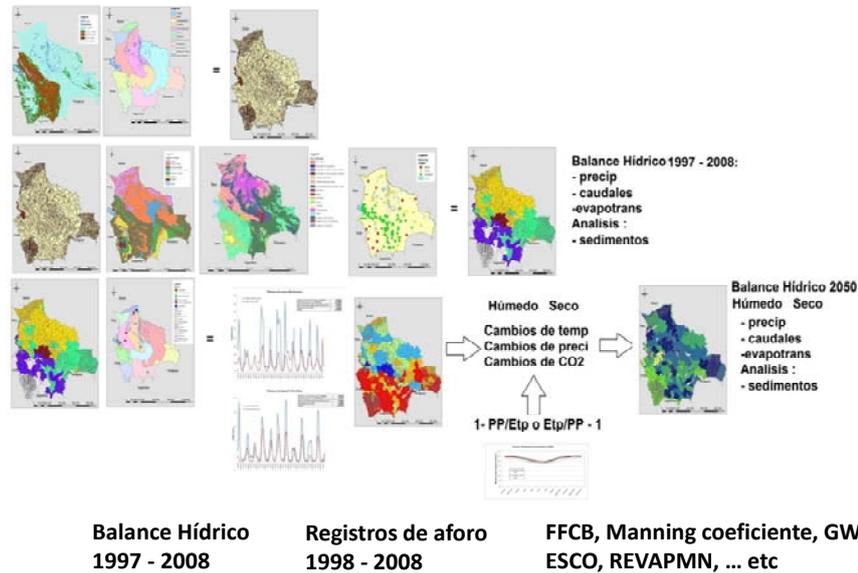


Figura 30: Metodología con secuencia de imágenes corridas del modelo SWAT.

La Figura 30: muestra a su vez la proyección de escenarios de cambio climático proyectados al 2050 que comprende repetir el comportamiento de las series con datos disponibles (años 1998-2008) e incrementando en el modelo la temperatura como para obtener escenarios futuros.

5.2.6 Resultados

La Figura 31: muestra en cambios de tonalidad, la Línea de base y los escenarios de cambio climático Húmedo y Seco proyectados para el 2050.

Las Figura 32:,Figura 33: y Figura 34:Figura 34:presentan los cambios escenarios de cambio climático correspondientes a precipitación, evapotranspiración y rendimiento hídrico respectivamente proyectados al 2050.

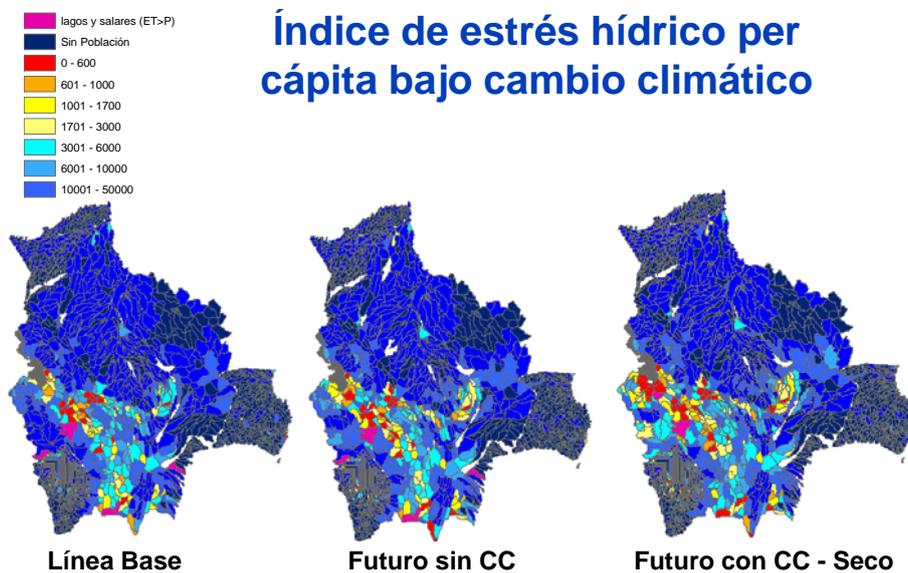


Figura 31: Línea de base condición actual para el año 2010 y los escenarios de cambio climático Húmedo y Seco proyectados para el 2050.

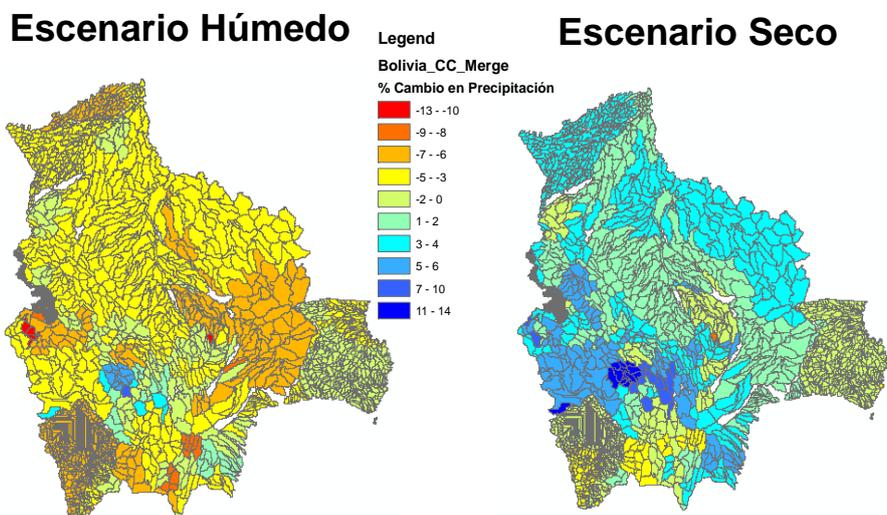


Figura 32: Cambios de Precipitación proyectada al 2050.

