

# DISPONIBILIDAD HÍDRICA Y DEMANDA DE AGUA EN LA CUENCA PIRAÍ: SITUACIÓN ACTUAL Y ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Modelación hidrológica en SWAT y WEAP



**Disponibilidad Hídrica y Demanda de Agua  
en la Cuenca Piraí: Situación Actual y  
Escenario de Cambio Climático con  
aplicación de SWAT y WEAP**

**Informe Final**

Documento elaborado por la Fundación Amigos de la Naturaleza.

*Equipo de trabajo:*

Marlene Quintanilla Palacios

*Revisión técnica:*

Jan Spickenbom

Natalia Calderón

Daniel Larrea

Fotografía de tapa: Rio Pirai en La Angostura (<http://lariquezanaturalyculturaldesantacruz.blogspot.com/>)

Fotografía de Contratapa: Rio Pirai en Santa Cruz (<http://lariquezanaturalyculturaldesantacruz.blogspot.com/>)

Ilustraciones: Marlene Quintanilla Palacios

Cita Bibliográfica:

Diseño y Diagramación:

Fundación Amigos de la Naturaleza

Km 7 1/2 Doble Vía a La Guardia

Tel: (591-3) 355-6800 Fax: (591-3) 354-7383

e-mail: [fan@fan-bo.org](mailto:fan@fan-bo.org) - [www.fan-bo.org](http://www.fan-bo.org)

# INDICE

<b>1. RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
3.1. GENERAL	3
3.2. ESPECÍFICOS	3
<b>4. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA E HIDROCLIMÁTICA DE LA CUENCA</b>	<b>4</b>
4.1. CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS	4
4.2. FISIOGRAFÍA	5
4.3. TIPOS DE SUELO	6
4.4. USO Y COBERTURA VEGETAL, ANÁLISIS DE CAMBIO DE USO 2005, 2010 Y 2030	7
4.5. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	10
4.5.1 VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN	10
4.5.2. ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA	11
4.6. ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO	12
<b>5. DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA PIRAÍ</b>	<b>14</b>
5.1. METODOLOGÍA	14
5.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO SWAT	15
5.1.2. PREPARACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA AL MODELO	16
5.1.3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO-CALIBRACIÓN	16
5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
5.2.1. CALIBRACIÓN DE LOS RESULTADOS	47
5.2.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA	48
5.2.2.1. Generación de agua por escurrimiento superficial	49
5.2.2.2. Proceso de Evapotranspiración	51
5.2.2.3. Aporte de aguas subterráneas (Recarga acuífera)	52
5.2.2.4. Producción de Sedimentos	54
5.2.3. SITUACIÓN FUTURA E IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA	55
5.2.3.1 Generación de Caudales proyectados para el año 2030	55
5.2.3.2. Almacenamiento de agua subterránea proyectada al 2030	57

5.2.3.3. Generación de Sedimentos proyectados al 2030	58
<b>5.3. POTENCIAL HÍDRICO EN LA CUENCA PIRAI</b>	<b>59</b>
<b><u>6. CONSUMO Y DEMANDA DE AGUA EN LA CUENCA PIRAI</u></b>	<b><u>60</u></b>
<b>6.1. PROCESO METODOLÓGICO</b>	<b>62</b>
6.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO WEAP	62
6.1.2. CONEXIÓN DE LOS RECURSOS Y DEMANDAS EN WEAP	63
<b>6.2. USO ACTUAL DEL AGUA</b>	<b>64</b>
6.2.1. CONSUMO DE AGUA HUMANO	64
6.2.1.1. Cobertura y acceso al agua para consumo humano	67
6.2.1.2. Procedencia del agua para consumo humano	68
6.2.2. USO DEL AGUA EN RIEGO	69
6.2.3. CONSUMO DE AGUA PARA LA GANADERÍA	70
<b>6.3. CONSUMO TOTAL DE AGUA</b>	<b>71</b>
<b>6.4. DEMANDA ACTUAL DEL AGUA A NIVEL MENSUAL Y SECTORIAL</b>	<b>73</b>
<b>6.5. PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA 2010-2030</b>	<b>75</b>
<b><u>7. BALANCE: OFERTA VS. DEMANDA DE AGUA</u></b>	<b><u>76</u></b>
7.1. RELACIÓN ACTUAL ENTRE LA OFERTA Y LA DEMANDA DE AGUA	77
7.2. RELACIÓN ENTRE LA OFERTA Y LA DEMANDA DE AGUA 2010- 2030	78
<b><u>8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRE</u></b>	<b><u>78</u></b>
<b><u>9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u></b>	<b><u>79</u></b>
<b><u>10. BIBLIOGRAFÍA</u></b>	<b><u>82</u></b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Sistemas hidrológicos y Ecorregiones .....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Curva hipsométricas de la cuenca Pirai.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3. Tipos de suelos en la cuenca Pirai.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 4. Uso y cobertura vegetal en los años 2005 y 2010 .....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5. Uso y cobertura vegetal proyectada desde el 2010 al 2030 .....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 6. Variabilidad espacial de la Precipitación anual y mensual en la Cuenca Pirai.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7. Variabilidad espacial de la Temperatura media anual y media mensual.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 8. Cambios en la precipitación anual desde el año 1992 al 2030 .....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 9. Cambio climático en la cuenca Pirai proyectado al 2030 .....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 10. Cambios producidos en la precipitación y temperatura para el año 2030 .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 11. Esquema metodológico de SWAT.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 12. Series de caudal mensual observado y simulado en a) La Bélgica b) Eisenhower .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 13. Generación de caudales promedios mensuales 1992, 2000, 2005 y 2010 .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 14. Caudales medios generados en las subcuencas del Pirai.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 15. Evapotranspiración anual por subcuencas.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 16. Relación temporal del agua subterránea almacenada.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 17. Almacenamiento de agua subterránea .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 18. Descarga de Sedimentos .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 19. Dinámica hidrológica de la cuenca Pirai hasta el 2030 .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 20. Volumen promedio de caudales proyectados al año 2030 .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 21. Cambios en la generación de caudales 2010-2030 .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22. Volumen de agua subterránea almacenada en el año 2030 .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 23. Almacenamiento de agua subterránea en el año 2030.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 24. Producción de Sedimentos en el 2030.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 25. Perfil del acuífero conformado por el río Pirai y Grande.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 26. Número de Localidades/comunidades en la cuenca Pirai.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 27. . Esquema metodológico del WEAP .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 28. Esquema gráfico de conexión de los recursos y demandas de la Cuenca Pirai en WEAP.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 29. Municipios, Localidades y Poblaciones en la cuenca .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 30. Consumo per cápita a nivel municipal .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 31. Consumo Humano de Agua anualmente .....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 32. Procedencia del agua en el departamento de Santa Cruz .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 33. Volumen de agua utilizada en riego por año .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 34. Volumen de agua anual consumida por el Ganado.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 35. Volumen total de agua consumida por año .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 36. Demanda Total de Agua por año en los Municipios .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 37. Demanda de agua a nivel mensual.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 38. Consumo sectorial de agua a nivel mensual .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 39. Demanda de agua proyectada (2010-2030) a nivel anual y sectorial.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 40. Disponibilidad hídrica y demanda de agua a nivel mensual 2010 .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 41. Oferta hídrica y la demanda de agua proyectada para el año 2030.....</i>	<i>78</i>

## LISTA DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Uso y cobertura vegetal en los años 2005-2010 y proyecciones al 2030 .....</i>	<i>9</i>
<i>Cuadro 2. Resultados estadísticos del proceso de calibración .....</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 3. Superficie y porcentaje de los Municipios involucrados .....</i>	<i>61</i>
<i>Cuadro 4. Población rural y urbana en la cuenca Pirai.....</i>	<i>65</i>
<i>Cuadro 5. Consumo de agua anual a nivel municipal .....</i>	<i>66</i>
<i>Cuadro 6. Disponibilidad de agua por cañería en porcentajes .....</i>	<i>68</i>
<i>Cuadro 7. Volumen de riego por año a nivel municipal.....</i>	<i>69</i>
<i>Cuadro 8. Consumo anual de agua en la Ganadería.....</i>	<i>70</i>
<i>Cuadro 9. Consumo Total de Agua en las Subcuencas y Municipios.....</i>	<i>72</i>

## 1. RESUMEN

La cuenca Piraí, abastece de agua a la ciudad de Santa Cruz (1'622.712 habitantes) y a 241 localidades (82.115 habitantes). Nace en montañas altas de Samaipata (2.600 ms.n.m.) extendiéndose 3.967 km<sup>2</sup> hacia la llanura oriental (350 m.s.n.m.), atravesando valles, chaco, yungas y amazonia. Su hidrología está afectada por la agricultura y ganadería, la deforestación 2005-2010 alcanza 34.401 ha, proyectándose 82.578 ha. al 2030 para la agricultura. La ganadería incrementará de 43.053 ha (34% pastos cultivados, 36% ramoneo y 29% en sabanas) a 57.661 ha. En el escenario climático ECHAM4-A2 para el 2030 (FAN-Seiler, 2009), la precipitación mensual disminuye desde enero hasta agosto, y la temperatura aumentará +1.25°C en promedio anual.

Bajo este contexto, se determinó la disponibilidad y demanda hídrica a través de la modelación hidrológica en SWAT y WEAP, estableciendo su balance actual y futuro. La calibración se realizó con caudales medidos (1992-2001) de las Estaciones La Bélgica y Eisenhower, obteniendo un ajuste aceptable. El caudal promedio alcanza 137,4 m<sup>3</sup>/s en 1992 bajando a 63,6 m<sup>3</sup>/s en el 2005 y 44,9 m<sup>3</sup>/s al 2010, para el 2030 se proyecta sólo 44,9 m<sup>3</sup>/s. El agua almacenada anualmente por percolación, en 1992 reduce de 1.320 mm a 724 mm y 361 mm en el 2005 y 2010 respectivamente, al 2030 se reducirá a 237 mm, restringiéndose las zonas de recarga hacia el Parque Nacional Amboró. La producción de sedimentos incrementa de 4,2 t/ha/año en 1992 a 58 t/ha/año en el 2010, proyectándose 136 t/ha/año al 2030, concentradas en zonas montañosas. El consumo total de agua es de 54'549.435 m<sup>3</sup>/año, el 86% para consumo humano, 10% riego (producción de alimentos) y 4% para la ganadería. El 80% del agua es demandada por la capital cruceña, 7% es requerida para riego en el municipio Samaipata y 13% demandado por poblaciones rurales, al 2030 la demanda alcanzara los 115'901.118 m<sup>3</sup>/año.

En el balance de agua, la disponibilidad es mayor a la demanda, existiendo déficit hídrico de julio a octubre. Para el 2030 existirá mayor presión hídrica, la oferta disminuye en 20% y la demanda crece hasta 110%. Es indispensable desarrollar medidas integrales, que protejan y conserven zonas de recarga y se aprovechen racionalmente los recursos hídricos.



## 2. INTRODUCCIÓN

La cuenca alta del río Piraí, constituye una de las principales fuentes de abastecimiento de agua de la ciudad de Santa Cruz (1'622.712 habitantes) y de alrededor de 241 localidades ubicadas dentro de la cuenca (82.115 habitantes). Está localizada en la faja subandina del departamento de Santa Cruz, y nace en las altas montañas del municipio de Samaipata (arriba de los 2.100 m.s.n.m.), recorriendo sus aguas en dirección noreste. El sistema fluvial de la cuenca alta del río Piraí abarca una superficie de 3.967 km<sup>2</sup>, con una variación altitudinal de 350 a 2.600 m.s.n.m.

Durante los últimos 30 años, la cuenca del río Piraí ha sufrido un proceso de deterioro, principalmente en su dinámica hidrológica natural, debido a los impactos ocasionados por la construcción de la carretera Santa Cruz–Cochabamba, generando la deforestación e inadecuado uso de la tierra. Según el SEARPI<sup>1</sup>, el puente Eisenhower<sup>2</sup> construido en los años 1954-1955, tenía en su tiempo una altura de 6 a 7 metros sobre el nivel del lecho del río, y en la actualidad su altura no supera los 2 ó 3 metros, debido a una fuerte sedimentación producida por la erosión de la cuenca. En varios tramos, el cauce se encuentra por encima del nivel de las tierras adyacentes, originando desbordes en épocas de crecidas de los caudales.

A través de la modelación hidrológica del río Piraí en SWAT (Soil and Water Assessment Tool), se pretende determinar la disponibilidad del recurso hídrico y conocer su ciclo hidrológico, sobre todo para el abastecimiento de agua para consumo humano. Asimismo, a través de la información climática y de los estudios existentes, se requiere conocer la distribución espacial y temporal de las zonas de recarga acuífera y los volúmenes de agua generados por la cuenca. Con estos resultados, se analizará a través de la herramienta WEAP (Water Evaluation and Planning System) el balance entre la disponibilidad y la demanda de agua, y los déficits a los que está sometida la cuenca.

El consumo y demanda de agua en la cuenca Piraí, en los últimos años se ha incrementado, debido a un importante crecimiento poblacional de sus municipios, que no solo aumentaron en población sino también en la expansión agrícola y ganadera. Por lo tanto, es imprescindible conocer los distintos usos del agua, su dinámica temporal y sectorial a nivel municipal y territorial porque coadyuvará en una mejor planificación y gestión del agua.

---

<sup>1</sup> Servicio de Encauzamiento de Aguas y Regularización del Río Piraí

<sup>2</sup> El puente Eisenhower está localizado a la salida de la cuenca, conecta la carretera Santa Cruz-Cochabamba entre el límite de los municipios de Montero y Portachuelo.

El río Piraí es de vital importancia para sus pobladores porque de este depende su calidad de vida, si sus funciones hidrológicas se modifican por causa de factores antrópicos y/o climáticos, cambiará la disponibilidad de agua almacenada en los acuíferos y por ende los caudales generados en sus tributarios. Es por eso que los servicios ambientales del Piraí, son fundamentales para el suministro de agua necesaria para el consumo humano, la producción agropecuaria que garantizará la seguridad alimentaria, el mantenimiento de sus ecosistemas y la regulación del clima.

### **3. OBJETIVOS**

#### ***3.1. General***

Desarrollar un análisis integral sobre la disponibilidad hídrica y la demanda de agua en la cuenca Piraí, para establecer el balance oferta versus consumo de agua, bajo un contexto de situación actual y escenario de cambio climático a través de la modelación hidrológica en SWAT y WEAP.

#### ***3.2. Específicos***

- Caracterización hidrológica y climática de la cuenca.
- Caracterización biofísica de la cuenca: topografía, pendientes, suelos, uso actual y cambios futuros en la cobertura vegetal.
- Determinar el balance hídrico de la cuenca (ciclo del agua local) y definir disponibilidad efectiva de agua, que permitan identificar las zonas prioritarias para la regulación hídrica en la cuenca.
- Análisis del consumo y demanda total del agua según su uso (consumo humano, agrícola y ganadero) a nivel sectorial y municipal.
- Generación de escenarios de proyección futura de la disponibilidad y la demanda de agua para consumo humano, agrícola y ganadero.



En la zona alta de la cuenca, al Noroeste se encuentra el Parque Nacional Amboró, el cual capta y contribuye al almacenamiento de agua en estratos inferiores del suelo y a la escorrentía del río Piraí. Las aguas del río en su trayecto hacia el Noreste se desplazan por un valle hasta llegar a la zona de llanura oriental, donde aproximadamente un millón de personas reside en poblaciones urbanas y áreas rurales de la cuenca.

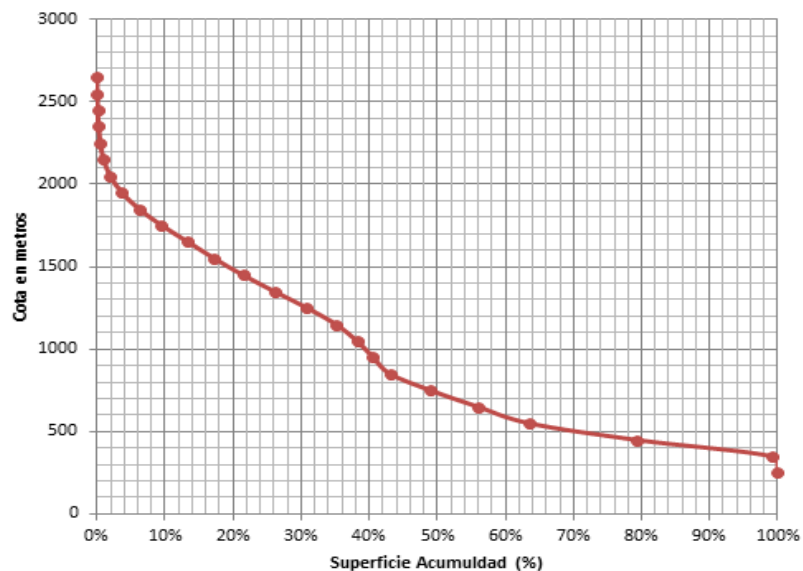
Durante el recorrido del río, en periodos de lluvia suelen suscitarse crecidas sobretodo en la zona plana a levemente ondulada de la cuenca. El agua tiende a formar meandros y ramificaciones, produciendo erosión en las orillas (aguas debajo de la cuenca), provocando desbordes e inundaciones de considerable magnitud.

## 4.2. Fisiografía

Los pisos altitudinales de la cuenca Piraí, varían desde los 278 m.s.n.m. hasta los 2.659 m.s.n.m., de acuerdo a la curva hipsométrica el 50% de la superficie está por encima de los 750 m.s.n.m., la tendencia de la curva (figura 2) define a una cuenca sedimentaria y en fase de vejez.

Las pendientes son muy variables en la cuenca de forma alargada del Piraí, donde la zona montañosa (cabecera de la cuenca) comprende pendientes escarpadas (20-50% de inclinación, en 1.188 km<sup>2</sup>) y muy escarpadas (>50% de inclinación, en 324 km<sup>2</sup>) en el 38% de la superficie total. Los valles y llanuras abarcan el 62% de la cuenca, en pendientes planas (<5% de inclinación, en 1.272 km<sup>2</sup>) y onduladas (5-20% de inclinación, en 1.183 km<sup>2</sup>).

Figura 2. Curva hipsométricas de la cuenca Piraí

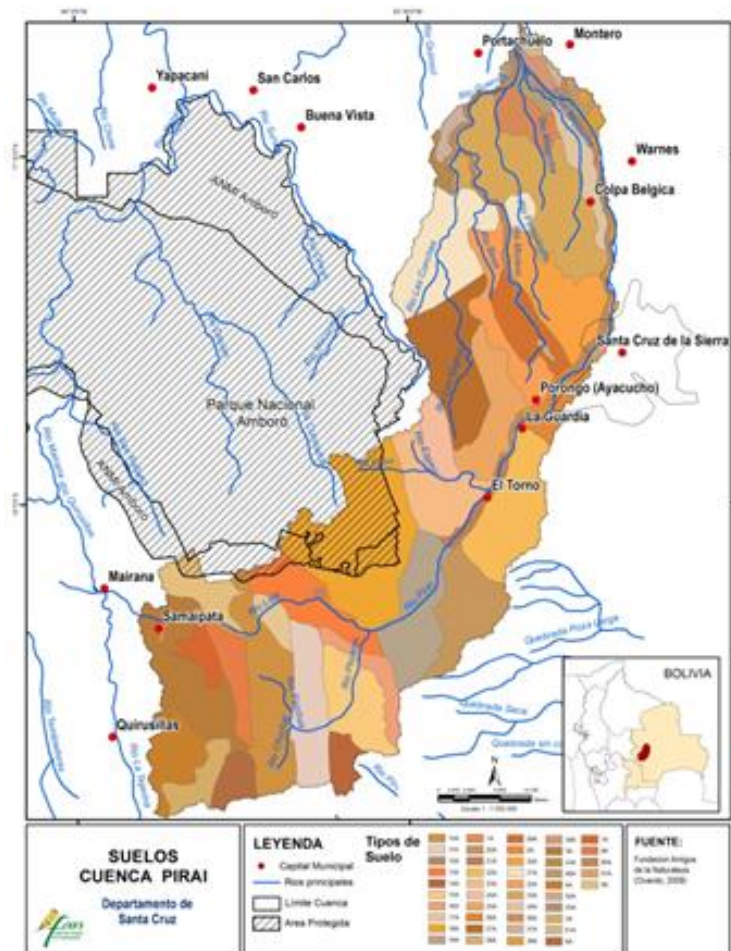


Fuente: Elaboración propia

### 4.3. Tipos de suelo

Para el presente estudio, la información de suelos se utilizó del mapa elaborado por FAN (Ovando, 2009), cuya clasificación del suelo comprende la siguiente información: 1) Análisis granulométrico de cada estrato y perfil constitutivo del suelo, para obtener porcentajes de arena, limo y arcilla. 2) Grupo Hidrológico del suelo (A, B, C y D), según la metodología del número de la curva del U. S. Soil Conservation Service, parámetro que se obtuvo en base a la conductividad hidráulica saturada en la capa de suelo de 0 a 0.5 m (Chow, 1994). 3) La erodabilidad calculada en base a la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith, en la que K es el índice de erodabilidad. 4) La densidad aparente (BD) que es la relación entre la masa de suelo seco y su volumen total. 5) La conductividad hidráulica definida como la medida de la capacidad del suelo para permitir el paso del agua. Todos estos parámetros son ingresados al modelo hidrológico SWAT (versión 2012), bajo el siguiente orden observado en el mapa resultante, cuya codificación integra a 46 unidades de suelos codificados en 1A, 1B,...1N.