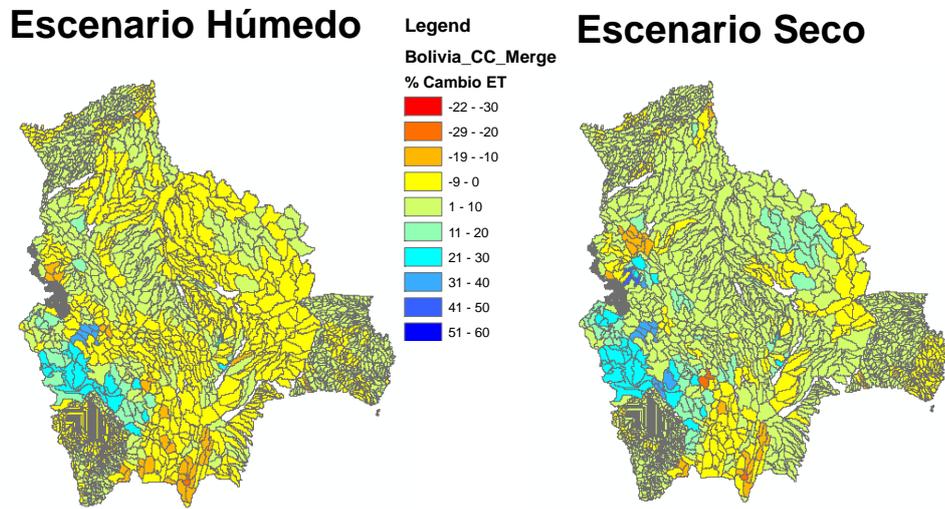


Figura 33: Evapotranspiración proyectada al 2050.

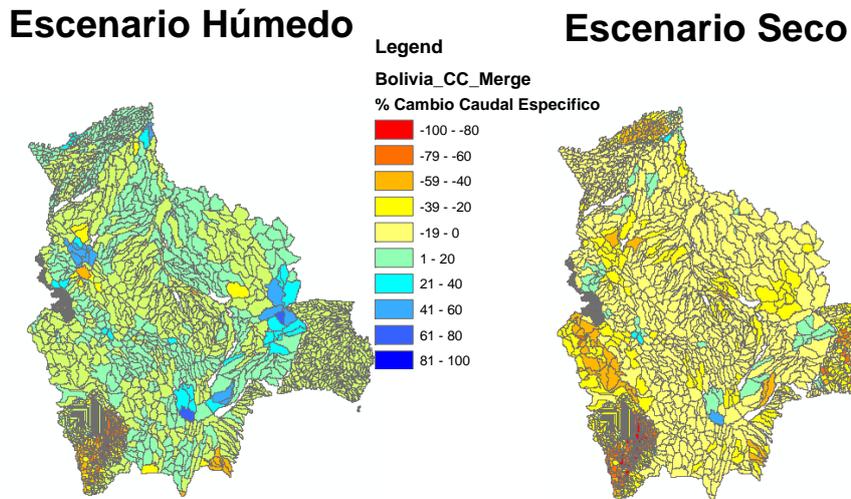


Figura 34: Rendimiento hídrico proyectada al 2050.

Impactos en el Balance Hídrico 2050s Para el Escenario Húmedo

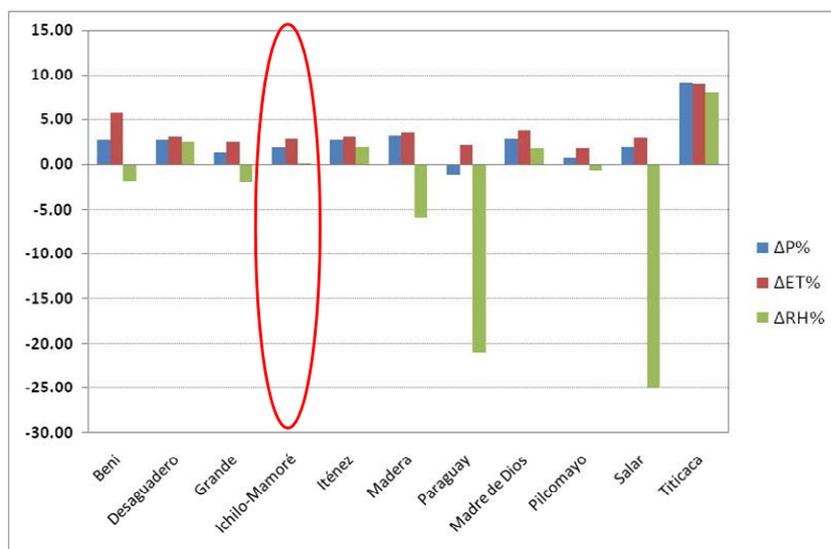


Figura 35: Impactos en el Balance Hídrico 2050s para escenario húmedo.

En las Figuras 35 y 36, se presentan los cambios de Rendimiento Hídrico Bajo Cambio Climático al 2050 para escenarios húmedo y seco en las cuencas modeladas.

En la Figura 35, se observa que al incrementar la precipitación, varía la evapotranspiración sin embargo no en todas se tiene un incremento del recurso hídrico.

En la Figura 36, se observa que al disminuir la precipitación, varía la evapotranspiración y en todas existe una disminución del recurso hídrico llegando en la cuenca del Salar hasta en un menos 37%.