Figura 3. Tipos de suelos en la cuenca Pirai

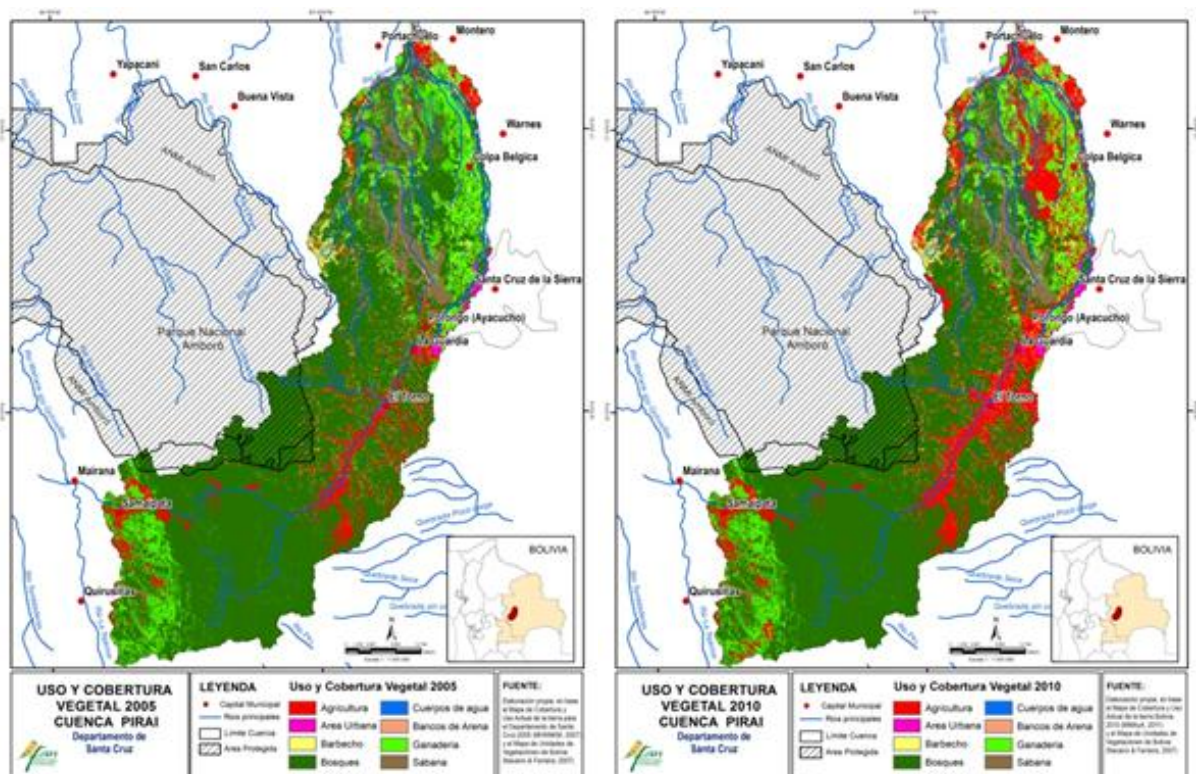




#### 4.4. Uso y Cobertura vegetal, análisis de cambio de uso 2005, 2010 y 2030

Los procesos hidrológicos en la cuenca Pirai están influenciados por la tipología y estructura de las diferentes formaciones vegetales, donde las actividades antrópicas (agrícolas y pecuarias) tienden a eliminar la vegetación natural para su expansión. Los diferentes pisos ecológicos en la cuenca, distinguen a nueve formaciones de bosques (bosques siempre verdes, bosques inundables, chiquitanos, Boliviano-Tucumanos, xerofíticos y subandinos), formaciones de sabanas herbáceas, depósitos de arena (playas y dunas), actividades agrícolas (manual, mecanizada, múltiple y tradicional bajo riego), ganadería (pastos cultivados, ramoneo, y pastoreo en sabanas) y área urbana.

Figura 4. Uso y cobertura vegetal en los años 2005 y 2010



Fuente: Elaboración propia

Las distintas formaciones vegetales y el uso del suelo detalladas en el cuadro 1, fueron determinadas a partir del Mapa de Vegetación de Bolivia (Navarro & Ferreira, 2007), el mapa de Uso Actual y Cobertura Vegetal 2005 del Departamento de Santa Cruz (MHNNKM<sup>3</sup>, 2007) y el mapa de Uso y Cobertura Vegetal 2010 en Bolivia (MDRT<sup>4</sup>, 2011). Toda esta información,

<sup>3</sup> Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado

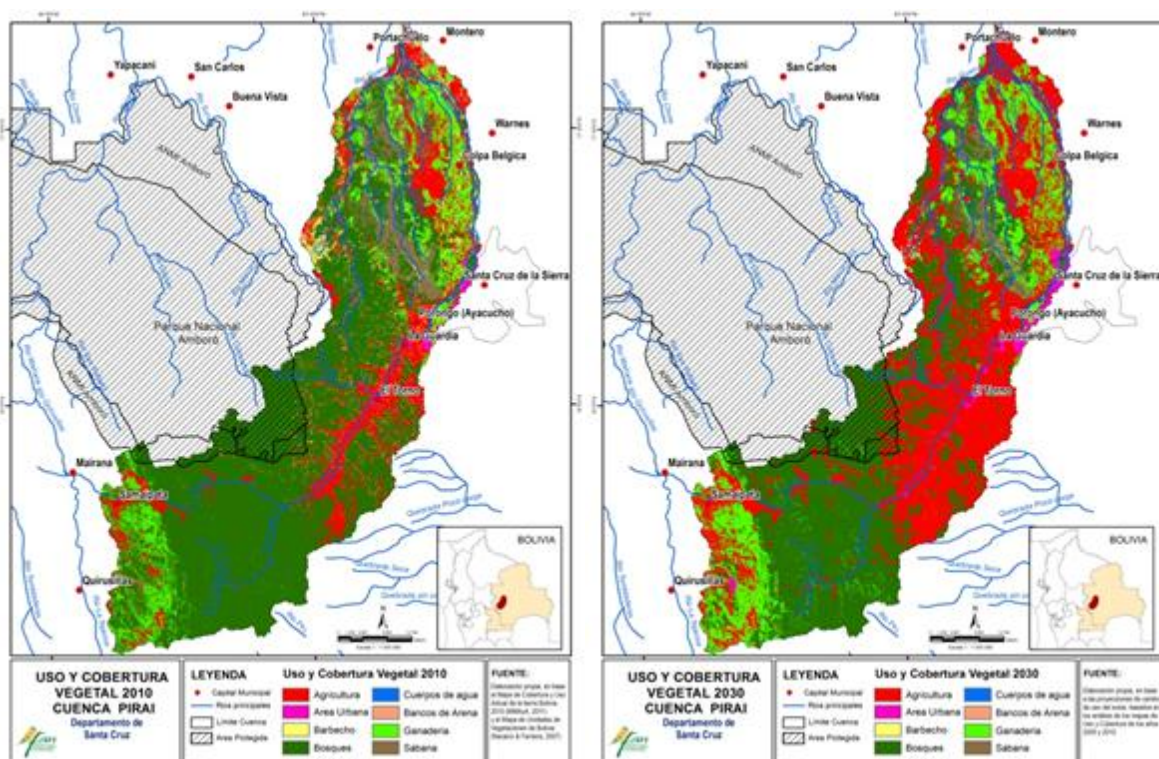
<sup>4</sup> Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras

permite analizar el uso y cobertura vegetal en el año 2005 y 2010 observados según las categorías asignadas para una mejor visualización en la figura 4, donde se denotan claramente los cambios generados por la expansión agropecuaria.

La actividad agrícola desde al año 2005 ha tenido un incremento en superficie de 7.5% (299 km<sup>2</sup>) a 16.4% (651 km<sup>2</sup>) en el año 2010, generando una deforestación de 34.401 hectáreas, ocasionando la disminución de los bosques de 70.4% (2791 km<sup>2</sup>) a 61.7% (2448 km<sup>2</sup>). Asimismo, la ganadería actualmente abarca 43.053 hectáreas (34% pastos cultivados, 36% ramoneo y 30% en sabanas). En la región Noreste de la cuenca se encuentra protegida en una superficie de 247 km<sup>2</sup> por el Parque Nacional Amboró, no obstante el avance de la frontera agrícola y ganadera amenaza a los ecosistemas de esta región.

En base a los cambios identificados en el periodo 2005 y 2010, se han proyectado los posibles cambios a producirse en la cuenca Piraí para el año 2030, para analizar su impacto en la producción hidrológica y gestión del agua, además de considerar parámetros e índices de cambio climatológico. En este sentido, se estima que la deforestación al 2030 se expandirá a 82.578 hectáreas más, y la ganadería incrementará en una superficie de 57.661 hectáreas.

**Figura 5. Uso y cobertura vegetal proyectada desde el 2010 al 2030**



Fuente: Elaboración propia

Los cambios de uso del suelo proyectados al 2030 en la cuenca Pirai, experimentaran cambios muy importantes, estimando que el 34% de los bosques existentes en el 2010 desaparecerán por la expansión agrícola y pecuaria llegando hasta una superficie de 2.065 Km<sup>2</sup> (1.488 km<sup>2</sup> agricultura y 577 km<sup>2</sup> de ganadería).

El cambio de uso del suelo al 2030, generará variaciones en la hidrología de la cuenca, afectando su equilibrio porque está en función de la distribución de la vegetación y su interacción con el agua y el suelo, cualquier alteración modificará el ciclo hidrológico. La conversión de los bosques para agricultura o pastos, reducirán los caudales de los ríos en estaciones secas agravando la escasez del agua en periodos de sequía y generando incremento de caudales en la época lluviosa generando inundaciones y enfatizando la erosión de las laderas en estaciones lluviosas.

**Cuadro 1. Uso y cobertura vegetal en los años 2005-2010 y proyecciones al 2030**

CATEGORÍAS	USO Y COBERTURA VEGETAL	Año 2005		Año 2010		Proyección Año 2030	
		Superficie (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Agricultura	Agricultura manual	189	7.5%	189	16.4%	653	37.5%
	Agricultura mecanizada	49		49		104	
	Agricultura Múltiple			<b>352</b>		<b>608</b>	
	Agricultura tradicional bajo riego	60		60		124	
Área Urbana	Área Urbana	<b>19</b>	0.5%	<b>21</b>	0.5%	58	1.5%
Barbecho	Barbecho	161	4.1%	161	4.1%	21	0.5%
Bosques	Bosque inundable de la llanura aluvial de ríos de aguas blancas del suroeste de la Amazonia	59	70.4%	59	61.7%	18	40.9%
	Bosque siempre verde estacional subandino del suroeste de la Amazonia	87		87		56	
	Bosque subhúmedo semidecíduo de la Chiquitania y el Beni	<b>1653</b>		<b>1327</b>		<b>785</b>	
	Bosques bajos edafoxerófilos montanos y basimontanos Boliviano-Tucumanos	26		26		14	
	Bosques chiquitanos de transición a la Amazonia sobre suelos bien drenados	6		6		1	
	Bosques montanos Boliviano - Tucumanos de Pino de Monte	<b>67</b>		<b>58</b>		<b>33</b>	
	Bosques subandinos Boliviano-Tucumanos	459		459		434	
	Bosques subhúmedos Boliviano-Tucumanos	<b>215</b>		<b>207</b>		<b>135</b>	
	Bosques xerofíticos interandino-subandinos Boliviano-Tucumanos	220		220		148	
Cuerpos de agua	Cuerpos de agua	48	1.2%	48	1.2%	48	1.2%
Bancos de Arena	Depósitos de Arena Playas y Dunas	20	0.5%	20	0.5%	20	0.5%
Ganadería	Ganadería con pastos cultivados	144	10.9%	144	10.6%	144	14.5%
	Ganadería de ramoneo	<b>163</b>		<b>153</b>		<b>249</b>	
	Ganadería en sabanas	123		123		184	
Sabana	Sabana herbácea	198	5.0%	198	5.0%	133	3.3%
<b>TOTAL</b>		<b>3967</b>	<b>100%</b>	<b>3967</b>	<b>100%</b>	<b>3967</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia



## **4.5. Caracterización Climática**

Los procesos hidrológicos dependen del régimen de lluvias y de su intensidad, variando según los pisos altitudinales, tipos de suelos y la cobertura vegetal. Asimismo, la variabilidad mensual y espacial de la temperatura, influye en la regulación climática e hídrica (generación de lluvias, la evaporación, evapotranspiración y el déficit hídrico), condicionando la producción agropecuaria y la dinámica natural de los ecosistemas.

La variabilidad espacial y temporal de la precipitación y temperatura, se determinó con datos promedios mensuales de estaciones meteorológicas del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) y SEARPI (Servicio de Encauzamiento de Aguas y Regularización del Río Piráí), esta información permitió generar isoyetas e isotermas en la cuenca a nivel anual y mensual. En la cuenca Piráí, existen vacíos de información sobre todo en la cabecera, por lo que es necesario analizar metodologías complementarias que coadyuven mejorar esta información.

Para la modelación en SWAT se requieren datos a nivel diario, este aspecto restringió la selección de estaciones climáticas, utilizando finalmente en la modelación las siguientes estaciones: 1) Albosa, 2) Angostura SCZ, 3) Bermejo SEARPI, 4) Campamento Espejos, 5) Central Santa Cruz, 6) El Patuju, 7) Mairana, 8) La Bélgica y 9) Eisenhower. Asimismo, las dos últimas estaciones mencionadas fueron utilizadas para la calibración de los resultados, debido a la disponibilidad de información de caudales. La distribución espacial de las estaciones empleadas se observa en la Figura 6.

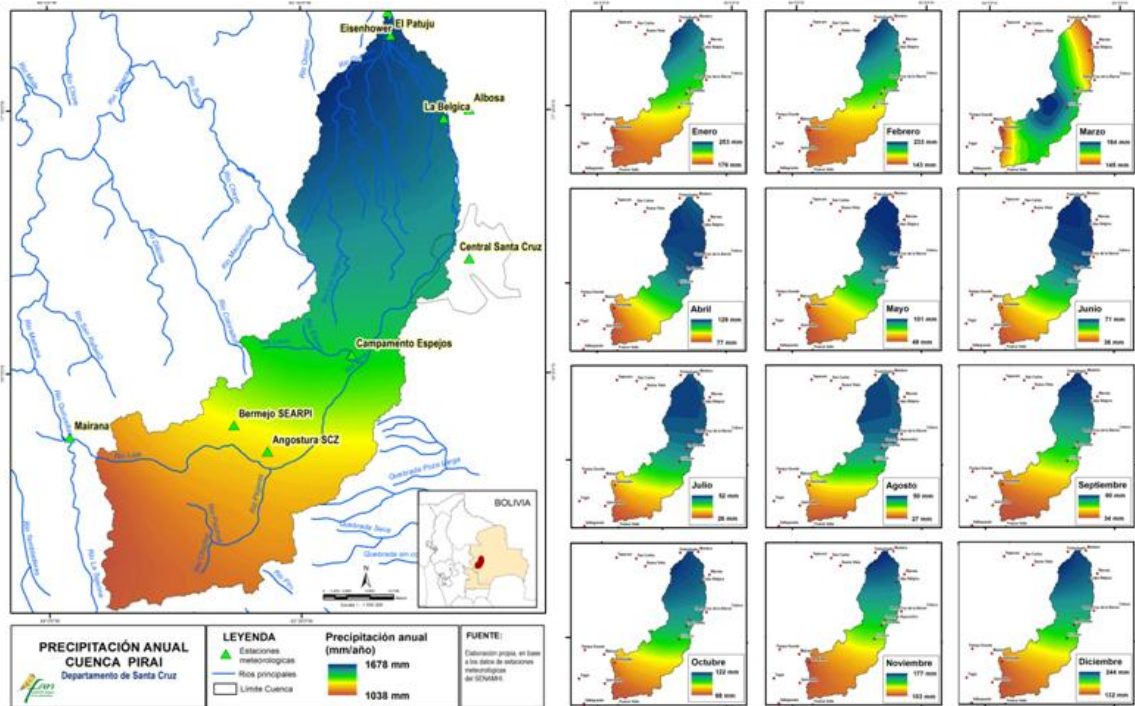
### **4.5.1 Variabilidad Espacial de la precipitación**

La distribución de las lluvias depende en gran parte de los movimientos de las masas de aire, que en el verano a través de los vientos llegan cargados de humedad desde los bosques. Las espesas nubes formadas durante esta trayectoria, son desviadas o bloqueadas por los relieves, dando lugar a las intensas lluvias. En el invierno, los vientos del norte son menos intensos y a veces son superados por vientos polares procedentes del sur del continente. Bajo este mecanismo, se observa que la precipitación es variable y se concentra en mayor cantidad en la región media y baja de la cuenca Piráí, alcanzando una precipitación máxima de 1.678 mm por año y las precipitaciones más bajas oscilan por los 1.038 mm por año, en un análisis promedio de datos de los últimos 20 años.

La variabilidad temporal de la lluvia en el transcurso del año, se caracteriza por un periodo de lluvias desde noviembre (110 a 170 mm) hasta marzo (157 a 162 mm), cuyos picos más altos de precipitación se generan en enero de 177 y 220 mm, en los meses de octubre y abril

también se registran precipitaciones importantes pero que aún no son muy continuas y abundantes.