De los resultados obtenidos se pudo determinar que existe bastante incertidumbre asociada a la escasa cantidad y calidad de datos en varias cuencas, como se presenta en la Figura 37:

En la Figura 37, se puede observar que si en la cuenca modelada existe una gran amplitud del gráfico Bloxplot con el índice de Humedad Climática, los datos existentes no ajustan bien con el modelo realizado como es el caso de las cuencas Titicaca, Madera, Madre de Dios y Beni y para poder mejorar esto se requiere mayor información, especialmente de caudales, lo contrario muestra un buen ajuste como es el caso de la cuenca del Pilcomayo o Río Grande o Salar.

Impactos en el Balance Hídrico 2050s Para el Escenario Seco

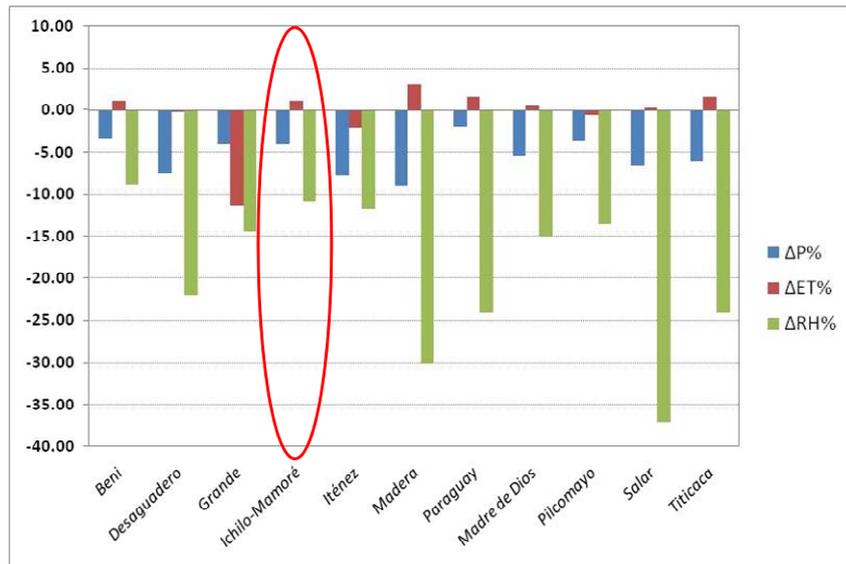


Figura 36: Impactos en el Balance Hídrico 2050s para escenario seco.

En la Figura 37: se puede observar que si en la cuenca modelada existe una gran amplitud del gráfico Bloxplot con el índice de Humedad Climática, los datos existentes no ajustan bien con el modelo realizado como es el caso de las cuencas Titicaca, Madera, Madre de Dios y Beni y para poder mejorar esto se requiere mayor información, especialmente de caudales, lo contrario muestra un buen ajuste como es el caso de la cuenca del Pilcomayo o Río Grande o Salar.

6 Determinación del Potencial Hidroeléctrico mediante Sensoramiento Remoto

El presente trabajo ha empleado una moderna metodología como alternativa ante la escasa información de la red meteorológica y cobertura espacial, incorporando información de nuevas fuentes como son los datos colectados mediante sensoramiento remoto provista por los satélites y de acceso global.

6.1 Datos Empleados

Los datos empleados corresponden a una composición mensual de datos de precipitación promedio mensual (enero a diciembre) para el año 2011 de tres fuentes de datos a) de TRMM-Tropical Rainfall Measuring Mission [49], b) CRU-

ClimateResearchUnit[50] y c) WORLDclim[51] y un Modelo de Elevación Digital (DEM) que presenta una mayor resolución espacial (15x15m) cual es el AdvancedSpaceborneThermalEmission and ReflectionRadiometer- Global Digital ElevationModel (ASTER GDEM por sus siglas en inglés) [52], que el empleado en la modelación hídrica con SWAT [41] como es el SRTM (30x30m²) [46] y se presentan en las Figura 38:a, b, c y Figura 39: respectivamente.

Índice de Humedad Climática para las 11 cuencas

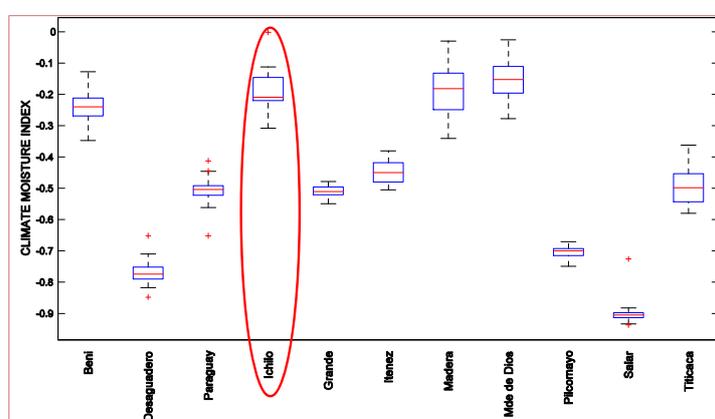


Figura 37: Índice de Humedad Climática para las 11 cuencas modeladas.