**Figura 6. Variabilidad espacial de la Precipitación anual y mensual en la Cuenca Pirai**

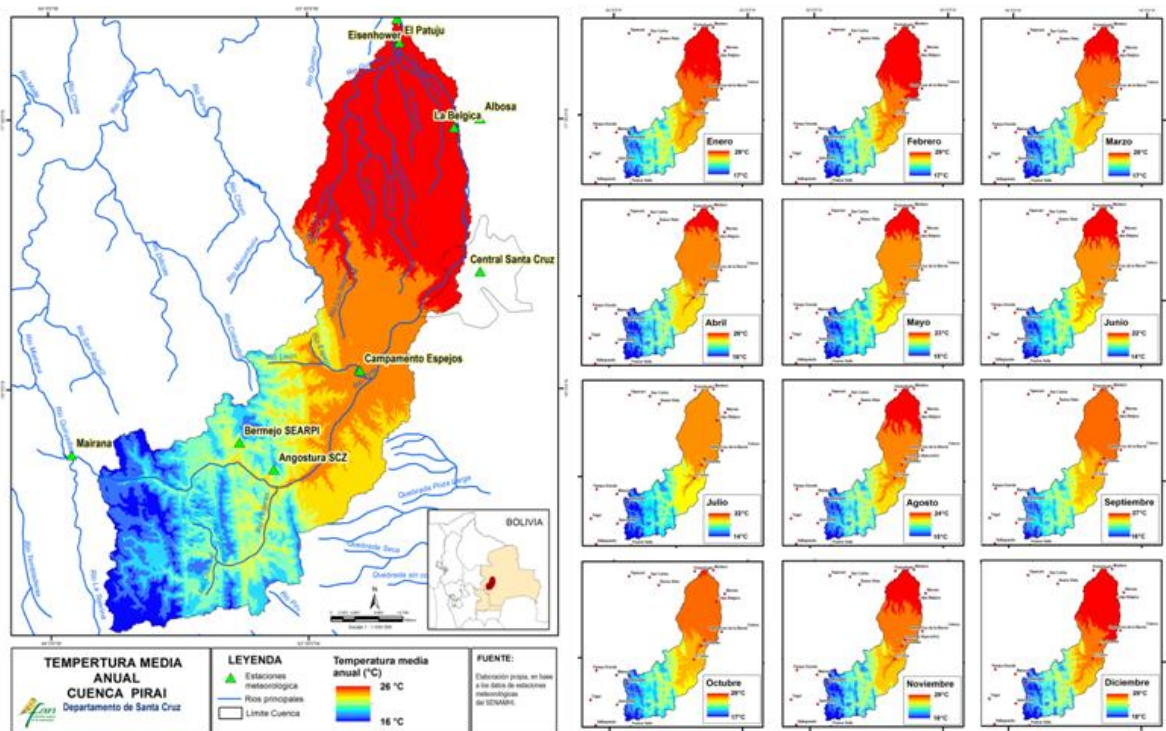


#### 4.5.2. Análisis de la Temperatura

La temperatura es muy variable según los pisos altitudinales de la cuenca, observándose que las isotermas muestran una variabilidad espacial desde los 16°C en altitudes mayores a los 2.100 m.s.n.m. regionalizadas al suroeste en las cabeceras de mayor altitud. El ascenso de las temperaturas ocurre a menor nivel altitudinal, llegando hasta los 26°C como promedio anual en niveles inferiores a los 350 m.s.n.m. en la región Noreste de la cuenca, en las llanuras aluviales.

Según la temperatura anual y mensual, en el área de influencia de la cuenca Pirai, hacia las nacientes de los ríos se diferencian pisos térmicos que van en ascenso desde templado a muy cálido. De acuerdo a los registros del SENAMHI, la temperatura media es elevada en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero con registros de 29°C y en los meses de junio y julio oscila los 14°C en zonas de mayor altitud.

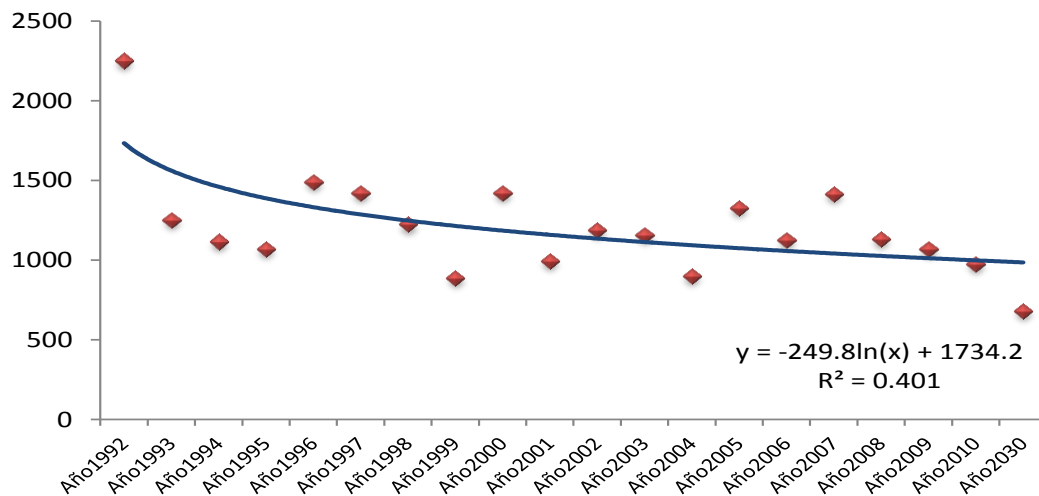
Figura 7. Variabilidad espacial de la Temperatura media anual y media mensual



#### 4.6. Escenario de cambio climático

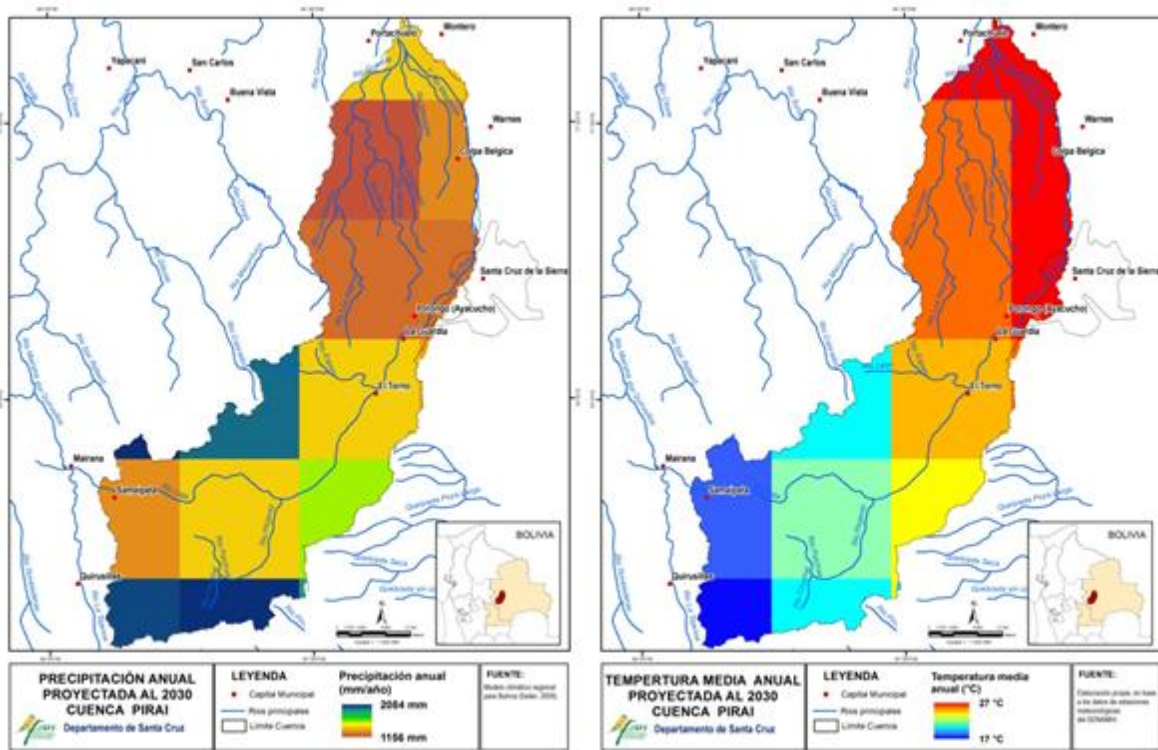
De acuerdo a la información climática analizada, desde el año 1992 hasta el 2010 y escenario 2030, existen cambios en la precipitación, observándose tendencias de reducción. Desde 1992 (2252 mm/año) la lluvia disminuye un 19% hasta el 2010 (976 mm/año), en relación al promedio anual (1205 mm/año), y para el 2030 reducirá en un 44% (680 mm/año).

Figura 8. Cambios en la precipitación anual desde el año 1992 al 2030



Para proyectar los impactos del cambio climático en el balance hídrico de la cuenca Pirai, se ha utilizado para la modelación de la cuenca en SWAT los resultados obtenidos por FAN (Seiler, 2009), utilizando los factores de cambio calculados a partir de modelos de circulación regional (RCM) generados en PRECIS para el periodo 2001-2030, escenario ECHAM4, experimento 02.

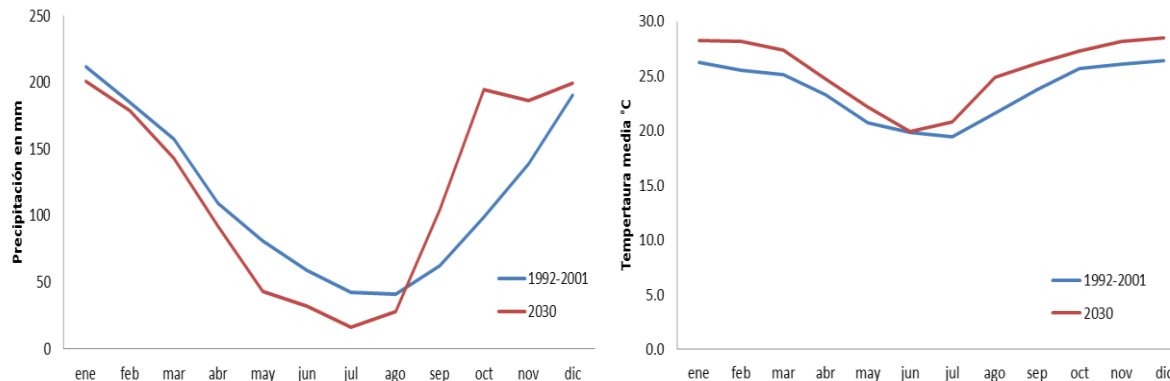
**Figura 9. Cambio climático en la cuenca Pirai proyectado al 2030**



Los cambios generados en la precipitación para el 2030, según el escenario A2 (donde se mantiene igual el crecimiento económico y poblacional) del modelo ECHAM4, muestran una reducción en la cantidad de lluvia en los meses de mayo (-47%), junio (-45%) y julio (-61%) y en la distribución espacial existe un incremento en la precipitación en la región suroeste y una notable reducción en la zona Noreste. Se proyecta que la cantidad de lluvia mensual se incrementará en un 68% en septiembre, 97% en octubre y 34% en noviembre, generando un desfase estacional del periodo más lluvioso, que por lo general recae entre los meses de diciembre y/o enero.

Se estima que el cambio en la temperatura, producirá un incremento de hasta +1.25°C según el promedio anual, variando mensualmente hasta +2,7°C en febrero y +0.1°C en junio.

**Figura 10. Cambios producidos en la precipitación y temperatura para el año 2030**



## **5. DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA PIRAÍ**

El propósito de este acápite, es cuantificar el recurso hídrico disponible en la cuenca del río Piraí, en base a la información climática y a los estudios existentes; con el objeto de conocer la distribución espacial y temporal de la disponibilidad efectiva del recurso hídrico que será contrastado con la demanda total del agua. Estos elementos, constituirán la base para su análisis en la herramienta WEAP (Water Evaluation and Planning System) y así determinar el balance entre la disponibilidad y la demanda de agua en las subcuencas.

La disponibilidad de agua se determinó a través de la modelación en SWAT (Soil and Water Assessment Tool) versión 2012, los resultados permiten analizar el agua disponible a nivel diario, mensual y anual. El balance hídrico modelado reproduce todos los procesos físicos que conforman el ciclo hidrológico, utilizando algoritmos matemáticos, y permitiendo analizar la cantidad de agua escurrida superficialmente, la evapotranspiración, la recarga acuífera a través de la percolación y la producción de sedimentos.

### **5.1. Metodología**

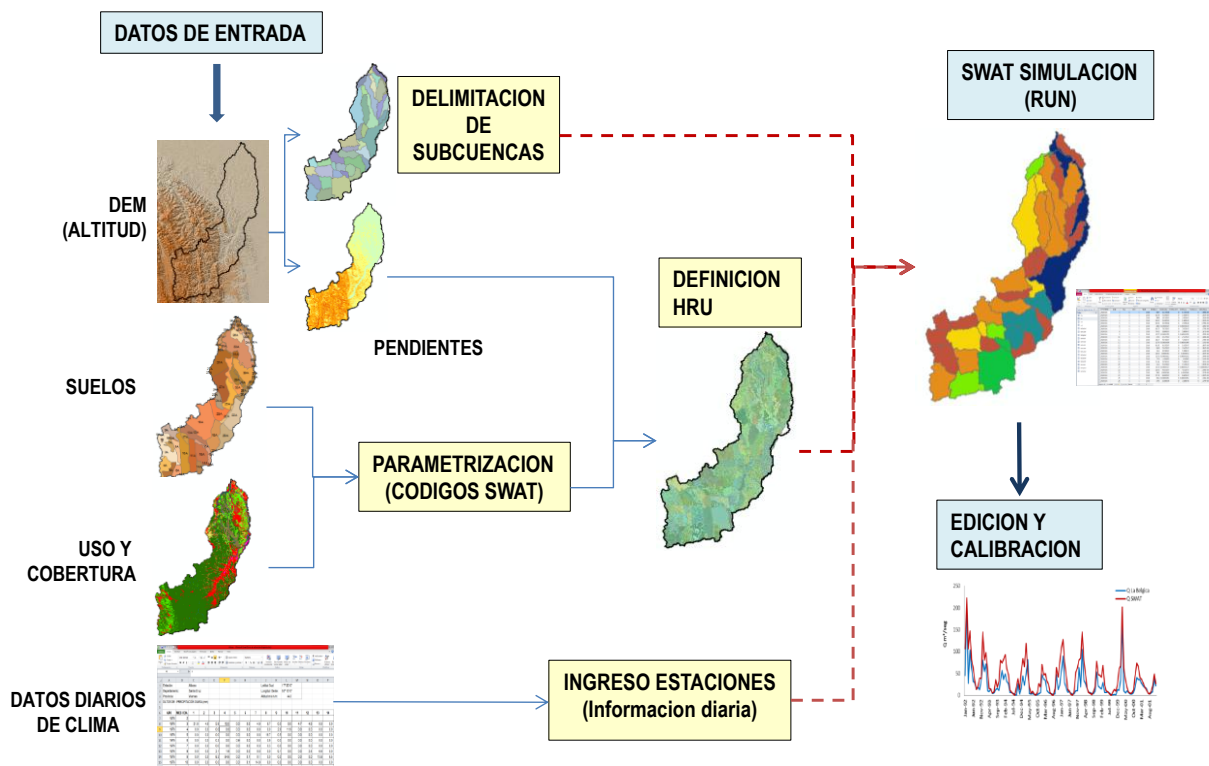
La metodología empleada, consiste en la aplicación del modelo SWAT 2012 a través de la interface ArcSwat en un ambiente ArcGis 10.0. La modelación en SWAT tiene la finalidad de obtener resultados con mayor precisión y analizar en forma espacial los diferentes procesos hidrológicos en todo el contexto de la cuenca Piraí. Por consiguiente se determinó la producción de agua y sedimentos a nivel mensual y anual, a través del balance hídrico, que define la producción hídrica en un sistema hidrológico natural, establecida por relaciones cuantificables que representan un equilibrio entre las variables de entrada, las de salida y las de almacenamiento en el sistema.

### 5.1.1. Características del Modelo SWAT

El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas (Arnold et al. 1998). Es un modelo de simulación continua que opera a paso de tiempo diario. Permite simular la producción de agua y sedimentos a escala de cuenca hídrica, así como el impacto que tienen las prácticas agronómicas en la calidad del agua, por el uso de pesticidas y fertilizantes.

El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para la simulación, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo (textura), con el uso-cobertura del suelo y las pendientes (según la topografía).

Figura 11. Esquema metodológico de SWAT



A partir de las URH y los datos climáticos (temperatura y precipitación diaria) se estiman componentes hidrológicos tales como la evapotranspiración, escorrentía superficial, velocidad de escurrimiento, flujo de agua subterránea y la producción de sedimentos para cada URH o subcuenca.



La simulación de la hidrología se divide en dos fases: la Fase Terrestre del ciclo hidrológico, que controla la cantidad de agua, sedimentos y pesticidas transportados hacia el canal principal por cada subcuenca y la Fase de Enrutamiento del agua, que controla el movimiento del agua, sedimentos, etc. a través del canal principal hasta el sitio de descarga de la cuenca.

### **5.1.2. Preparación de los datos de entrada al modelo**

*Topografía:* se utilizó como base topográfica las imágenes que se descargaron de la página <http://seamless.usgs.gov>. SRTM (Seamless Shuttle Radar Topography Mission) con resolución de 90 metros, y con unidades verticales en metros. El Modelo Digital de Elevación (DEM) se utilizó para definir y determinar las áreas de aportación de la cuenca, a través de la delineación automática de ArcWSAT2012, dividiendo la cuenca del río Piraí en 45 subcuencas, utilizando un umbral de tamaño mínimo de 5000 hectáreas en el proceso de modelación.

*Tipos de suelos:* se cargaron los datos de distribución y clasificación taxonómica desarrollado por la FAN (Ovando, 2009), espacializadas según las unidades de tierra determinadas y alimentadas con la información de las propiedades hidráulicas del suelo requeridos por el modelo del SWAT.

*Usos de suelo:* Se utilizaron mapas de cobertura y uso de la tierra del departamento de Santa Cruz (MHNNKM, 2007), mapa de vegetación de Bolivia (Navarro & Ferreira, 2007) y el mapa de uso y cobertura vegetal de Bolivia (MDRT, 2011). Las coberturas se agruparon en 21 clases de vegetación, estas se reclasificaron según las clases de cultivo de la base de datos SWAT, considerando comportamientos hidrológicos similares.

*Datos Climáticos:* SWAT requiere datos climáticos diarios de entrada, incluyendo precipitación, temperatura máxima y mínima del aire, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, los cuales pueden ser registros medidos o generados por el mismo modelo.

### **5.1.3. Criterios de evaluación del desempeño del modelo-Calibración**

Para evaluar el desempeño de SWAT en la cuenca Piraí, los resultados se compararon gráficamente con datos medidos de escorrentía en las estaciones de La Bélgica y Eisenhower, donde se disponen de caudales diarios y mensuales desde 1992 hasta 2001 (datos oficiales del SEARPI). No obstante la simulación se realizó para el período 1992 - 2010, y las comparaciones entre los caudales observados y simulados se realizaron sólo para los años con datos disponibles (1992-2001). Para la calibración del modelo en la cuenca, se calculó el

coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, Nash-Sutcliffe Efficiency), indicado por Gassman et al. (2007) como el estadístico más utilizado en hidrología para la calibración y validación de modelos. Adicionalmente, se calcularon el Sesgo porcentual (PBIAS, Percent Bias) y la Relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR, RMSE-observations Standard deviation Ratio). Los estadísticos mencionados se determinaron mediante las siguientes expresiones:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (q_t^{obs} - q_m^{obs})^2}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (q_t^{obs} - q_t^{sim})}{\sum_{t=1}^n q_t^{obs}} \times 100$$

$$RSR = \frac{RMSE}{StDev_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (q_t^{obs} - q_m^{obs})^2}} \times 100$$

donde  $q_t^{obs}$  y  $q_t^{sim}$ , son las escorrentías observada y simulada, respectivamente;  $q_m^{obs}$ , es la medida de las escorrentías observadas; y n es el número de datos.

Kannan et al. (2007) indican que PBIAS mide la tendencia promedio de que los valores simulados sean mayores o menores que los observados; el valor óptimo es cero, un valor positivo mide el grado de sub-estimación, y un valor negativo el grado de sobre-estimación. NSE mide la relación entre la varianza de los residuales y la varianza de los valores observados, su valor óptimo es 1, aunque mayores a cero indicarían desempeño aceptable. Moriasi et al. (2007) concluyeron que para escorrentías mensuales la simulación de un modelo puede considerarse satisfactoria si  $NSE > 0.50$  y  $RSR < 0.70$  y  $-25\% < PBIAS < 25\%$ .

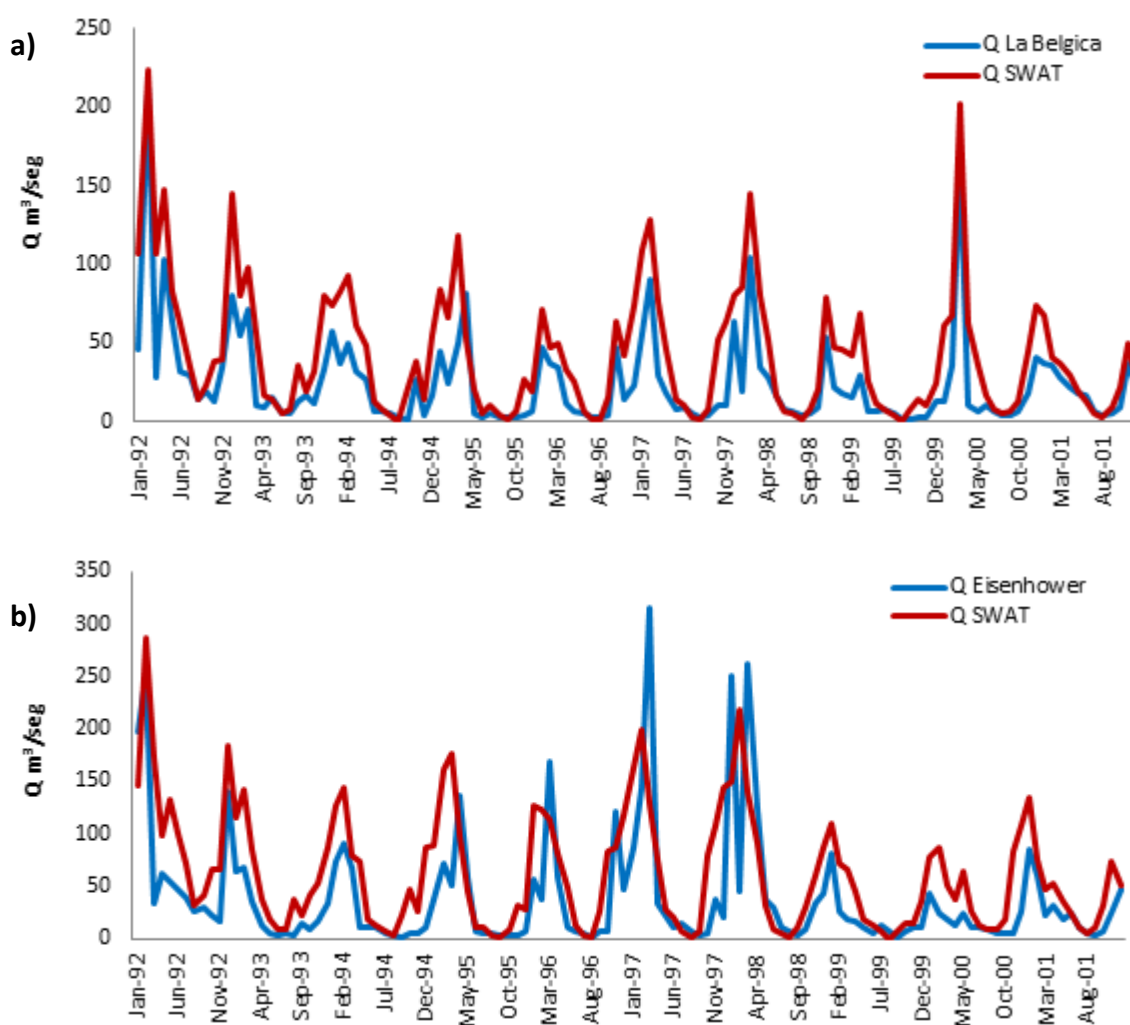


## 5.2. Análisis de Resultados

### 5.2.1. Calibración de los resultados

Considerando que la simulación de la cuenca Piraí, se realizó para el período 1992-2010, el proceso de calibración considera al periodo 1992-2001, debido a la disponibilidad de información de caudales, existentes sólo para este periodo en las Estaciones La Bélgica y Eisenhower localizadas en la región baja y a la salida de la cuenca. La comparación de los caudales medios mensuales se observan en la figura 12.

Figura 12. Series de caudal mensual observado y simulado en a) La Bélgica b) Eisenhower



Los valores de los estadísticos calculados para determinar la bondad de ajuste del modelo se muestran en el siguiente cuadro.

**Cuadro 2. Resultados estadísticos del proceso de calibración**

Estación	Periodo	NSE	PBIAS	RSR
La Bélgica	1992-2001	0.30	-36	0.78
Eisenhower	1992-2001	0.25	-26	0.81

Los valores de NSE en las dos estaciones se encuentran en un rango satisfactorio, el sesgo relativo es superior a 25% y la tasa de error medio cuadrático inferior a 1, esto implica que el modelo logra un ajuste aceptable en ambas estaciones. Estos resultados podrían demostrar una mayor optimización del modelo, si existiera mayor información hidrométrica en la cuenca, por lo que se estiman posibles errores en la toma de datos de caudales en las estaciones, en razón de que se han identificado algunas inconsistencias en la base de datos que son difíciles de validar por la carencia de información. Por consiguiente, con la calibración realizada el modelo representa adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Es necesario mencionar que entre los factores determinantes en la modelación con SWAT son los datos meteorológicos, desafortunadamente los registros con los que se cuenta son insuficientes. Si bien los caudales modelados y observados muestran similitudes en sus picos, la diferencia en algunos casos es mayor del 30%. Sin embargo el modelo es una herramienta útil en la generación de información de la producción hídrica y producción de sedimentos a nivel diario, mensual y anual.

### **5.2.2. Situación actual de los recursos hídricos de la cuenca**

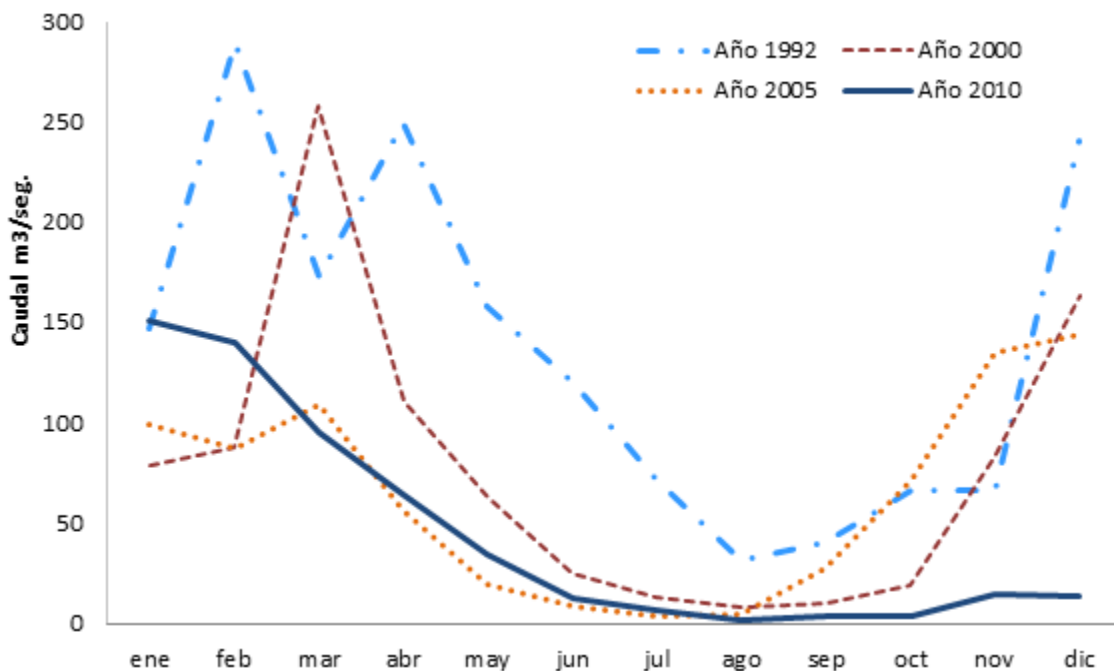
La simulación de los procesos hidrológicos de la cuenca Piraí a través de SWAT, ha permitido conocer la situación actual de los recursos hídricos, sobre una base de análisis del comportamiento hidrológico desde el año 1992 hasta el 2010, focalizando el estudio en la comparación temporal (años 1992, 2000, 2005 y 2010) de la repuesta hidrológica de la cuenca frente a los cambios de uso de suelo que se han intensificado en los últimos diez años. Los resultados generados, nos permiten conocer el grado de afección de la cuenca en la disponibilidad de agua para el consumo humano, la producción y la naturaleza.

### 5.2.2.1. Generación de agua por escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial constituye parte de la precipitación que no es absorbida por el suelo, no evapora a través de los cuerpos de agua y no es parte de la transpiración de la cobertura vegetal, por lo tanto consiste en la cantidad de agua que escurre hacia los ríos y arroyos, que generalmente es evaluado a través de los caudales generados a la salida de la cuenca.

El escurrimiento superficial promedio en la cuenca Pirai, representa el 28% de la lluvia anual. El caudal promedio anual en el año 1992 fue de 137,4 m<sup>3</sup>/seg., reduciendo sustancialmente en el año 2000 en un 44% (76,4 m<sup>3</sup>/seg.), progresivamente en el 2005 los caudales reducen en un 54% (63,6 m<sup>3</sup>/seg.) y en el 2010 se observa una disminución drástica de hasta el 67% (44,9 m<sup>3</sup>/seg.) respecto al año 1992 (Figuras 13 y 14).

Figura 13. Generación de caudales promedios mensuales 1992, 2000, 2005 y 2010

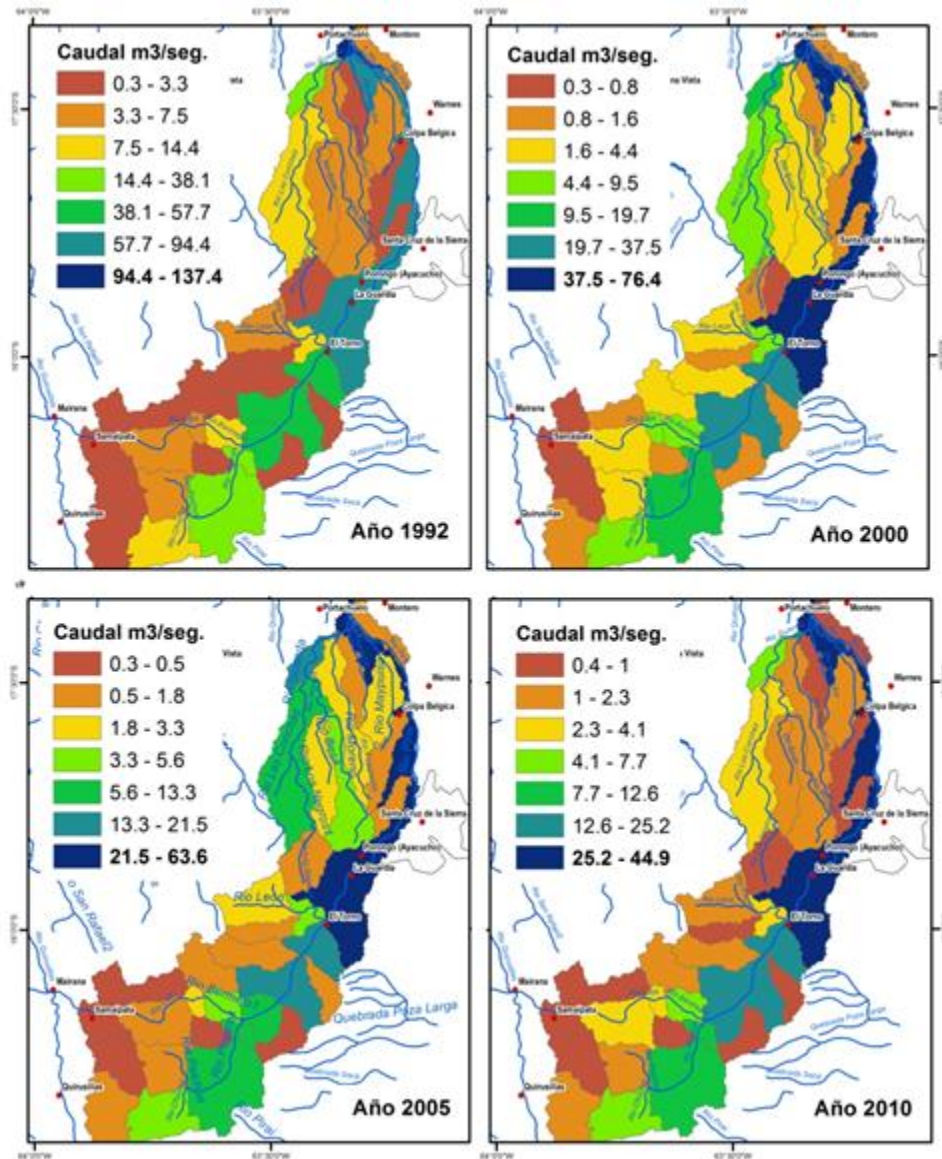


Los cambios generados en los caudales, se atribuyen a la afección de la cuenca principalmente por la deforestación y conversión de áreas naturales en zonas de producción agrícola y pecuaria. Los cambios de uso observados en la cuenca, sumados al cambio climático, están impactando en la generación de caudales que son importantes para mantener la dinámica natural de los ríos y arroyos.

Asimismo, la distribución espacial del escurrimiento a nivel de subcuencas en el Pirai, muestra que los cambios generados en los caudales son de mayor proporción en las áreas

donde se han producido la expansión agrícola y pecuaria, en la región central y noreste de la cuenca.

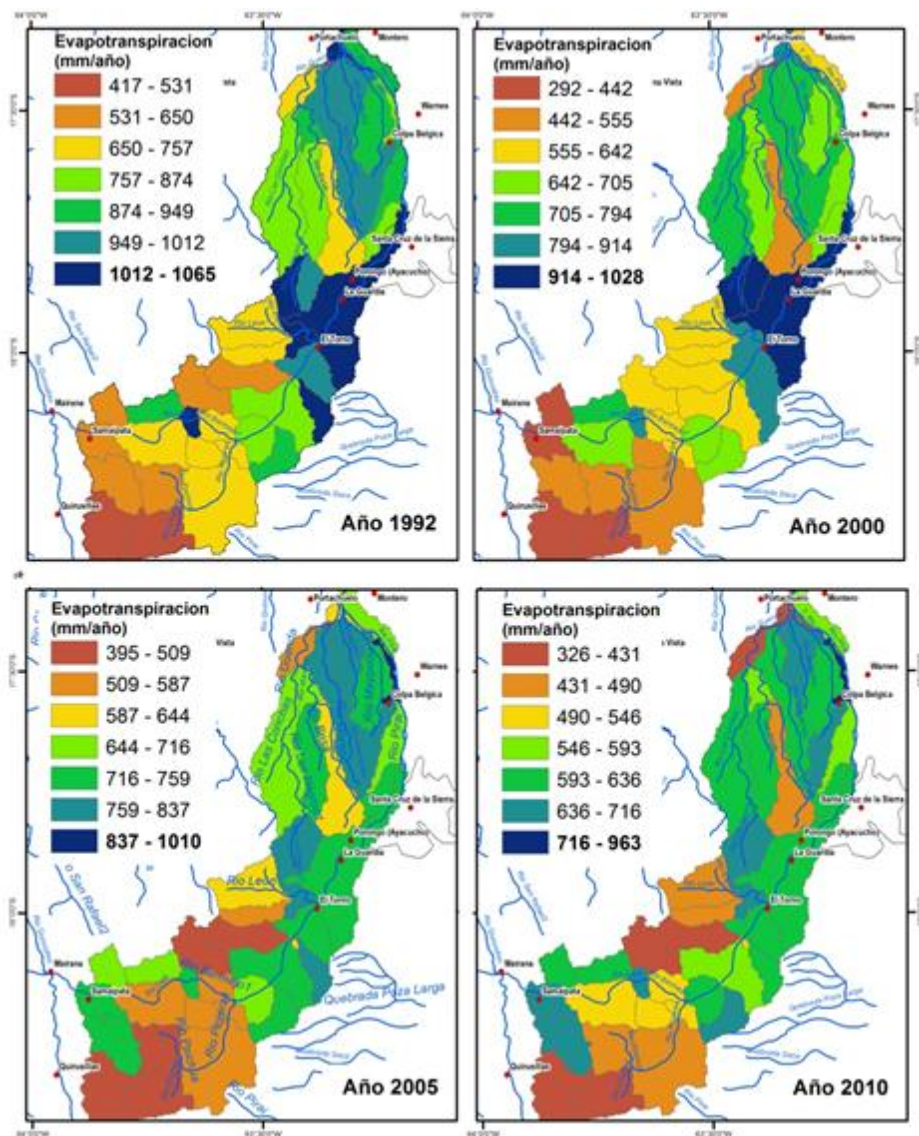
Figura 14. Caudales medios generados en las subcuencas del Pirai



### 5.2.2.2. Proceso de Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) anual es de 417 mm a 1065 mm por año en 1992, representando un importante aporte de humedad para la generación de precipitación en la cuenca. Se estima que la mayor parte del agua de lluvia es transformada en biomasa, siendo utilizada en el mantenimiento de la población vegetal presente. Existen cambios en la ET, en el año 2010 oscila de 326 a 963 mm, la mayor tasa de ET se concentra en la región central y baja de la cuenca Pirai, debido a las condiciones bioclimáticas de los pisos altitudinales, siendo determinante la temperatura en la transpiración de la vegetación.

Figura 15. Evapotranspiración anual por subcuencas

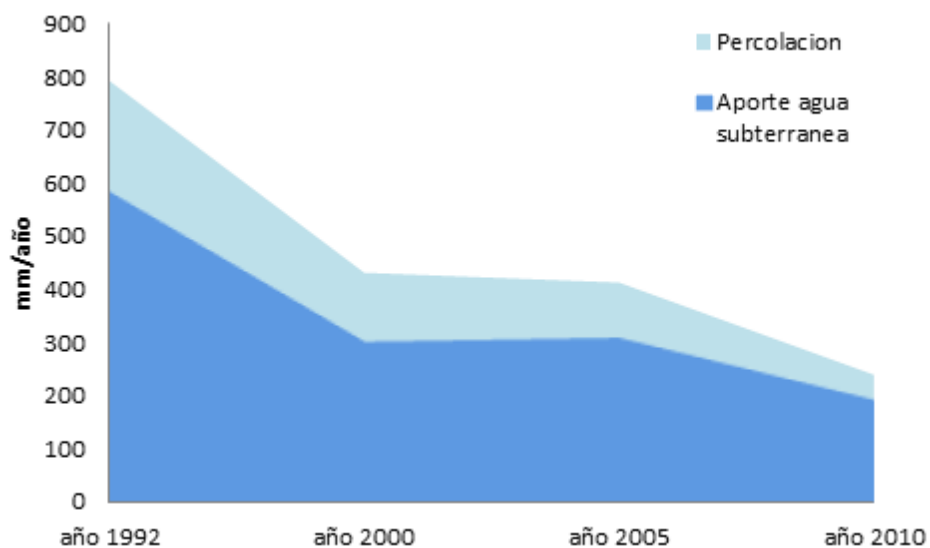




### 5.2.2.3. Aporte de aguas subterráneas (Recarga acuífera)

A través de la percolación se infiltra y almacena agua subterránea, para el abastecimiento de agua para consumo humano, producción (agrícola, ganadera e industrial) y ecosistemas. Este proceso hidrológico, está estrechamente relacionado a la recarga de las aguas subterráneas en la cuenca, representando el 35% (793 mm/año) de la lluvia local en el año 1992, este volumen se está reduciendo drásticamente porque se han afectado las zonas de recarga acuífera, observándose en la Figura 16 que la percolación se redujo en un 70% (240 mm/año) en el año 2010.

Figura 16. Relación temporal del agua subterránea almacenada



Asimismo, la cantidad de agua subterránea almacenada anualmente además de su disminución sufre una reducción en la superficie de las zonas de recarga acuífera, denotándose una importante variabilidad a nivel de subcuencas (Figura 17).

Las zonas de recarga acuífera prioritarias para el abastecimiento de agua, se concentran en mayor proporción en la región Noreste de la cuenca (llanura aluvial) en los años 1992, 2000 y 2005, almacenando respectivamente hasta 1.320 mm, 677 mm y 724 mm anuales.

Este panorama ha cambiado en el año 2010, almacenándose solamente has 361 mm/año y donde las zonas con mayor recarga acuífera están concentradas en las subcuencas del Parque Nacional Amboró.