DATOS EMPLEADOS

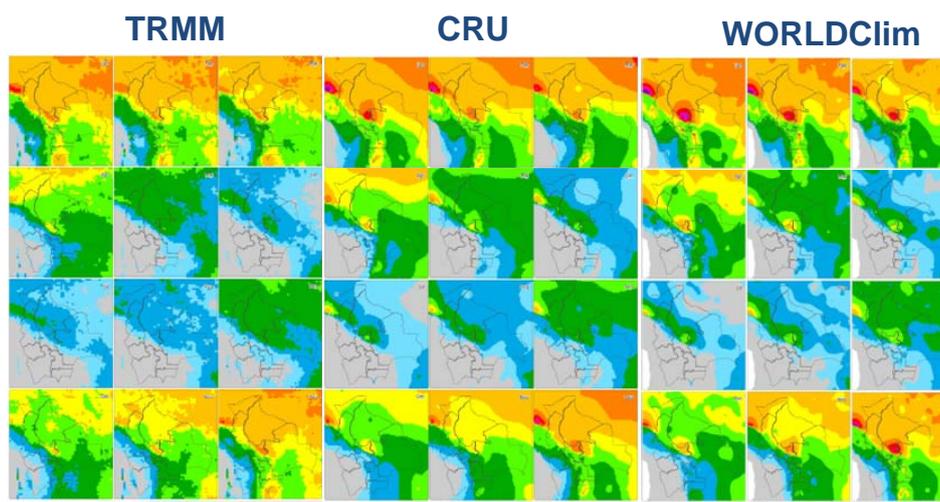


Figura 38: a) Datos de TRMM, b) Datos de CRU, c) Datos de WorldClim.

MODELO DIGITAL DE ELEVACION ASTER GDEM Resolución espacial 15x15m

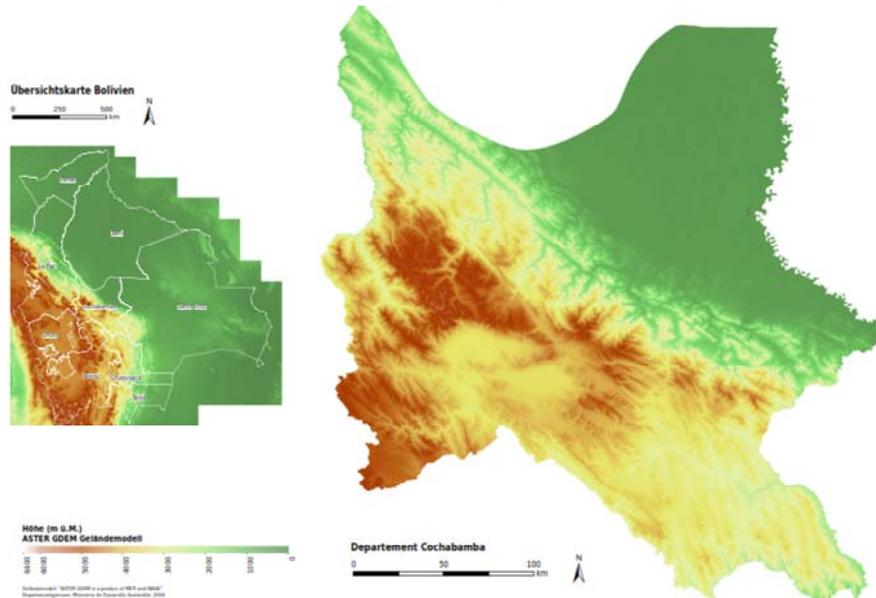


Figura 39: Datos de Modelo de Elevación Digital ASTER GDEM resolución espacial 15x15m².

7 Metodología

La metodología sugerida se refiere de los resultados empleados ya en otros países para la determinación de un balance Hídrico Superficial, como por ejemplo para la cuenca de Murray-Darling en Australia [53] y existiendo a su vez numerosas publicaciones con referencia a esta temática [54][55][56][57] y la metodología para la determinación de potencial hidroeléctrico concebida por Müller [58] (Figura 40:) siguiente:

La metodología que se empleó es fundamental cuando se pretende planificar y encontrar sitios donde se quiere realizar proyectos hidroeléctricos de simple pasada.

8 Resultados

La corrida del modelo permitió determinar el caudal en m³/s, así como potencial hidroeléctrico regional en kW/m como se presenta en las Figura 41: y Figura 42:, identificando sitios con potencial hidroeléctrico para la instalación de turbinas de 100, 1000 y 5000 kW Figura 43:, Figura 44: y Figura 45: respectivamente.

Metodología

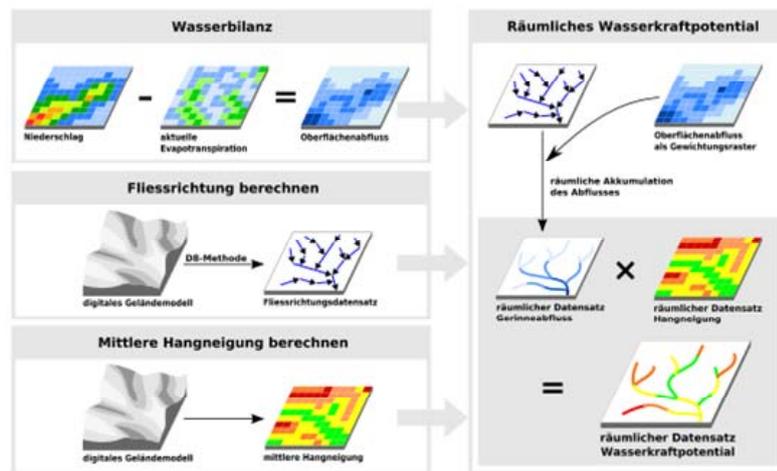


Figura 40: Metodología para la determinación de Potencial Hidroeléctrico.