Según el balance hídrico, las áreas de bosques subandinos Boliviano-Tucumanos de transición con los Yungas, los bosques subhúmedos Boliviano-Tucumanos, y los bosques



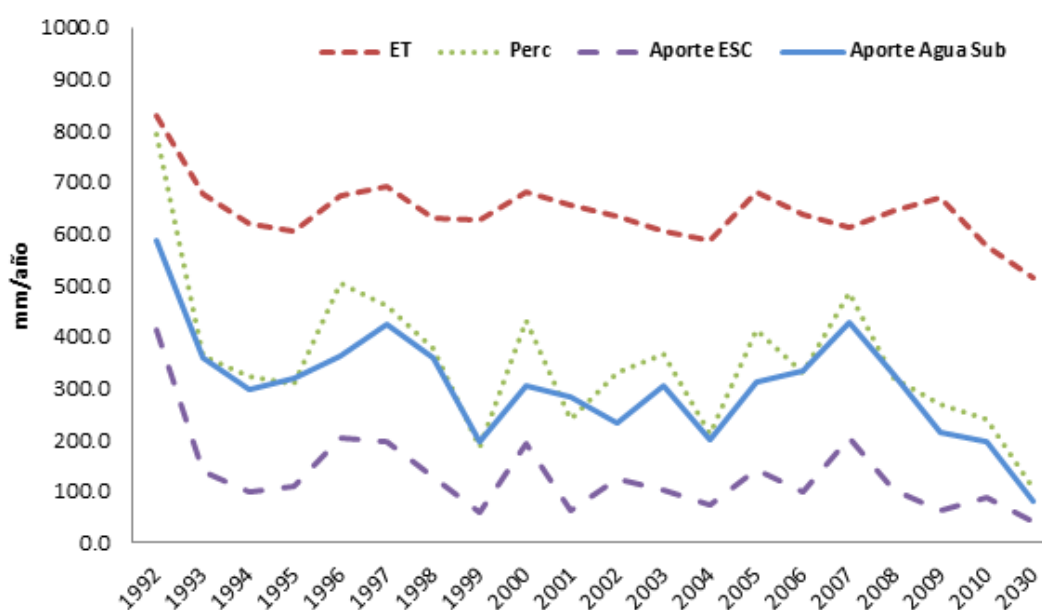




### 5.2.3. Situación futura e impactos del cambio climático en la cuenca

De acuerdo a las proyecciones de la precipitación para el año 2030, habrá una reducción en la cantidad de lluvias desde enero hasta agosto, y la temperatura ascenderá a +1.25°C según resultados del modelo climático regional para Bolivia (Seiler, 2009), los procesos hidrológicos en la cuenca se ven afectados, observándose en la figura 19 una tendencia de disminución paulatina en la cantidad de agua generada por los procesos de percolación, almacenamiento de agua subterránea, aportes de flujo para el escurrimiento y los procesos de evapotranspiración en la cuenca.

Figura 19. Dinámica hidrológica de la cuenca Pirai hasta el 2030

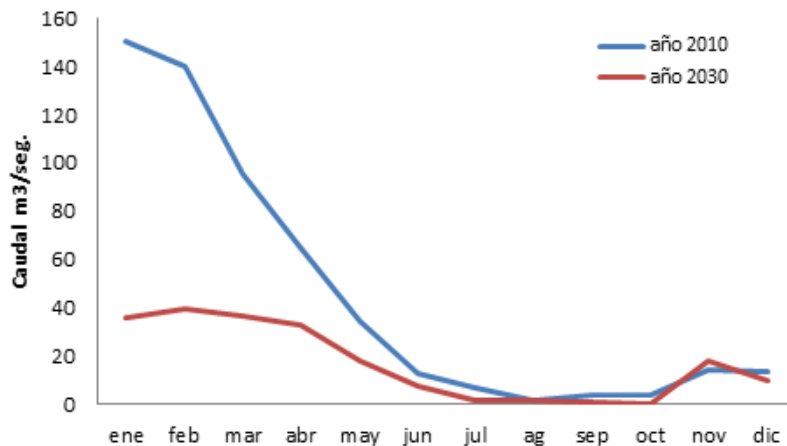


Los impactos en la cuenca por la expansión agrícola y el cambio climático, causarán modificaciones en la producción hídrica y en la descarga de sedimentos, las proyecciones realizadas permiten conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca Pirai en un futuro próximo, coadyuvando de esta manera, en la toma de decisiones para el manejo y gestión de la cuenca y por consiguiente en las medidas de adaptación al cambio climático.

#### 5.2.3.1 Generación de Caudales proyectados para el año 2030

Si bien actualmente existe una disminución en los caudales generados por el río Pirai, el escenario para el año 2030, evidencia una disminución de aproximadamente el 63% del volumen actual en los caudales, sobre todo en los meses de enero, febrero y marzo. Esto implicará también una mayor presión hacia los recursos hídricos, considerando que en la estación de verano la demanda de agua incrementa.

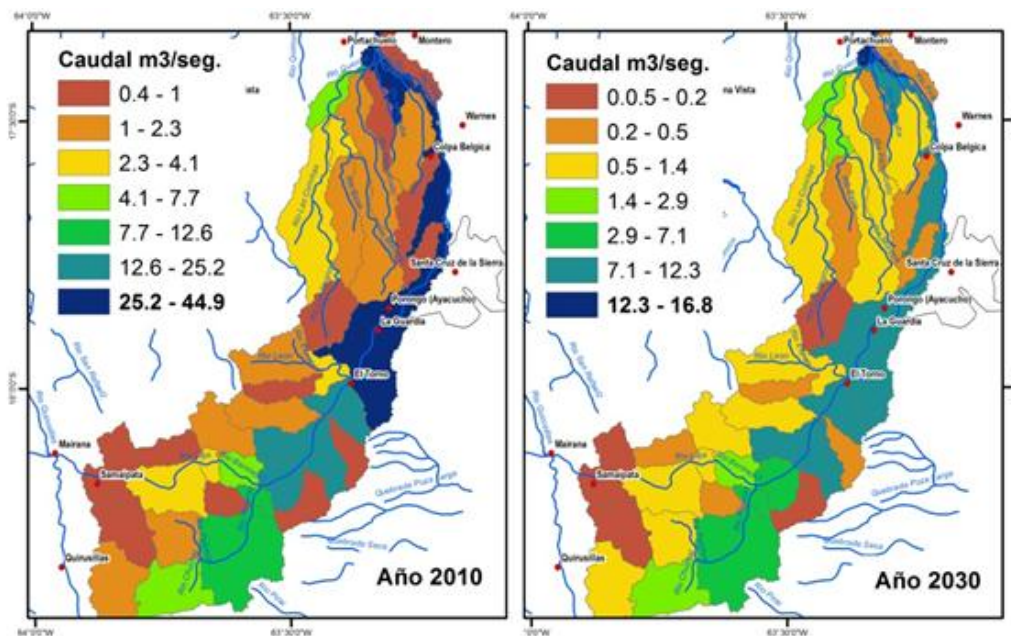
**Figura 20. Volumen promedio de caudales proyectados al año 2030**



Por otro lado, el presente análisis se focaliza en datos promedios de caudales proyectados sin considerar a los eventos extremos, debido a que no existe información suficiente para proyectar estos eventos. Sin embargo, la distribución de la lluvia en escenarios de cambio climático, podrían consistir en una menor cantidad de días lluviosos y en días de lluvia más intensos, generado desbordes de ríos y provocando inundaciones de considerable magnitud.

El caudal máximo generado en el 2010 es de 44,9 m<sup>3</sup>/seg., disminuyendo en el escenario del año 2030 a un caudal de 16,8 m<sup>3</sup>/seg. (-63%). A nivel de subcuencas, los caudales de mayor volumen en ambos escenarios se concentran en la región central de la cuenca y hacia la salida en la zona Noroeste (Figura 21).

**Figura 21. Cambios en la generación de caudales 2010-2030**



### 5.2.3.2. Almacenamiento de agua subterránea proyectada al 2030

En las zonas de recarga acuífera, para el 2030 se proyecta una reducción en sus áreas a nivel de subcuencas y en los volúmenes de almacenamiento de agua hacia los mantos geológicos profundos que conforman los acuíferos subterráneos. Estas zonas serán afectadas por el avance de la frontera agrícola, indicando la figura 22 una notable afección en las subcuencas del Parque Nacional Amboró.

De acuerdo a las Figuras 22 y 23, el agua subterránea disponible disminuirá hasta un 59% con relación al año 2010, bajando en un promedio anual de 196 mm a 81 mm. A nivel de subcuencas se observa que el almacenamiento máximo en el 2010 es de 361 mm, denotándose en el 2030 a un almacenamiento máximo de 237 mm.

Estos resultados, nos indican que la gestión y manejo de la cuenca debe contemplar de manera prioritaria la conservación y protección de las zonas de recarga, para mitigar la afección de los acuíferos, considerando además de que actualmente la presión hacia estas zonas es alta por la expansión agrícola y el crecimiento de la mancha urbana.

Figura 22. Volumen de agua subterránea almacenada en el año 2030

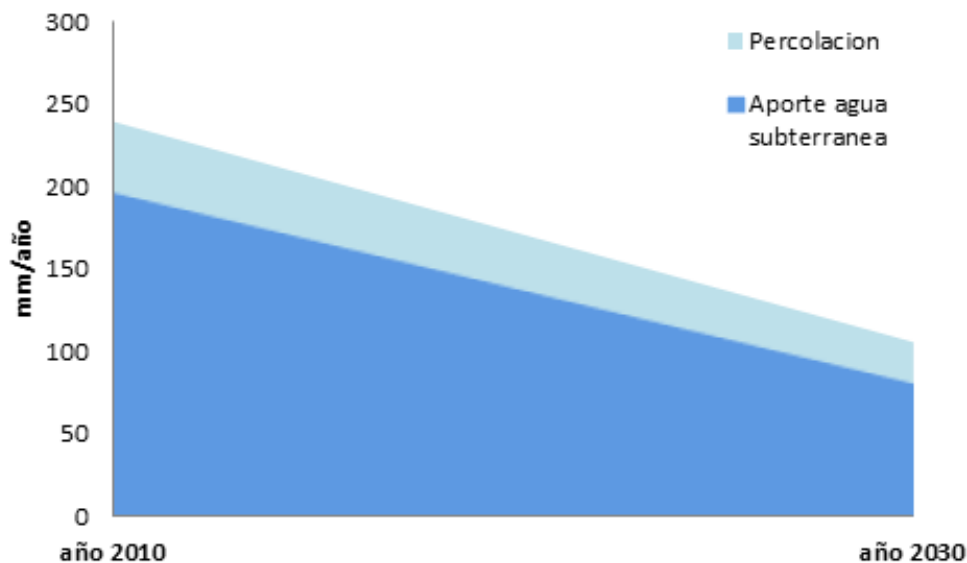
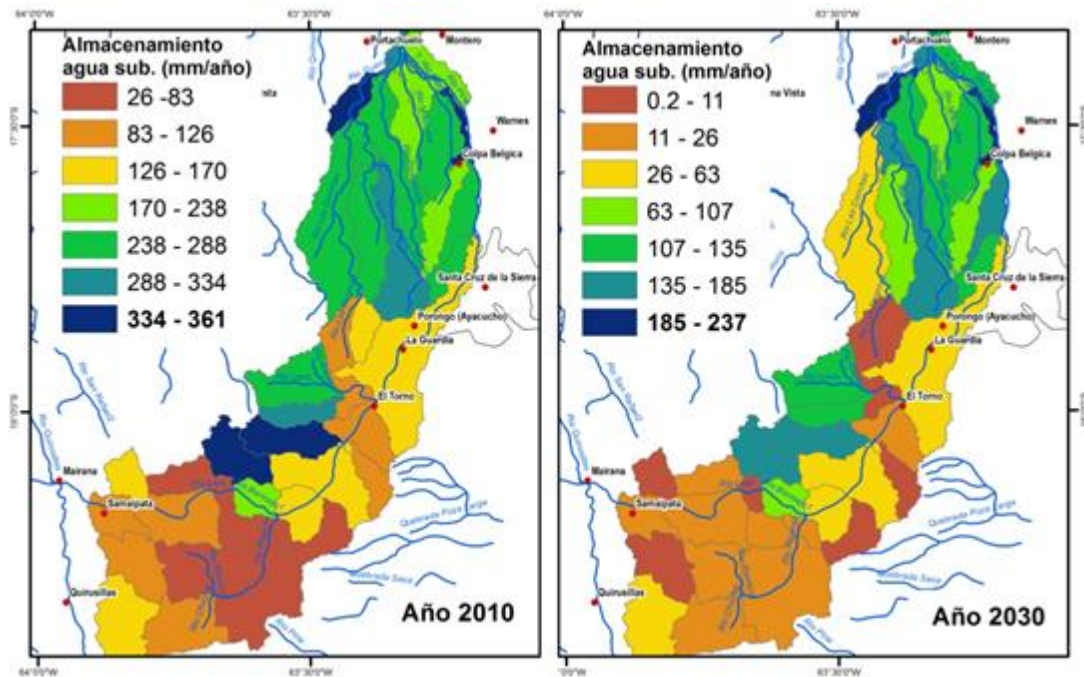


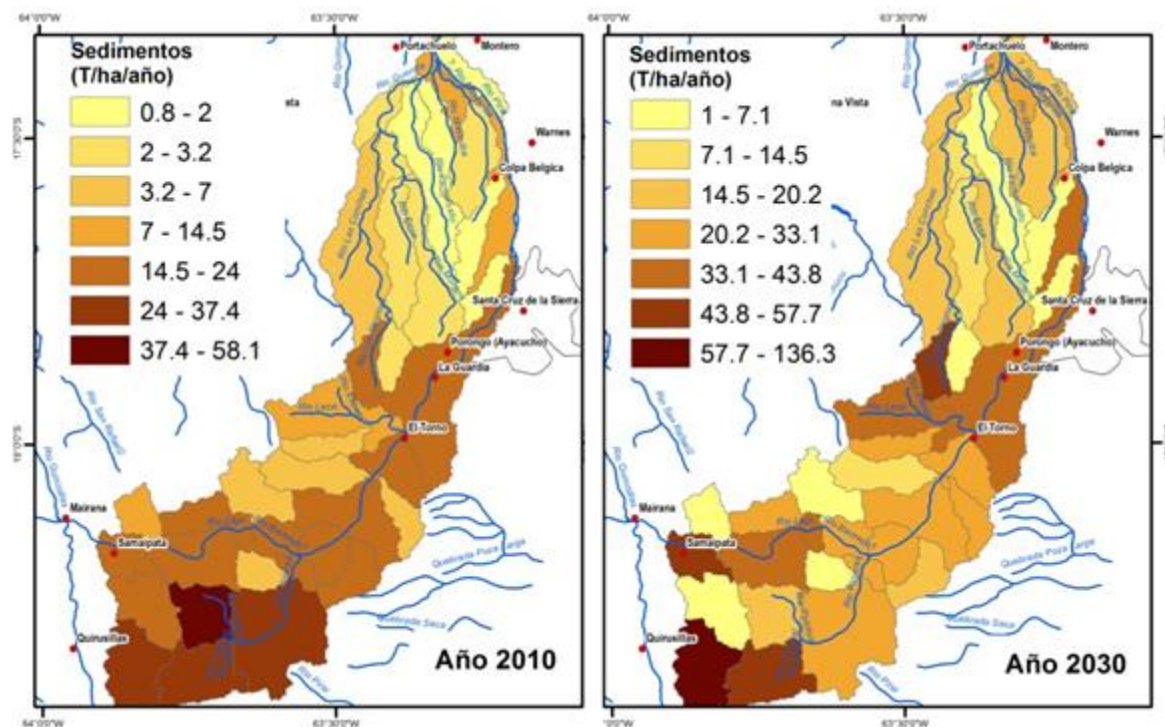
Figura 23. Almacenamiento de agua subterránea en el año 2030



### 5.2.3.3. Generación de Sedimentos proyectados al 2030

Considerando la afección en la cuenca por las actividades antrópicas proyectada en escenarios futuros (2030), la producción de sedimentos incrementará considerablemente en la región montañosa de la cuenca (al Suroeste). La acumulación de los sedimentos, distribuidos en la Figura 24, en el escenario 2030 alcanza a 136 T/ha/año, siendo tan alta la sedimentación se estima que los lechos de los ríos serán colapsados por la acumulación de suelo erosionado, donde sufrirán modificaciones en su morfología natural. Asimismo, los procesos de erosión en la cuenca producirán niveles de baja fertilidad de los suelos, llegando inclusive a la desertificación en las zonas de mayor fragilidad y restringiendo por consiguiente la producción agrícola y pecuaria.

Figura 24. Producción de Sedimentos en el 2030



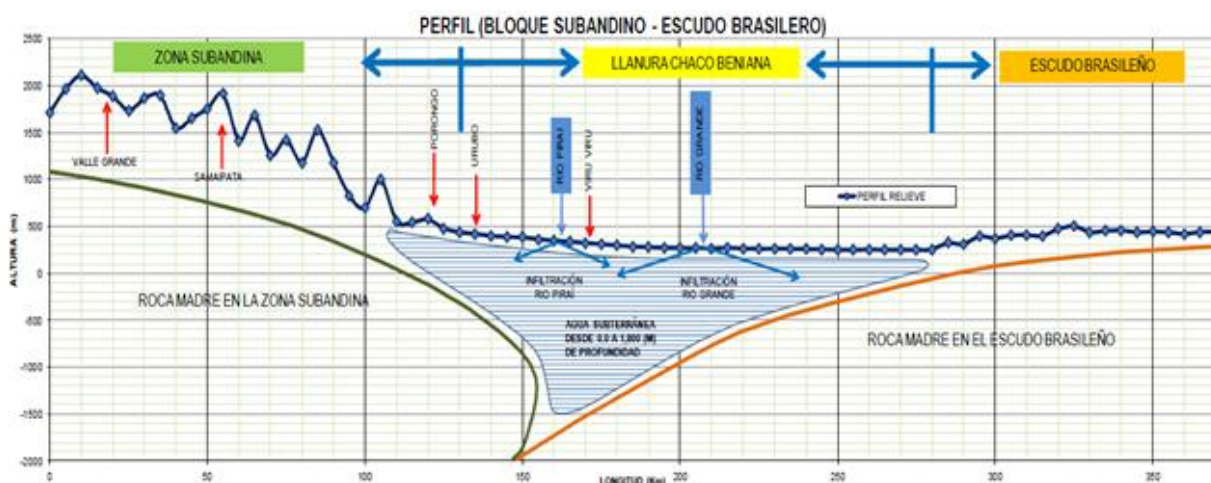
### 5.3. Potencial Hídrico en la Cuenca Pirai

Los bosques y la vegetación natural en la cuenca Pirai, generan un efecto esponja, el cual causa la infiltración de importantes volúmenes agua hacia los estratos inferiores del suelo, que conforman los acuíferos. Asimismo, controlan la erosión de los suelos y las crecidas de los ríos (evitando inundaciones de magnitud) y coadyuvan en la regulación del clima a través de los proceso de Evapotranspiración.

En este sentido, el esquema de la figura 25 describe al acuífero de la ciudad de Santa Cruz, que tiene un dependencia muy estrecha de con los procesos hidrológicos ocurridos aguas arriba de la cuenca Pirai (zona subandina) y la cuenca del río Grande. Se estima que el río Pirai contribuye al acuífero en un 50% del volumen total.



**Figura 25. Perfil del acuífero conformado por el río Piraí y Grande**



Fuente: Plan Maestro Metropolitano, Santa Cruz (2013)

La modelación de la cuenca en SWAT reporta que las zonas de recarga acuífera prioritarias para el abastecimiento de agua, se concentraban en mayor proporción en la región Noreste de la cuenca (llanura aluvial) en los años 1992, 2000 y 2005, almacenando volúmenes de 1320 mm, 677 mm y 724 mm anuales respectivamente. Este panorama ha cambiado en el año 2010, almacenándose solamente 361 mm/año y las zonas con mayor recarga acuífera ahora se concentran en las subcuencas del Parque Nacional Amboró, que a través de los flujos subterráneos aportan a la escorrentía y a los acuíferos de la ciudad de Santa Cruz. En este sentido, se ha determinado que el agua disponible para los diferentes usos en el año 2010 es de 149'384.798 m<sup>3</sup>/año, este volumen es variable a nivel mensual, y se estima que para el 2030 el volumen de agua disponible será de 122'182.863 m<sup>3</sup>/año.

## 6. CONSUMO Y DEMANDA DE AGUA EN LA CUENCA PIRAÍ

El consumo y demanda de agua en la cuenca Piraí, está definido por los distintos usos del agua a nivel sectorial y municipal. Para conocer en detalle la dinámica temporal y sectorial de los distintos usos del agua, se analiza a nivel municipal según sus límites políticos. A nivel territorial, según el cuadro 3 los municipios de Colpa Bélgica, Porongo, El Torno y Samaipata abarcan más del 60% de su territorio en la cuenca, por lo que sus actividades socioproductivas están muy vinculadas a las funciones hidrológicas del Piraí. Por otro lado, para los municipios de Santa Cruz de la Sierra (Capital Departamental), Warnes, Montero y La Guardia, si bien en territorio no están muy inmersos en la cuenca, el beneficio hidrológico para más de 850.000 pobladores es enorme, porque dependen del agua almacenada en los acuíferos para el abastecimiento del agua para consumo humano.

Bajo este contexto, los servicios ambientales y socioeconómicos brindados por la cuenca Piraí, son determinantes para el suministro de agua para el consumo humano, la producción agropecuaria para garantizar la seguridad alimentaria, el mantenimiento de las funciones biológicas de la flora y fauna de la región y la estabilidad hidroclimática de los ecosistemas.

**Cuadro 3. Superficie y porcentaje de los Municipios involucrados**

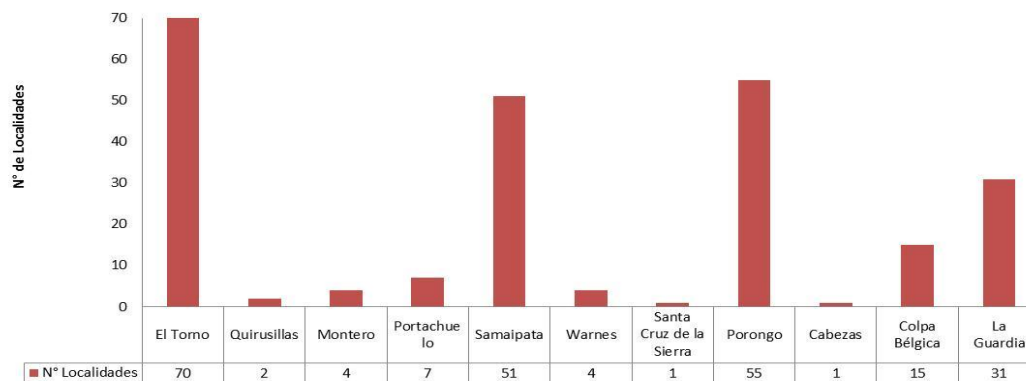
MUNICIPIO	Superficie Total del Municipio (Km <sup>2</sup> )	Superficie dentro la cuenca (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje Municipal en la cuenca
Colpa Bélgica	291	291	100%
Porongo	944	904	96%
El Torno	960	809	84%
Samaipata	2,188	1,314	60%
Portachuelo	1,076	256	24%
Quirusillas	287	66	23%
Montero	315	44	14%
La Guardia	953	118	12%
Warnes	1,315	42	3%
Santa Cruz de la Sierra	1,269	35	3%
Buena Vista*	2,250	48	2%
Postrer Valle*	1,157	10	1%
Cabezas	5,058	31	1%
<b>TOTAL</b>	<b>18,063</b>	<b>3,967</b>	<b>22.0%</b>

\*no tienen poblaciones dentro la cuenca

Fuente: Elaboración propia

Las poblaciones que se benefician de los recursos hídricos de la cuenca Piraí, concentran a 241 localidades según el censo 2001 (INE, 2001). El 29% (70 localidades) del total corresponden al municipio de El Torno, el 23% (55 localidades) están en el municipio de Porongo, el 21% (51 localidades) en el municipio de Samaipata y el 27% de las localidades se distribuyen en los restantes municipios.

**Figura 26. Número de Localidades/comunidades en la cuenca Piraí**



Fuente: Elaboración propia en base al INE (2001)

## 6.1. Proceso metodológico

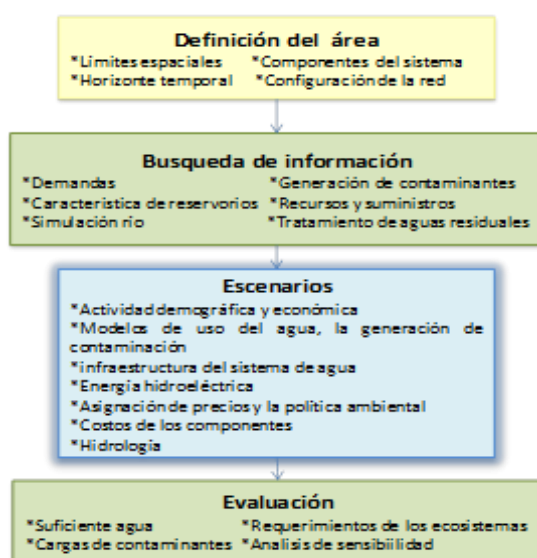
Para la determinación del uso actual y demanda del agua futura, se utilizó la plataforma del Sistema para Evaluación y Planeación del Agua (WEAP por sus siglas en inglés). La construcción del modelo se realizó siguiendo las etapas de recolección de datos, caracterización de cuenca, procesamiento de datos y estimación de demandas. El modelo se construyó para un escenario actual que consiste en el año 2010 y un escenario futuro establecido para el 2030, ambos definidos por el tiempo en el que los datos de la modelación con SWAT coinciden. La determinación de las demandas de agua se realizó con base en la población urbana y rural de la región (Cuadro 4) aplicando tasas de crecimiento definidos por el INE según el censo 2001.

### 6.1.1. Características del Modelo WEAP

WEAP (Water Evaluation and Planning System) es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas. Explícitamente incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso.

La utilización de esta herramienta, tiene el objetivo de describir el desarrollo de un modelo de planificación de los recursos hídricos en la cuenca Piraí. El esquema meteorológico de WEAP consiste en la definición de los límites de la cuenca Piraí (Figura 27), la sistematización e ingreso de la información referida a uso actual y demanda de agua, la construcción de escenarios y la evaluación de los resultados.

Figura 27. . Esquema metodológico del WEAP





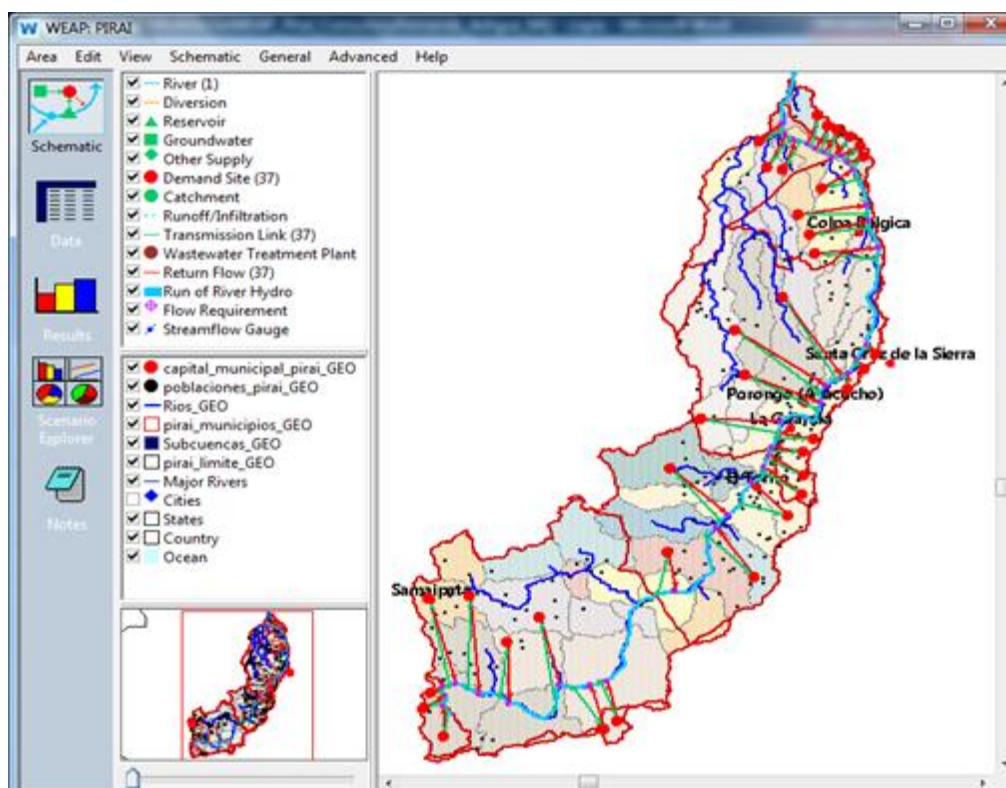
## 6.1.2. Conexión de los Recursos y Demandas en WEAP

La planificación y gestión del agua, diferenciados en usos domésticos, agropecuarios y ambientales, requieren de la integración entre la oferta, demanda, calidad de agua y las consideraciones ecológicas. Bajo este contexto y con la finalidad de realizar un análisis óptimo, se utiliza la herramienta WEAP a nivel de subcuencas y municipios en forma independiente.

En WEAP, se estableció el esquema de los recursos y demandas del río Pirá con su respectiva dirección de los flujos de agua, integrando cada componente de la demanda a nivel sectorial, es decir a nivel municipal, disgregando el sector de la demanda de agua para consumo humano en población urbana y rural, el sector de la demanda de agua para riego y el sector de la demanda de agua para la ganadería (bovinos, caprinos, ovinos, porcinos y gallinas). En el área esquemática también se indican los flujos de retirada y retorno, conectados a cada punto de demanda al río Pirá (Figura 28).

Es primordial definir los recursos de abastecimiento disponible, porque se encuentran las ramas de conexión de la demanda y recursos, escorrentía e infiltración, agua subterránea y flujos de retorno.

Figura 28. Esquema gráfico de conexión de los recursos y demandas de la Cuenca Pirá en WEAP



## **6.2. Uso actual del Agua**

El uso actual del agua en la cuenca del río Piráí tiene tres componentes principales: Consumo de agua humano, el uso del agua en riego y el consumo de agua de los animales. Sin embargo, otro componente importante es el agua para el mantenimiento de la Naturaleza, pero debido a que no se ha definido una metodología idónea para su determinación no se ha realizado la cuantificación de agua necesaria para este componente.

### **6.2.1. Consumo de agua humano**

El consumo de agua humano está definido por la cantidad de población habitante en la cuenca. Para determinar los volúmenes de agua necesarios para este componente, ha sido fundamental la información de los censos realizados por el INE<sup>5</sup> (1992, 2001 y 2012) donde lamentablemente no se pudo acceder a la información del censo 2012 a nivel de municipios y localidades. Asimismo, ha sido importante la búsqueda y revisión de información en los PDMs<sup>6</sup> y EPSAS<sup>7</sup>, sobretodo la publicada por SAGUAPAC<sup>8</sup>.

Según los resultados del censo de población y vivienda (INE, 2001), la población proyectada para el año 2010 en la cuenca es de 1'738.383 habitantes, concentradas en 93% de la población en la capital departamental de Santa Cruz, por lo tanto un 97% de la población es urbana y el 3% rural.

En los últimos años el crecimiento poblacional del departamento de Santa Cruz ha sido muy importante, considerado el más alto del país (2.4% según el censo 2012). De acuerdo a los datos disponibles, los resultados del censo 2001 destacan por su alto crecimiento a los municipios de La Guardia (6.21%), El Torno (5.26%) y Santa Cruz de la Sierra (5.08%) y muestra a los municipios con menor crecimiento a Samaipata (0.68%) y Portachuelo (2.80%). Si bien la concentración de la población está más en las capitales municipales, en la cuenca se advierte que la población tiende a expandirse sobre todo en el municipio de Porongo. Estos indicadores demográficos permitirán diseñar escenarios futuros para el consumo de agua humano.

---

<sup>5</sup> INE: Instituto Nacional de Estadística

<sup>6</sup> PDM: Plan de Desarrollo Municipal

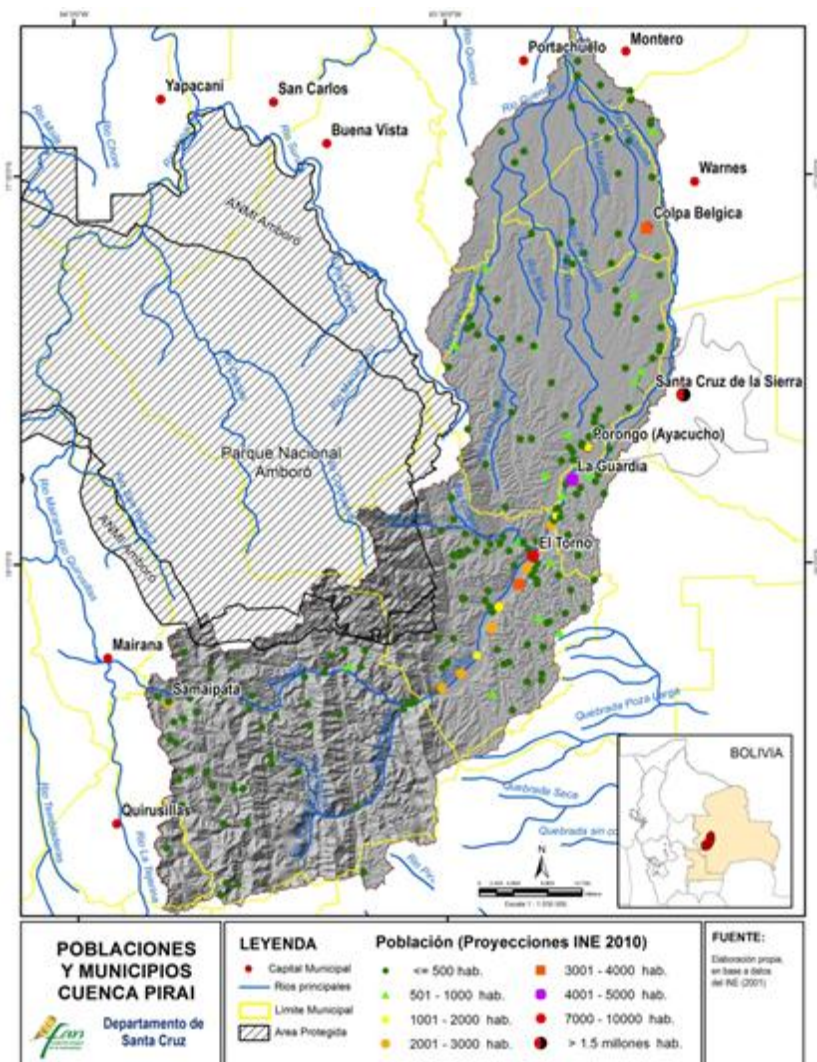
<sup>7</sup> EPSAS: Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento

<sup>8</sup> SAGUAPAC: Cooperativa de Servicios Públicos Santa Cruz

Cuadro 4. Población rural y urbana en la cuenca Pirai

Municipios dentro del área de estudio	Población Proyectada 2010		
	Rural	Urbana	Total
El Torno	18.728	34.563	53.291
Quirusillas	107		107
Montero	660		660
Portachuelo	823		823
Samaipata	4.588	3.334	7.922
Warnes	1.486		1.486
Santa Cruz de la Sierra		1.622.712	1.622.712
Porongo	11.552	2.416	13.968
Cabezas	55		55
Colpa Bélgica	1.528	6.299	7.827
La Guardia	6.407	23.125	29.532
<b>TOTAL</b>	<b>45.934</b>	<b>1.692.449</b>	<b>1.738.383</b>

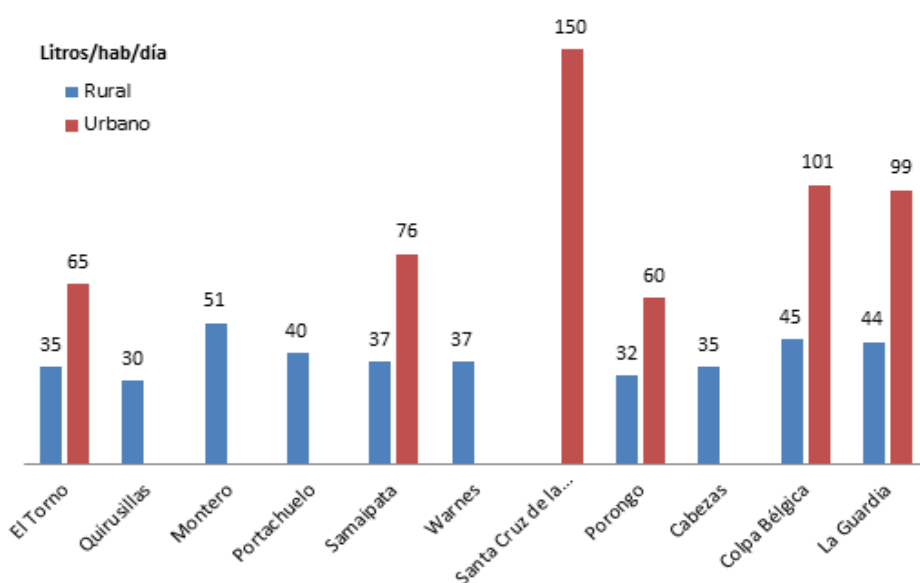
Figura 29. Municipios, Localidades y Poblaciones en la cuenca



Si bien en algunos municipios no existe la información suficiente para establecer el consumo per cápita, se determinó a través de parámetros establecidos según del grado de pobreza y/o riqueza de las poblaciones publicado por el estudio “Desigualdades en el acceso, uso y gasto con el agua potable en Bolivia (2001)”.

En base a toda esta información se ha determinado el consumo per cápita de agua en los diferentes municipios en el contexto rural y urbano. El consumo de agua más alto en el sector urbano se da en la capital cruceña con 150 litros/día/persona, oscilando entre los 60 y 101 litros en el área urbana de los demás municipios. El consumo rural fluctúa entre los 30 y 51 litros/día/persona.

**Figura 30. Consumo per cápita a nivel municipal**



En base al consumo per cápita sectorial y municipal, se ha determinado el consumo de agua humano, resultando un volumen total de 47'065.355 m<sup>3</sup>/año, donde el 99% (46'454.978 m<sup>3</sup>/año) corresponden a las zonas urbanas y el restante 1% (610.377 m<sup>3</sup>/año) a las zonas rurales (Cuadro 5).

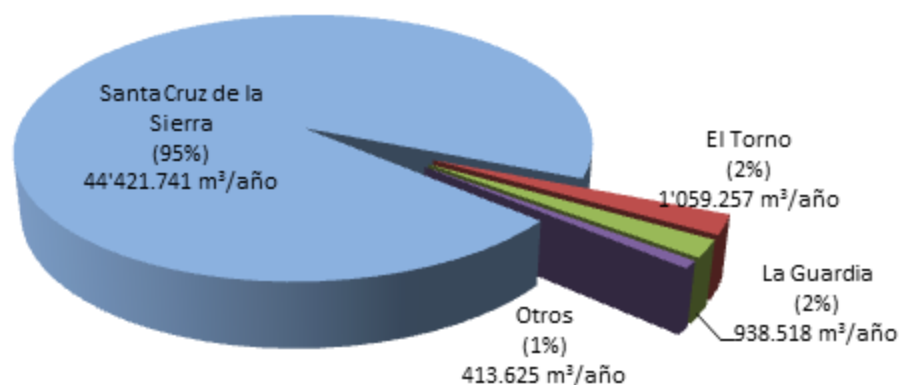
**Cuadro 5. Consumo de agua anual a nivel municipal**

Municipios	Población (N° habitantes)			Consumo de Agua por año m <sup>3</sup> /año		
	Rural	Urbano	Total	Rural	Urbano	Total
El Torno	18.728	34.563	53.291	239.250	820.007	1.059.257
Quirusillas	107		107	1.172	0	1.172
Montero	660		660	12.286	0	12.286
Portachuelo	823		823	12.016	0	12.016
Samaipata	4.588	3.334	7.922	61.961	92.485	154.446
Warnes	1.486		1.486	20.068	0	20.068
Santa Cruz de la		811.356	811.356	0	44'421.741	44'421.741

Municipios	Población (N° habitantes)			Consumo de Agua por año m <sup>3</sup> /año		
	Rural	Urbano	Total	Rural	Urbano	Total
Sierra						
Porongo	11.552	2.416	13.968	134.927	52.910	187.838
Cabezas	55		55	703	0	703
Colpa Bélgica	1.528	6.299	7.827	25.097	232.213	257.310
La Guardia	6.407	23.125	29.532	102.896	835.622	938.518
<b>Total general</b>	<b>45.934</b>	<b>881.093</b>	<b>927.027</b>	<b>610.377</b>	<b>46'454.978</b>	<b>47'065.355</b>

El consumo de agua humano en una proporción mayor se genera en la capital departamental abarcando el 95% (44'421.741 m<sup>3</sup>/año) y en menor porcentaje los municipios de El Torno (1'059.257 m<sup>3</sup>/año) y La Guardia (938.518 m<sup>3</sup>/año) representan el 2% respectivamente, y finalmente en proporciones muy reducidas abarcan las poblaciones rurales de los municipios de Quirusillas, Montero, Portachuelo, Samaipata, Warnes, Porongo, Cabezas y Colpa Bélgica.