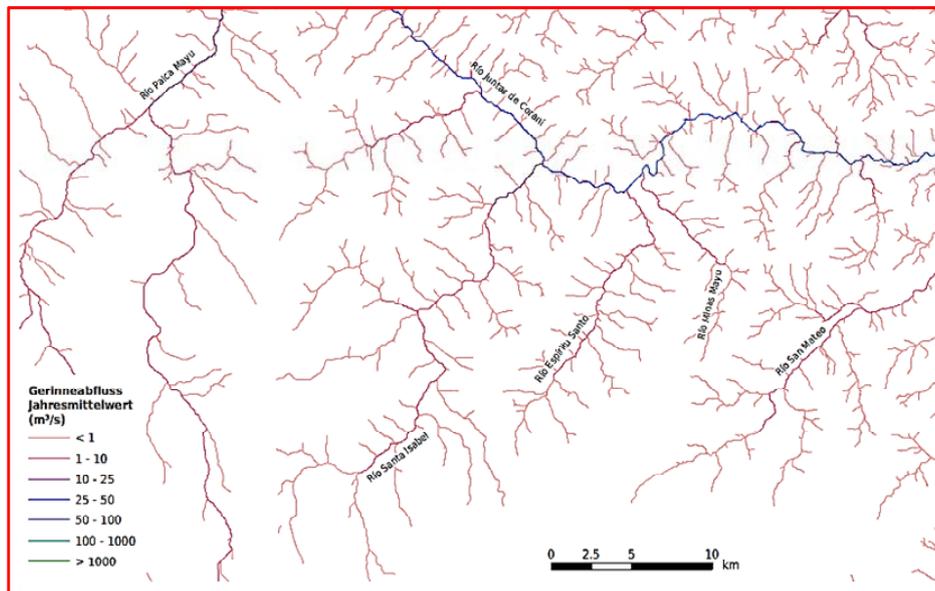


Figura 41: Resultados de caudal estimado [m3/s].

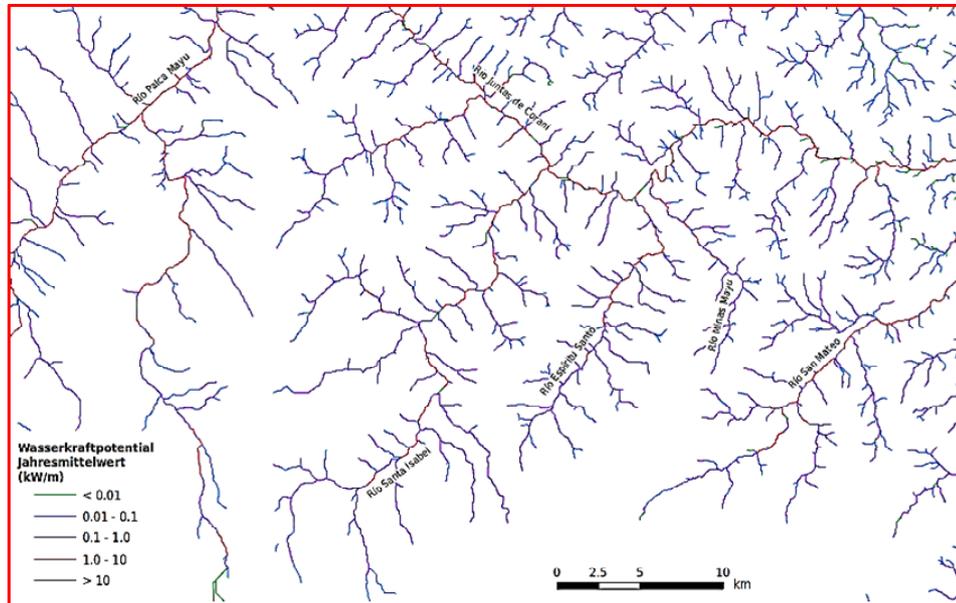


Figura 42: Potencial hidroeléctrico [kW/m].

Sitios con potencial hidroeléctrico para turbinas de 100 kW

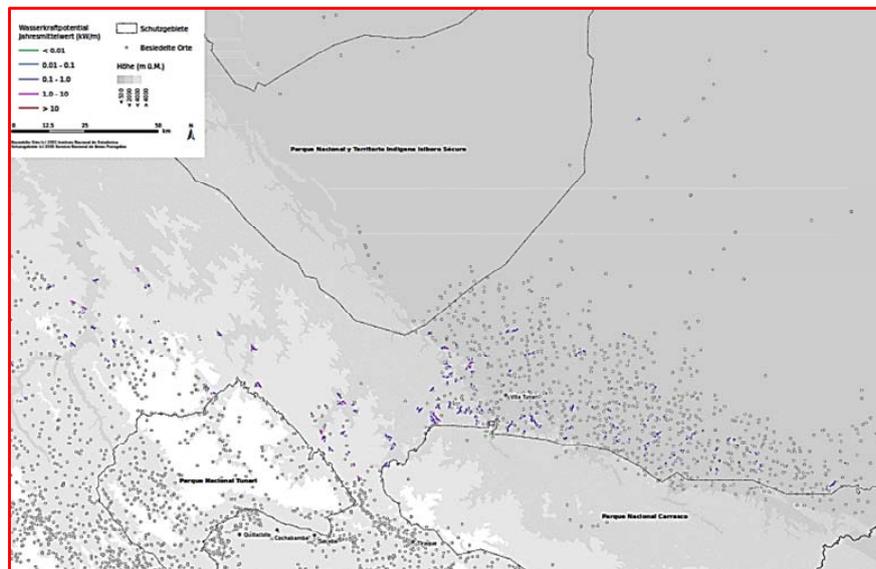


Figura 43: Sitios con Potencial Hidroeléctrico para microturbinas de 100 kW.

Sitios con potencial hidroeléctrico para turbinas de 1000 kW

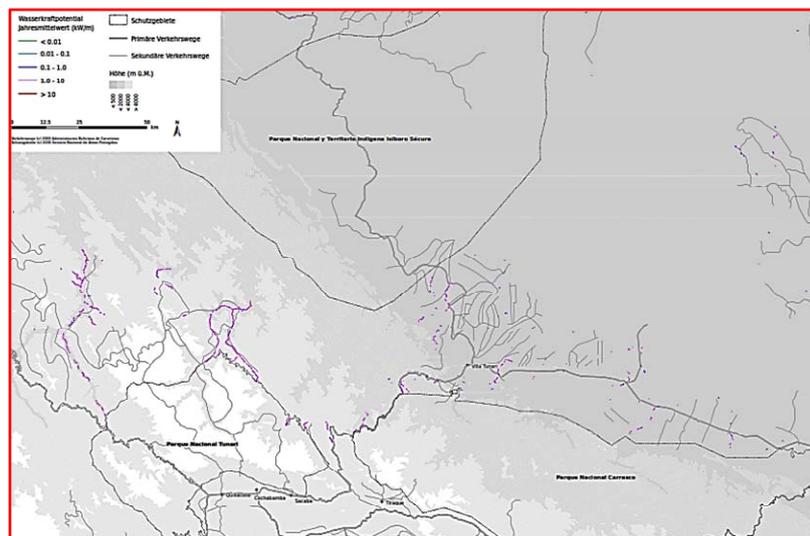


Figura 44: Sitios con Potencial Hidroeléctrico para microturbinas de 1000 kW.

Sitios con potencial hidroeléctrico para turbinas de 5000 kW

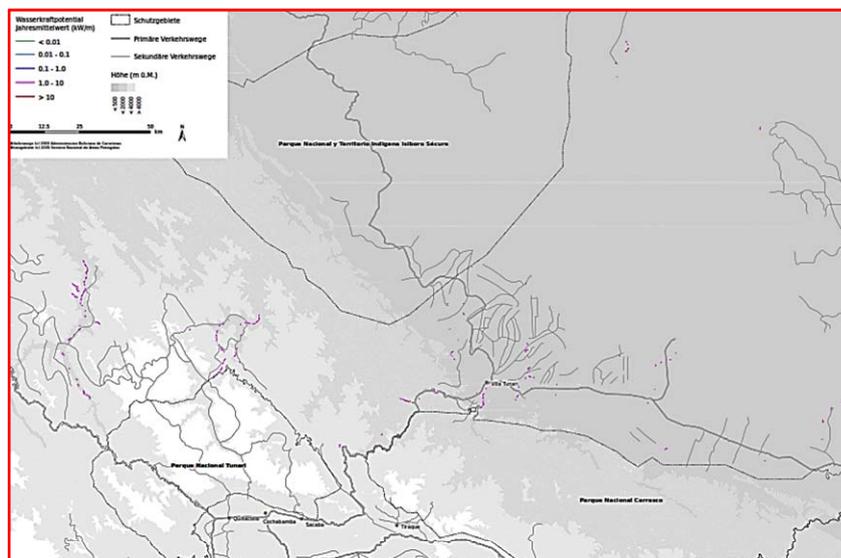


Figura 45: Sitios con Potencial Hidroeléctrico para microturbinas de 5000 kW.

Los resultados muestran que existe un muy buen potencial para el desarrollo pequeñas turbinas hidroeléctricas como las de 100kW Figura 43: y de forma general se puede apreciar que existen zonas con un buen potencial para turbinas de mayor tamaño Figura 44: y Figura 45:.

9 Conclusiones y Recomendaciones

El trabajo presentó información general en las áreas de agua, energía y cambio climático en Bolivia.

Presentó los resultados obtenidos de la modelación hidrológica realizada a nivel nacional empleando el modelo SWAT y cambio climático proyectado al 2050. La modelación permitió también visualizar la necesidad de contar con una mejor distribución espacial de la red meteorológica así como de la cantidad y calidad de datos para calibrar el modelo.

De los resultados obtenidos se pudo determinar que existe bastante incertidumbre asociada a la escasa cantidad y calidad de datos en varias cuencas ya que los datos existentes no ajustan bien en algunas cuencas con referencia a la modelación realizada como es el caso de las cuencas Titicaca, Madera, Madre de Dios y Beni y para poder mejorar esto se requiere mayor información especialmente de caudales, y muestran un buen ajuste las cuenca del Pilcomayo o Rio Grande o Salar donde se tiene mayor información.

Se empleado una moderna metodología como alternativa ante la escasa información de la red meteorológica y cobertura espacial, incorporando información de nuevas fuentes como son los datos colectados mediante sensoramiento remoto provista por los satélites y de acceso global. Los resultados muestran que existe un muy buen potencial regional para el desarrollo pequeñas turbinas hidroeléctricas como las de 100kW y de forma general que existen zonas con un buen potencial para turbinas de mayor tamaño.

La modelación hidrológica en combinación con los sistemas de información geográfica (GIS), datos de sensoramiento remoto y fuentes de acceso libre, pueden ser útiles al momento de realizar una estimación en la determinación de sitios con potencial hidroeléctrico, Constituyéndose en herramienta fundamental en el proceso de planificación de los recursos hídricos y energéticos y su adaptación al cambio climático en Bolivia.