Figura 31. Consumo Humano de Agua anualmente



### 6.2.1.1. Cobertura y acceso al agua para consumo humano

De acuerdo a los resultados de los censos 1992 y 2001, la cobertura promedio de agua para consumo humano es óptima, estimándose que hasta el año 2001 el 77% de los pobladores en la cuenca Piraí tienen acceso al agua por cañería para consumo humano (Cuadro 6), siendo el municipio de Santa Cruz de la Sierra con una mayor cobertura (96.3%) y el municipio de Porongo el de menor acceso al servicio con un 51.4%.

Asimismo, los resultados departamentales del censo 2012 permiten adelantar que los municipios del departamento Santa Cruz cuentan con coberturas de agua por cañería adecuadas, estimando que un 78% de la población accede a este servicio.

**Cuadro 6. Disponibilidad de agua por cañería en porcentajes**

	Cobertura de Agua		
	1992	2001	2012
<b>Bolivia</b>	<b>54%</b>	<b>62%</b>	<b>66%</b>
<b>Santa Cruz</b>	<b>80%</b>	<b>84%</b>	<b>78%</b>
Municipio El Torno	58.4%	75.2%	
Municipio Quirusillas	35.9%	69.1%	
Municipio Montero	78.6%	87.3%	
Municipio Portachuelo	61.9%	73.7%	
Municipio Samaipata	47.7%	74.7%	
Municipio Warnes	59.1%	79.7%	
Municipio Santa Cruz de la Sierra	82.0%	96.3%	
Municipio Porongo	15.4%	51.4%	
Municipio Cabezas	60.4%	70.5%	
Municipio Colpa Bélgica	62.2%	89.7%	
Municipio La Guardia	66.2%	83.9%	
<b>Total general</b>	<b>57.1%</b>	<b>77.4%</b>	

Fuente: Elaboración propia en base al INE (2010)

### 6.2.1.2. Procedencia del agua para consumo humano

La procedencia del agua para el consumo humano, es importante considerarla porque difiere según la disponibilidad de los recursos hídricos y la gestión del agua. En este sentido, para conocer la procedencia del agua, se han utilizado los resultados departamentales del censo 2012 del INE, donde se evidencia que el 82% de la población del departamento de Santa Cruz adquiere agua por cañería de red.

**Figura 32. Procedencia del agua en el departamento de Santa Cruz**





## 6.2.2. Uso del Agua en Riego

De acuerdo a la información del uso actual (2010), se estima que la agricultura tradicional bajo riego alcanza una superficie total de 6.027 hectáreas concentrados en los municipios de Samaipata y Quirusillas, sin embargo la información revisada en los PDMs muestran superficies muy inferiores (aprox. 336 has en Samaipata), por lo que la superficie de riego ha sido ajustada, considerando de que en la región de los valles contiguos a los cursos principales del río Piraí son regados en los distintos municipios a través de la extracción directa de los ríos por bombeo.

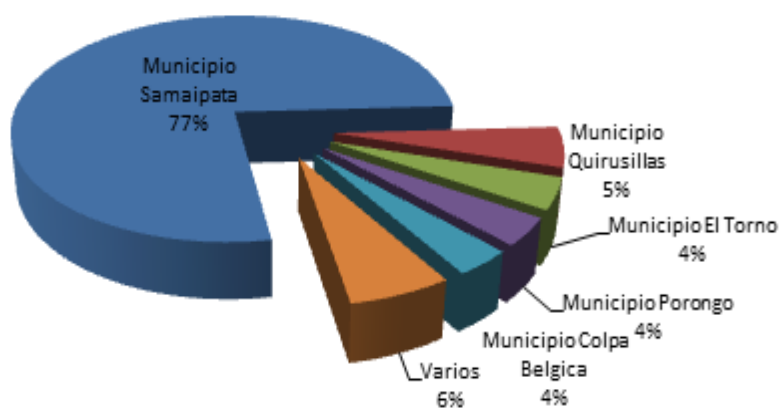
Según el Plan Departamental de Riego (2008), de la superficie cultivada en Santa Cruz (1,8 millones de ha.) sólo el 1,6% (aprox. 30.000 ha.) se cultiva bajo riego, por lo que en toda la zona de los valles se concentra un 51% del riego. Asimismo, se estima que de acuerdo al potencial agrícola la superficie podría duplicar en los próximos años, y para ello la demanda actual de proyectos según el SEDRI contemplan 120 proyectos de riego, microriego y drenaje en la zona de los valles, por lo que la presión hacia los recursos hídricos aumentará para satisfacer estas demandas.

Con esta premisa, se ha determinado en la cuenca Piraí una superficie total de 1.519 hectáreas de cultivos bajo riego, concentrados mayormente en los municipios de Samaipata (77%, 1.168 ha), Quirusillas (5%, 82 ha), El Torno (4%, 64 ha), Porongo (4%, 57 ha) y Colpa Bélgica (4%, 53 ha).

**Cuadro 7. Volumen de riego por año a nivel municipal**

Municipios	Superficie de cultivos bajo Riego (hectárea)	Volumen de riego m <sup>3</sup> /año
El Torno	64	224.940
Quirusillas	82	288.626
Montero	15	54.149
Portachuelo	22	75.558
Samaipata	1.168	4.089.431
Warnes	12	41.618
Santa Cruz de la Sierra	7	24.608
Porongo	57	198.915
Cabezas	0	0
Colpa Bélgica	53	185.137
La Guardia	38	132394.5
<b>TOTAL</b>	<b>1.519</b>	<b>5.315.376</b>

**Figura 33. Volumen de agua utilizada en riego por año**



### 6.2.3. Consumo de Agua para la Ganadería

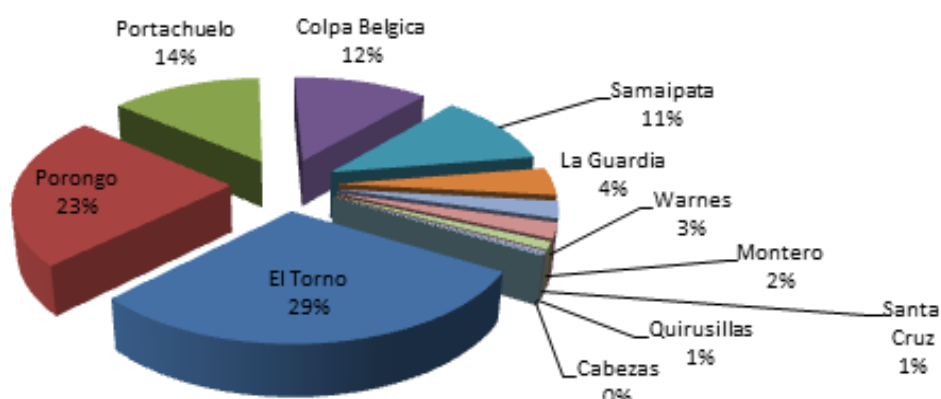
De acuerdo a los informes de la Cámara Agropecuaria del Oriente (CAO), la ganadería en la cuenca es una actividad productiva importante, sobre todo la producción de bovinos. La ganadería en la cuenca es diversificada, distinguiéndose el manejo de bovinos, caprinos, porcinos y gallinas (información extraída de los PDMs). Con estos insumos se han diferenciado los diferentes requerimientos y/o consumo de agua para la ganadería, denotándose un consumo de agua total de 2'168.705 m<sup>3</sup>/año (Cuadro 8), de los cuales la producción de bovinos abarca el 92% (2'168.705 m<sup>3</sup>/año), un 6% la producción de gallinas, los porcinos el 2% y en menor fracción del 0,2% la producción de caprinos.

**Cuadro 8. Consumo anual de agua en la Ganadería**

Municipios	Bovinos		Caprinos y Ovinos		Porcinos		Gallinas		Consumo Total m <sup>3</sup> /año
	Nº	Consumo m <sup>3</sup> /año	Nº	Consumo m <sup>3</sup> /año	Nº	Consumo m <sup>3</sup> /año	Nº	Consumo m <sup>3</sup> /año	
El Torno	24.687	513.613	872	1.337	8.120	20.747	216.218	102.595	638.292
Quirusillas	439	9.143	32	49	43	110	235	112	9.414
Montero	2.308	48.021			396	1.012	1.452	689	49.722
Portachuelo	13.912	289.444			494	1.262	1.811	859	291.565
Samaipata	10.841	225.547	1.101	1.688	2.752	7.031	10.094	4.789	239.056
Warnes	2.540	52.848			594	1.518	3.269	1.551	55.917
Santa Cruz de la Sierra	1.169	24.321							24.321
Porongo	23.137	481.366			4.620	11.804	25.414	12.059	505.229
Cabezas	200	4.161					121	57	4.218
Colpa Bélgica	12.389	257.753			92	235	3.362	1.595	259.583
La Guardia	3.928	81.719	384	589	768	1.962	15.000	7.118	91.387
<b>Total general</b>	<b>95.551</b>	<b>1'987.936</b>	<b>2.389</b>	<b>3.662</b>	<b>17.879</b>	<b>45.681</b>	<b>276.975</b>	<b>131.425</b>	<b>2'168.705</b>

Basados en estos resultados, también se denotan a los municipios de El Torno (29%, 638.292 m<sup>3</sup>/año), Porongo (23%, 505.229 m<sup>3</sup>/año), Portachuelo (14%, 291.565 m<sup>3</sup>/año), Colpa Bélgica (12%, 259.583 m<sup>3</sup>/año) y Samaipata (11%, 239.055 m<sup>3</sup>/año) con los requerimientos de agua más altos para este rubro.

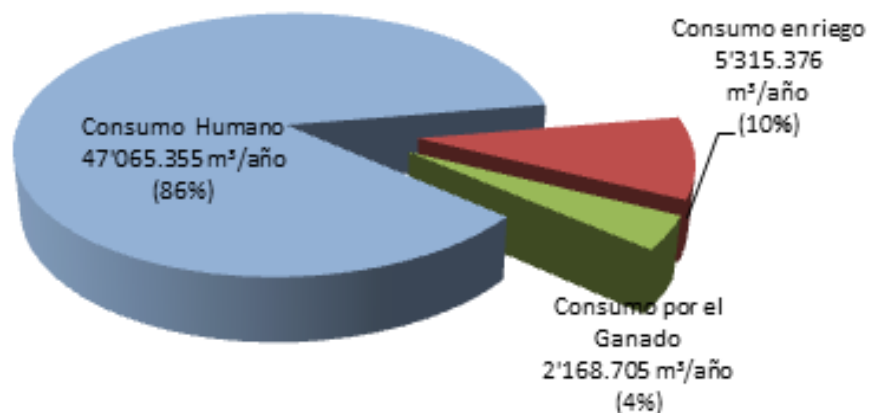
**Figura 34. Volumen de agua anual consumida por el Ganado**



### 6.3. Consumo Total de Agua

Articulando los requerimientos de agua en los distintos componentes, el consumo total de agua en la cuenca del río Piraí es de 54'549.435 m<sup>3</sup>/año, concentrados en un 86% el agua para consumo humano, dada la magnitud de pobladores que demandan anualmente este líquido esencial, sobretodo en la capital cruceña. EL agua necesaria para la producción de alimentos (agrícola) bajo sistemas de riego alberga un 10% del total, demandando anualmente 5'315.376 m<sup>3</sup>/año de agua, y finalmente la ganadería también requiere 2'168.705 m<sup>3</sup>/año de agua por año (4% del volumen total).

**Figura 35. Volumen total de agua consumida por año**

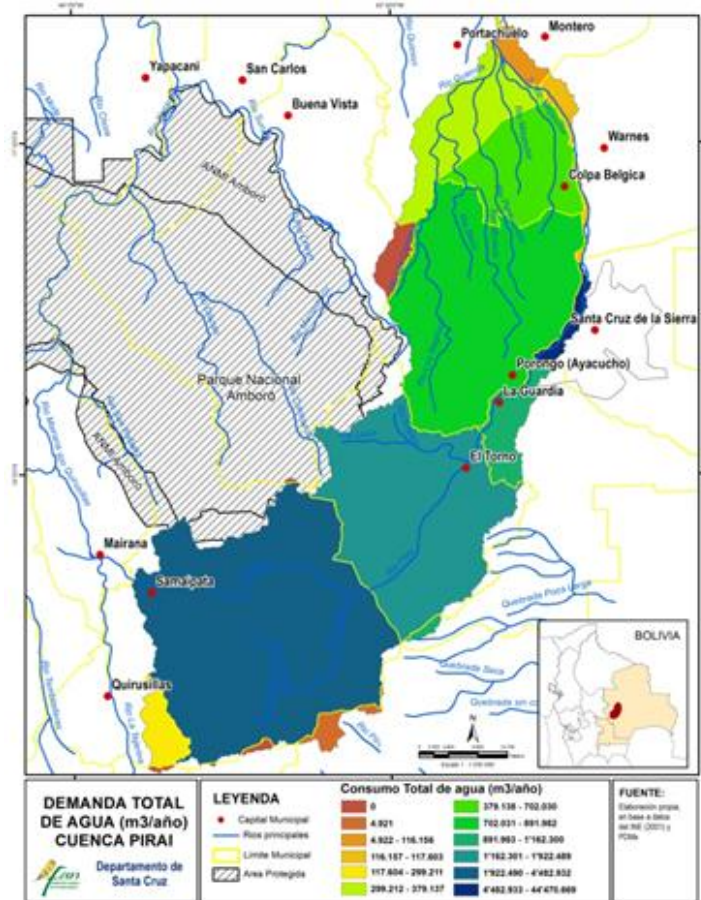


Así como el agua de consumo humano denota su importancia, sobre todo en las zonas urbanas de los municipios de Santa Cruz de la Sierra, El Torno y La Guardia, la demanda de agua para el riego es importante en el municipio de Samaipata.

**Cuadro 9. Consumo Total de Agua en las Subcuencas y Municipios**

Municipios	Consumo de Agua Humano m <sup>3</sup> /año	Consumo de Agua en riego m <sup>3</sup> /año	Consumo de Agua por el Ganado m <sup>3</sup> /año	Consumo de Agua Total m <sup>3</sup> /año
El Torno	1.059.257	224.940	638.292	1.922.489
Quirusillas	1.172	288.626	9.414	299.211
Montero	12.286	54.149	49.722	116.156
Portachuelo	12.016	75.558	291.565	379.140
Samaipata	154.446	4.089.431	239.056	4.482.933
Warnes	20.068	41.618	55.917	117.603
Santa Cruz de la Sierra	44.421.741	24.608	24.321	44.470.670
Porongo	187.838	198.915	505.229	891.982
Cabezas	703	0	4.218	4.921
Colpa Bélgica	257.310	185.137	259.583	702.030
La Guardia	938.518	132.395	91.387	1.162.300
<b>Total general</b>	<b>47'065.355</b>	<b>5'315.376</b>	<b>2'168.705</b>	<b>54'549.435</b>

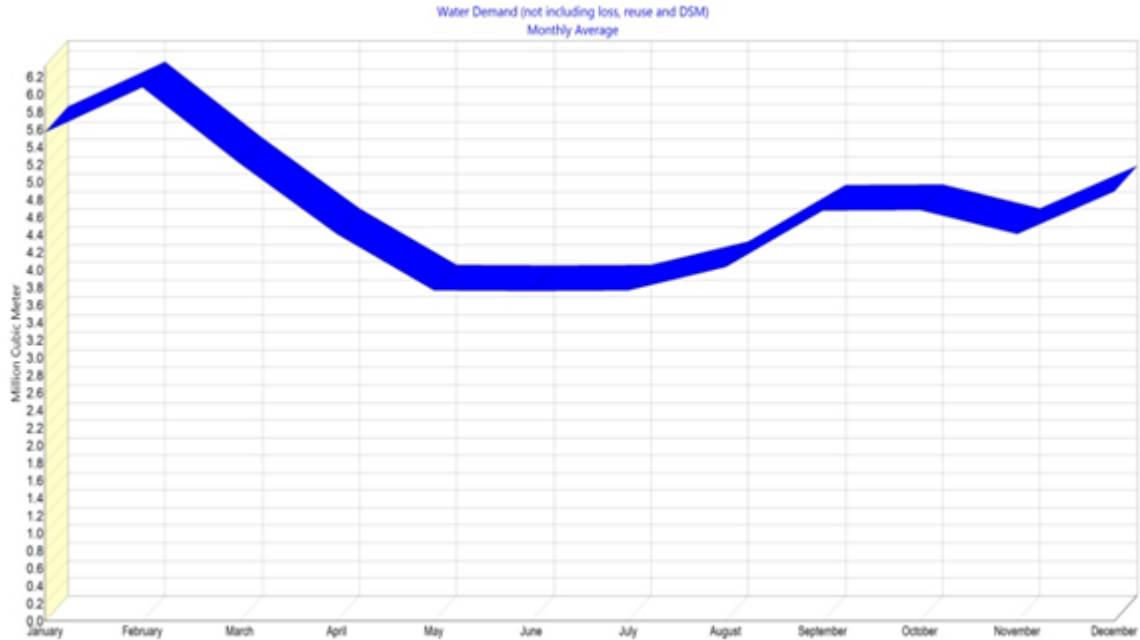
**Figura 36. Demanda Total de Agua por año en los Municipios**



#### 6.4. Demanda Actual del agua a nivel mensual y sectorial

De acuerdo a los sitios de demanda de agua para consumo humano (urbano y rural) y las áreas de demanda de agua para la producción agropecuaria (agricultura y ganadería), el volumen de agua requerido en la gestión 2010 en la cuenca Pirai es de 54'549.435 m<sup>3</sup>/año, esté volumen a nivel mensual varía, siendo enero y febrero los meses con mayores volúmenes de consumo de agua llegando hasta los 5'569.038 m<sup>3</sup>/mes y 6'082.626 m<sup>3</sup>/mes. Asimismo, existe una reducción en la cantidad de agua requerida debido a las bajas temperaturas (invierno) en los meses de junio y julio, consumiendo en toda la cuenca volúmenes de 3'762.405 m<sup>3</sup>/mes y 3'768.344 m<sup>3</sup>/mes respectivamente.

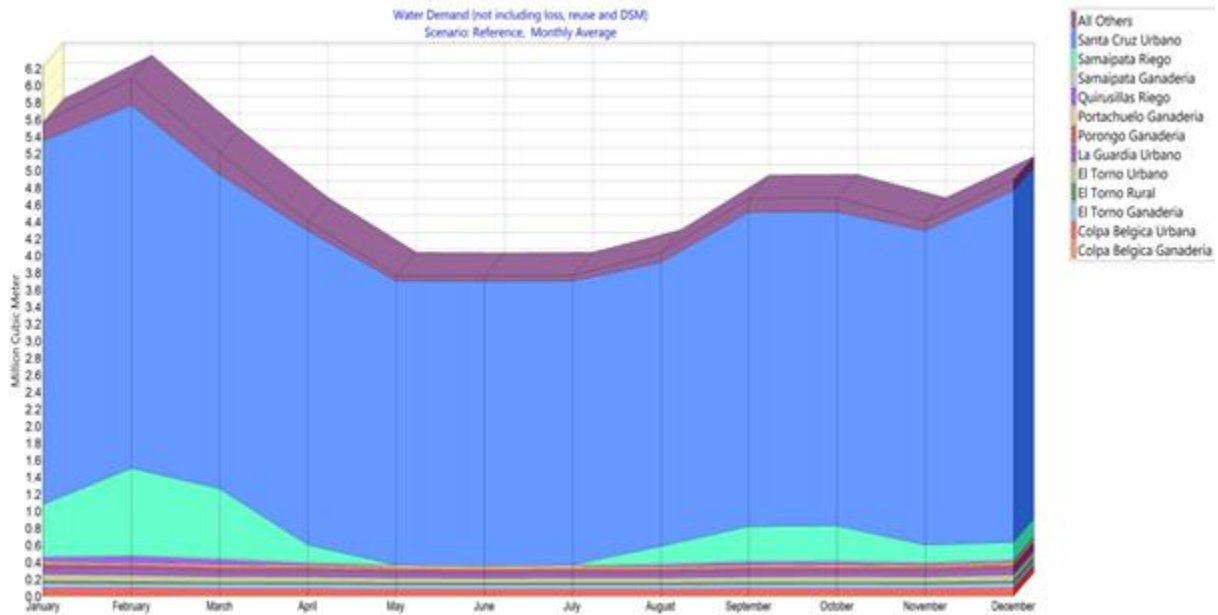
Figura 37. Demanda de agua a nivel mensual



La demanda y/o consumo de agua a nivel sectorial, se analiza en la figura 38 según los sitios y áreas definidas en la esquema de modelación en WEAP, donde el 80.4% abarca el consumo de agua en la capital cruceña que concentra a una importante población, seguida en menor proporción con el 7.4% el agua requerida para el riego en el municipio de Samaipata.