10 Posibilidades para una mayor investigación

El trabajo presentó resultados que permiten concluir que existe un buen potencial hidrológico para implementar estaciones hidroeléctricas de paso en el área

central de Bolivia, sin embargo se puede señalar que no todo ese potencial es económicamente utilizable y se recomienda hacer un estudio más detallado en las zonas identificadas estimación del potencial en los sitios identificados incorporando por ejemplo baterías de miniturbinas hidroeléctricas y cuyo resultado del potencial de generación hidroeléctrica puede ser interesante o superior emprendimientos que requieren por ejemplo grandes caídas o construcción de presas que conllevan un alto costo o incluir en la metodología, nuevos criterios de análisis espacial que permitan tomar por ejemplo en consideración la accesibilidad de caminos a los sitios con potencial hidroeléctrico o la proximidad a los principales centros de demanda realizando por ejemplo un análisis costo-distancia.

AGRADECIMIENTOS

Expresar mis más sinceros agradecimientos a: RittaCestti y Jorge Escurra, personeros del Banco Mundial, a Valentyn Müller (Suiza). A Carlos Ortuño Viceministro de Recursos Hídricos y Riego de Bolivia, a SorabhTacwakolli y Hans Salm† personeros de la GIZ, a Has Willet Asesor en recursos hídricos (Holanda) para Bolivia. A Javier Domínguez (CIEMAT-España), a José Baesso (IEE-USP), a Miguel Delgado y Helmer Rodríguez de la Empresa Hidroeléctrica Corani S.A. a Elena Guinaldo de AECID. Al Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas. A la Agencia de Cooperación Internacional de Corea (KOICA). A Guillermo Bazoberry de la Dirección de Investigación Científica y Tecnológica Universidad Mayor de San Simón (UMSS). A José Ruzzante (ICES-Argentina) A Rubén Marca de la Transportadora de Electricidad (TDE), y Marcos Luján de la Universidad Católica Boliviana “San Pablo” (UCB).

REFERENCIAS

- [1] U.S._Bureau_Census. *Estimaciones de la población mundial para el 2050*. 2012; Available from: <http://blogs.census.gov/2011/10/31/the-world-population-at-7-billion/>.
- [2] Worldwatch_Institute. *The Looming Threat of Water Scarcity*. 2013; Available from: <http://www.worldwatch.org/looming-threat-water-scarcity-0>.
- [3] World_Business_Council_for_Sustainable_Development_(WBCSD). *Condiciones severas de estrés de agua en el 2025*. 2009; Available from: <http://www.climatebiz.com/resources/resource/water-energy-and-climate-change>.
- [4] Google, *Mapa de Conflictos de Agua*. 2010.

- [5] Water_footprint_network. *Water footprint concept*. 2012; Available from: <http://waterfootprintnetwork.org>.
- [6] United_Nations_Environmental_Programme_(UNEP). *Ciclo anual del agua, cantidades aproximadas, distribución y tiempo de residencia*. 1999; Available from: <http://oceanworld.tamu.edu/resources/oceanography-book/hydrocycle.html>.
- [7] Elaboración_Propia, *Ubicación y Descripción de Bolivia*. 2012.
- [8] Wikipedia, *Bolivia*. 2013.
- [9] Insituto_Geográfico_Militar, *Macrocuencas de Bolivia*, 2009.
- [10] Ministerio_de_Medio_Ambiente_y_Agua_(MMA YA), *Marco Legal*. 2013.
- [11] SENAMHI-Servicio_Nacional_de_Metereología_e_Hidrología. *Mapa de Isoyetas*. 1999; Available from: <http://www.senamhi.gob.bo/>.
- [12] Elaboración_Propia, *Mapa de Inundaciones de Bolivia composición años 2006, 2007 y 2008*, 2012.
- [13] Guinaldo, E., *Registro de Desastres en Bolivia 1970-2010* A.d.C.I.p.e.D. AECID, Editor 2011.
- [14] VMRHR-Viceministerio_de_Recursos_Hidricos_y_Riego. *Viceministerio de Recursos Hidricos y Riego*. 2012; Available from: <http://www.riegobolivia.org/>.
- [15] Foro_Consultivo_Tecnológico_A.C. *Diagnostico de Agua en Las Américas*. 2012; Available from: http://www.foroconsultivo.org.mx/libros_editados/agua_2012/bolivia.pdf.
- [16] World_Energy_Outlook-. *Estimaciones de uso de fuentes de Energía a nivel mundial para el 2035* 2010; Available from: <http://www.worldenergyoutlook.org/>.
- [17] U.S.Energy_Information_Administration, *Balance Energético de Bolivia*. 2005.
- [18] Elaboración_Propia, *Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Electrificación*. 2012.
- [19] Ministerio_Hidrocarburos_y_Energía, *MHE, AE y ENDE*. 2013.
- [20] Viceministerio_de_Electricidad_y_Energías_Alternativas, *Viabilidad Técnica del potencial de energías en renovables en Bolivia*. Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, 2012.
- [21] Elaboración_Propia-en_Base_a_Datos_de_la_TDE, *ESTIMACION DE LA VELOCIDAD MEDIA ANUAL DE VIENTO PARA BOLIVIA*. 2009.
- [22] 3TIER, *ATLAS EÓLICO DE BOLIVIA*. 2011.

- [23] Departamento_de_Física_Universidad_Mayor_de_San_Simón, *ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR PARA BOLIVIA*, 2010.
- [24] Ministerio_de_Hidrocarburos_y_Energía, *Mapa potencial de Generación de Energía Mediante Energías Renovables*. 2012.
- [25] Superintendencia_de_Electricidad, *Potencia de energía Termoeléctrica e Hidroeléctrica instalada de Bolivia*. 2008.
- [26] GIZ. *INVENTARIO NACIONAL DE PRESAS BOLIVIA 2010*. 2010; Available from: http://www.proagro-bolivia.org/files/presas_inventario_1.pdf
- [27] MAAYA, *Recursos Hídricos Transfronterizos*. 2007.
- [28] OLADE-Organización_Latinoamericana_de_Energía. *OLADE-Organización Latinoamericana de Energía*. 2003; Available from: <http://www.olade.org/>.
- [29] Montes_de_OCA, I., *Enciclopedia Geográfica de Bolivia*, 2005.
- [30] Plataforma_boliviana_frente_al_cambio_climático. *Plataforma boliviana frente al cambio climático*. 2010; Available from: <http://www.cambioclimatico.org.bo/>.
- [31] Vera, C., Silvestri, G., Liebman, B. and Gonzalez, P. , *Climate Change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC AR4 models*. Geophysical Research Letters, 2006. 33.
- [32] Alves, L.M., J. , *Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America*. Theor Appl Climatol., 2009.
- [33] Ambrizzi, T., Rocha, R., Marengo, J., Pisnitchenko, I. & Alves, L., *Scenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI Projeções de clima usando três modelos regionais*, in *MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE-MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS – SBF, DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE, D.M.C.G.e.E.s.a.B.S.-p.C.d.c.a.e.d.d.a.c.p.o.t.b.a.l.d.S. XXI*, Editor 2007.
- [34] Solman, S., Nuñez M., & Cabré M.F., *Regional Climate change experiments over southern South America. I Present Climate*. Climate Dynamics, 2007.
- [35] Galvez, J., *The Modulation of Rainfall by the South American Altiplano Lakes.*, in *School of Meteorology* 2005, University of Oklahoma. p. 101.
- [36] Garreaud, R.F., M. , *The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios*. Int. J. of Climatology, 2009. 29: p. 543-554.
- [37] Fuenzalida, H., *Clima de Chile para fines del siglo XXI Simulaciones con Modelo HADRM3 bajo escenarios A2 y B2 del IPCC*. Revista Ambiente y Desarrollo, 2007. 23(2): p. 9-14.

- [38] Da Rocha, R., Ambrizzi, T., Cuadra, S., Ferraz, S. & Fernandez, J. . *ReGCM3 simulations nested in the Hadley Center Model over South America the present day climate*. in *Proceedings of 8 ICSHMO*. 2006. Foz do Iguaçu, Brazil.
- [39] Boulanger, P., Martinez, F. & Segura, C. , *Projection of future climate change conditions using IPCC simulations, neural networks and Bayesian statistics. Part 1 Temperature mean state and seasonal cycle in South America Part 2 Precipitation mean state and seasonal cycle in South America*. *Climate Dynamics*, 2006. 27 y 28: p. 233-259 y 255-271.
- [40] Blacut, A., *Evaluación del modelo climático regional PRECIS para el área de Bolivia*. *REVISTA BOLIVIANA DE FISICA* 2010. 16: p. 1-12.
- [41] SWAT-Soil_and_Water_Assessment_Tool. *SWAT Soil and Water Assessment Tool*. 2012; Available from: <http://swat.tamu.edu/>.
- [42] ESRI. *ARCGIS*. 2013; Available from: www.esri.es/es/productos/arcgis.
- [43] 43. UMSS. *Universidad Mayor de San Simon*. 2010; Available from: <http://www.umss.edu.bo/>.
- [44] PROINPA, F. *Fundación PROINPA*. 2010; Available from: <http://www.proinpa.org/>.
- [45] Centro_Digital_de_Recursos_Naturales_de_Bolivia. *Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia* 2010; Available from: <http://essm.tamu.edu/bolivia/>.
- [46] SRTM-Shuttle_Radar_Topography_Mission. *SRTM- Shuttle Radar Topography Mission* 2010; Available from: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.
- [47] FAO. *FAO-La organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación*. 2010; Available from: <http://coin.fao.org/cms/world/bolivia/es/PaginaInicial.html>.
- [48] Unidad_Técnica_Nacional_de_Información_de_la_Tierra, *Cobertura de Uso Actual de la Tierra*. Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras - Viceministerio de Tierras -Unidad Técnica Nacional de Información de la Tierra, 2010.
- [49] TRMM-Tropical_Rainfall_Measuring_Mission. *Tropical Rainfall Measuring Mission* 2011; Available from: <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>.
- [50] CRU-Climate_Research_Unit. *CRU-Climate Research Unit*. 2012; Available from: <http://www.cru.uea.ac.uk/>
- [51] Worldclim-Global_Climate_Data. *Worldclim – Global Climate Data*. 2012; Available from: <http://www.worldclim.org/>.
- [52] ASTER_Global_Digital_Elevation_Model, A.G.-. *ASTER GDEM*. 2012; Available from: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>.

- [53] Guerschman, e.a., *Water balance estimates from satellite observations over the Murray-Darling Basin*, in *CSIRO*, CSIRO, Editor 2008, Australian Government: Australia. p. 1-83.
- [54] Wagner, S., H. Kunstmann, et al. , *Water balance estimation of a poorly gauged catchment in West Africa using dynamically downscaled meteorological fields and remote sensing information*. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2009. Parts A/B/C(34): p. 225-235.
- [55] Jasrotia, A., A. Majhi, et al., *Water Balance Approach for Rainwater Harvesting using Remote Sensing and GIS Techniques, Jammu Himalaya, India*. *Water Resources Management* 2009. 23(14): p. 3035-3055.
- [56] Bastiaanssen, W.G.M., H. Pelgrum, et al. , *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) Part 1 Formulation and 2 Validation*. *Journal of Hydrology* 1998.
- [57] Moriasi, D.N.A., J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner R. L.; Harmel, R. D.; y Veith, T. L., *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007. 50(3): p. 885-900.
- [58] Müller, V., *GIS-gestützte erarbeitung des Wasserkraft* in IFU2011.