**Figura 38. Consumo sectorial de agua a nivel mensual**



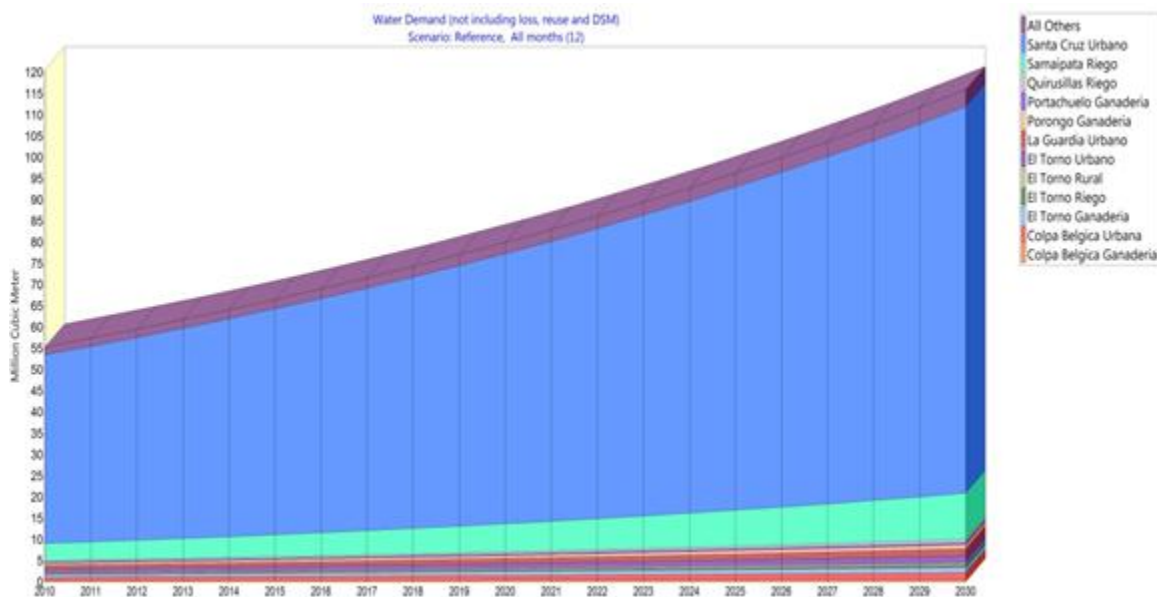


### 6.5. Proyección de la Demanda de agua 2010-2030

En base al crecimiento poblacional suscitado en los últimos años, los proyectos programados en riego y la dinámica del sector ganadero, en la herramienta WEAP se ha determinado el crecimiento de la demanda agua en escenarios futuros según los usos del agua. En razón de que la expansión agrícola está muy relacionada con el crecimiento poblacional y el potencial de los suelos, se ha proyectado la demanda de agua por sectores para el año 2030, y así analizar su relación con los cambios producidos en la disponibilidad hídrica según los cambios climáticos a producirse con el escenario A2 del modelo ECHAM4 generados a través del SWAT. En este sentido, la demanda futura de agua a nivel sectorial se analiza en la figura 39.

Por consiguiente, la demanda de agua en la cuenca Piraí crece anualmente desde los 54'549.435 m<sup>3</sup>/año en el año 2010 a 79'964.910 m<sup>3</sup>/año en el año 2020 y alcanzando los 115'901.118 m<sup>3</sup>/año en el año 2030. Secuencialmente se denota incrementos anuales en el consumo de agua de la ciudad de Santa Cruz y el requerimiento de agua para riego en el municipio de Samaipata.

Figura 39. Demanda de agua proyectada (2010-2030) a nivel anual y sectorial



## 7. BALANCE: OFERTA Vs. DEMANDA DE AGUA

La presión hacia los recursos hídricos de la cuenca Piráí es inminente, sobre todo por la demanda de agua para el consumo humano y para la producción de alimentos (riego y ganadería). Se advierte que el requerimiento de agua irá acrecentando, debido al aumento de la población, la superficie de los cultivos y el aumento de la ganadería, los datos demográficos analizados en los últimos censos (1992 y 2001), denotan los más altos índices de crecimiento poblacional del País (Santa Cruz 5.08%, La Guardia 6.21%, El Torno 5.26% y Porongo 3.16%).

Ante este panorama, es indispensable conocer la relación entre la oferta hídrica disponible y la demanda de agua actual y futura, para una adecuada planificación y gestión del agua en las áreas de mayor riesgo y vulnerabilidad al déficit hídrico.

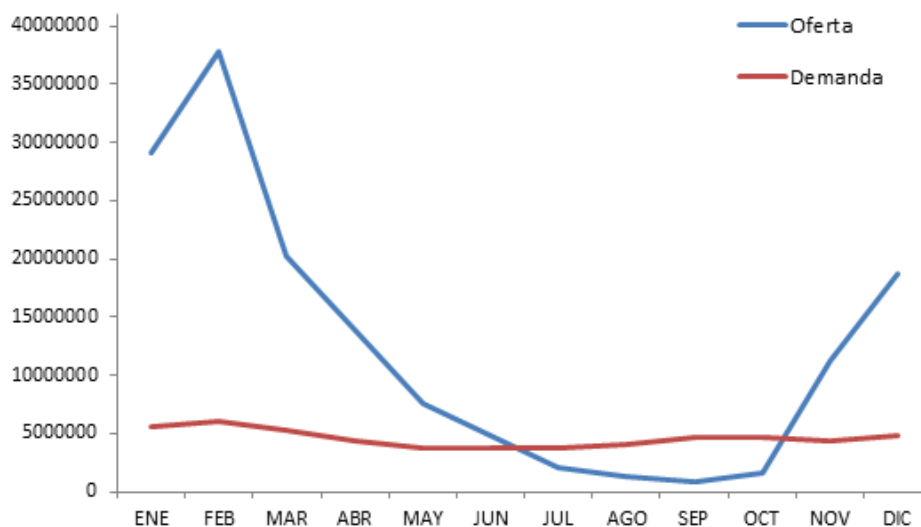
Para el balance entre la oferta y la demanda de agua, se ha utilizado el modelo de planificación hídrica "WEAP" (Sistema de Evaluación y Planificación del Agua), caracterizada por su enfoque integral, que permite el uso de escenarios para generar respuestas a los cambios provocados por las variaciones de la demanda y el suministro de agua, la variabilidad del clima y otros.

### 7.1. Relación actual entre la Oferta y la Demanda de Agua

Para este proceso es necesario estimar la cantidad de agua efectiva de la oferta hídrica, considerando que no se aprovecha la totalidad del agua almacenada en los acuíferos y tampoco se aprovecha el total del agua escurrida a través de los ríos y drenajes de la cuenca, debido a su inaccesibilidad por condiciones biofísicas, equipamiento y costos. Asimismo, esta cantidad de agua no aprovechada permite el mantenimiento de las funciones hidrológicas de la cuenca, la dinámica natural de la flora y fauna, y la regulación climática. Es muy difícil cuantificar el caudal ecológico necesario e indispensable en la cuenca Piraí, para satisfacer los procesos ecológicos que se dan a nivel superficial y a nivel subterráneo, porque de esto depende la generación del agua a través del balance hídrico local (ciclo del agua). En este sentido, para este ejercicio se estima un 30% del total del agua almacenada en las subcuencas como la cantidad de agua efectiva y disponible para el uso de los pobladores en la cuenca Piraí.

Bajo esta premisa, se analiza la relación entre disponibilidad hídrica y la demanda de agua a nivel mensual para el año 2010. Si bien en las subcuencas estudiadas el volumen de agua disponible es mayor a la demanda, se observan meses críticos debido la falta de agua para satisfacer los requerimientos de agua, sobre todo en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre se registran déficit hídricos importantes, generando el desabastecimiento de agua en las poblaciones y comunidades más vulnerables y provocando pérdidas económicas en la producción agrícola y ganadera. La dinámica temporal de la disponibilidad hídrica, condiciona periodos prolongados de estiaje que contrastan con y la demanda de agua. Por lo tanto, los requerimientos de agua son satisfechos en los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre.

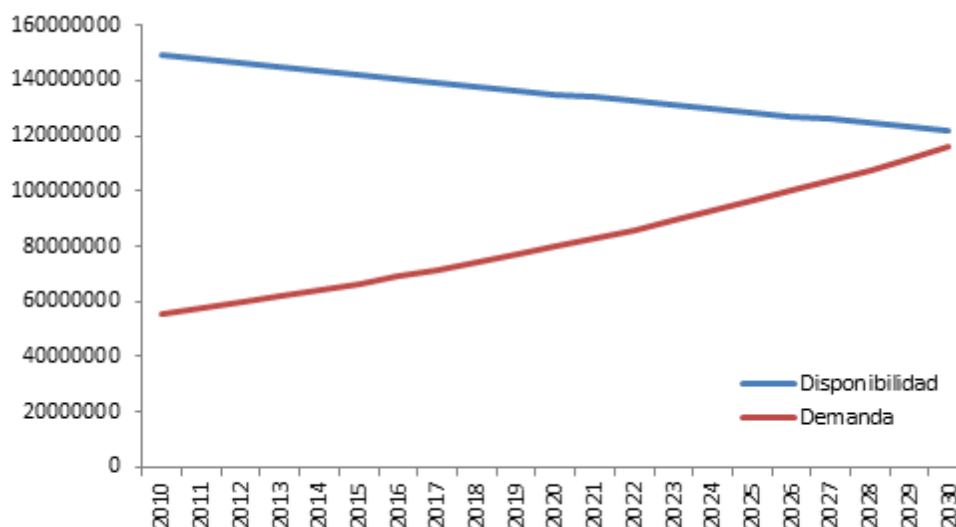
Figura 40. Disponibilidad hídrica y demanda de agua a nivel mensual 2010



## 7.2. Relación entre la Oferta y la Demanda de Agua 2010- 2030

En la figura 41, se observa que la relación entre la disponibilidad hídrica y la demanda de agua proyectada hasta el año 2030, es bastante estrecha. La cuenca Pirai está sujeta a una fuerte presión hídrica, que se irá enfatizando con el crecimiento demográfico y con la ampliación de actividades agropecuarias. Es indispensable desarrollar medidas integrales que permitan generar una planificación estratégica para el aprovechamiento racional de los recursos hídricos.

Figura 41. Oferta hídrica y la demanda de agua proyectada para el año 2030



La escasa brecha entre la disponibilidad efectiva de agua y la demanda total del agua para el año 2030, advierte la importancia de la conservación de las zonas de recarga acuífera, la restauración de la vegetación natural, la recuperación de suelos y el establecimiento de medidas integrales a nivel de cuencas, enfocadas a la utilización racional del agua para conservar y preservar el potencial hídrico del Pirai.

## 8. Análisis de Sensibilidad e Incertidumbre

A pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen. Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración.

En nuestro medio, la limitante principal es la distribución adecuada de estaciones meteorológicas, sobre todo en las zonas altas de las cuencas, donde se producen importantes procesos hidrológicos (lluvia horizontal). En el Pirai existen vacíos de información climática, sobretodo en la región montañosa del Amboró y en la zona Suroeste

de la cuenca. Asimismo, se carece de estaciones hidrométricas que permitan evaluar correctamente los resultados generados a través de modelos hidrológicos.

Sin embargo, la modelación hidrológica en SWAT y WEAP a pesar de la carencia de la información permite comprender el comportamiento hidrológico de la cuenca a escala espacial y temporal.

## **9. Conclusiones y Recomendaciones**

El análisis temporal y la modelación de la cuenca Piraí en SWAT, denota una importante afección en la producción hidrológica y procesos de erosión del suelo a causa del avance de la frontera agrícola, que prácticamente ha duplicado de 299 km<sup>2</sup> a 651 km<sup>2</sup> desde el año 2005 hasta el 2010, esto ha generado la deforestación de 34.401 hectáreas. Asimismo, se ha determinado que 43.053 hectáreas con actividad ganadera también impactan a la cuenca Piraí. A este ritmo en el 2030 se estima que la ampliación agrícola provocará la deforestación de 82.578 hectáreas más y la ganadería se expandirá en 57.661 hectáreas más. Aproximadamente un 34% de los bosques desaparecerán hasta el año 2030.

El cambio en las condiciones de clima regional (Seiler, 2009), escenario ECHAM4 (A2) en el año 2030, tendrá implicancia en el comportamiento hidrológico en la cuenca Piraí. La precipitación mensual disminuirá en los meses de mayo (-47%), junio (-45%) y julio (-61%) e incrementa un 68% y 97% en los meses de septiembre y octubre. La temperatura media anual también incrementará en +1.25°C a nivel anual variando mensualmente hasta +2.7°C en febrero y +0.1°C en junio.

De acuerdo a los cambios producidos en la cuenca, principalmente por la deforestación, la generación de agua en la cuenca ha sufrido cambios. Los resultados en SWAT indican que los caudales producidos se han reducido en un 67% (44,9 m<sup>3</sup>/seg.) en el año 2010 respecto al caudal promedio de 1992 (137,4 m<sup>3</sup>/seg.). Bajo el escenario climático ECHAM4 (A2) y ampliación de las actividades antrópicas al 2030, se estima una disminución del caudal en un 63% más (16,8 m<sup>3</sup>/seg.) respecto al 2010.

Los cambios generados en los caudales, se atribuyen principalmente a la eliminación de bosques y conversión de área naturales en zonas de producción agrícola y pecuaria. Estos cambios observados en la cuenca, sumados al cambio climático, están impactando en la generación de caudales que son importantes para mantener la dinámica natural de los ríos y arroyos.

El almacenamiento del agua subterránea a través de la percolación se redujo en un 70% (240 mm/año) en el año 2010 respecto al año 1992 (793 mm/año), debido a la afección de las zonas de recarga acuífera prioritarias para el abastecimiento de agua, que actualmente se

concentran en las subcuencas del Parque Nacional Amboró y en la región Noreste de la cuenca (llanura aluvial) almacenando actualmente hasta 361 mm anuales. En un escenario futuro, proyectado al 2030 el agua subterránea disponible disminuirá hasta un 59% con relación al año 2010, bajando en un promedio anual de 196 mm anuales.

Los cambios producidos en la cuenca por el avance de la frontera agrícola, han generado un incremento de los procesos de erosión, produciendo sedimentos de hasta 58 T/ha/año en el 2010, sobre todo en las zonas de montaña hacia el Suroeste de la cuenca. Asimismo, la simulación proyectada al 2030 muestra procesos de sedimentación de hasta 136 T/ha/año, al ser tan elevados los procesos de erosión se estima una importante acumulación de sedimentos en los lechos de los ríos, ocasionando modificaciones en su morfología natural y produciendo bajos niveles de fertilidad de los suelos, sobre todo en las zonas de mayor fragilidad.

Los impactos en la cuenca por la expansión agrícola y el cambio climático, están modificando la producción hídrica y la descarga de sedimentos, las proyecciones realizadas permiten conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca Piraí en un futuro próximo, coadyuvando de esta manera, en la toma de decisiones para el manejo y gestión de la cuenca y por consiguiente en las medidas de adaptación al cambio climático.

La disponibilidad de agua accesible para su aprovechamiento y consumo, no constituye la totalidad del volumen de agua escurrida y almacenada a nivel subterráneo. Gran parte del agua es utilizada por la naturaleza, para mantener los procesos ecológicos que garantizan la existencia de la flora y fauna, y determinan la producción hídrica. Bajo este contexto, se ha determinado que el agua disponible para los diferentes usos en el año 2010 es de 149'384.798 m<sup>3</sup>/año, este volumen es variable a nivel mensual, diferenciándose en las estaciones primavera-verano una mayor disponibilidad de agua. Asimismo, se estima que para el 2030 el volumen de agua disponible será de 122'182.863 m<sup>3</sup>/año.

En el análisis de la demanda de agua, los 927.027 habitantes (población proyectada 2010) en la cuenca Piraí ejercen una fuerte presión hacia los recursos hídricos, demandando anualmente 54'549.435 m<sup>3</sup>/año, de las cuales el 86% del agua es utilizada para el consumo humano, el 10% es requerida para el riego de cultivos y el 4% restante para la ganadería.

El agua para el consumo humano suma un total de 47'065.355 m<sup>3</sup>/año, de los cuales el 95% del agua es demandada por la capital cruceña, y el restante 5% es requerido por los pobladores de El Torno, La Guardia, Quirusillas, Montero, Portachuelo, Samaipata, Warnes, Porongo, Cabezas y Colpa Bélgica. Asimismo, la cobertura del servicio de agua es del 77.4% y la procedencia del agua en el 82% de las viviendas es por cañería de red.



La agricultura tradicional bajo riego requiere de 5'315.376 m<sup>3</sup>/año, concentrados mayormente en los municipios de Samaipata (77%, 1.168 ha), Quirusillas (5%, 82 ha), El Torno (4%, 64 ha), Porongo (4%, 57 ha) y Colpa Bélgica (4%, 53 ha).

El consumo de agua por la ganadería es de 2'168.705 m<sup>3</sup>/año, distinguiéndose a los municipios de El Torno en (29%), Porongo (23%), Portachuelo (14%), Colpa Bélgica (12%) y Samaipata (11%) con los requerimientos de agua más altos para este rubro.

De acuerdo a la modelación en WEAP, la demanda de agua a nivel sectorial está concentrada en el consumo de agua humano (80.4%) de la capital cruceña, y en el agua requerida para el riego en el municipio de Samaipata (7.4%). Asimismo, el volumen a nivel mensual varía, siendo enero y febrero los meses con mayores volúmenes de consumo de agua llegando hasta los 5'569.038 m<sup>3</sup>/mes y 6'082.626 m<sup>3</sup>/mes.

Las poblaciones de la cuenca Piraí están sujetas a periodos de estiaje, sobre todo en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre, debido a que la demanda sobrepasa al volumen de agua disponible. Es imprescindible desarrollar medidas de adaptación y mitigación a los efectos de las sequías recurrentes y prolongadas.

La relación entre la oferta y demanda de agua proyectada hasta el año 2030, muestra con el transcurrir de los años una mayor estrechez. Es imprescindible tomar acciones, que coadyuven en la optimización del uso de los recursos hídricos y se desarrollen prácticas de conservación, de carácter prioritario en las zonas de recarga acuífera y áreas de abastecimiento de agua.

Las herramientas SWAT y WEAP, han sido fundamentales para analizar a detalle el balance entre la oferta hídrica y demanda de agua, lo cual permitió establecer la línea base de la situación actual de los recursos hídricos en el Piraí. Es imprescindible, sobre la base del presente estudio, desarrollar análisis enfocados a la planificación participativa y gestión integral del agua, tanto para su aprovechamiento como para su conservación.

La cuenca del río Piraí es frágil y vulnerable al déficit hídrico, de no tomar acciones de gestión sostenible podrían conllevar a una degradación acelerada si no se toman acciones de gestión sostenible del agua. La dinámica climática de la región, determinan las condiciones hidrológicas de la región, los probables efectos del cambio climático enfatizarán los periodos de estiaje, generando escenarios de sequías más prolongas e intensas. Es de vital importancia desarrollar acciones de conservación y aprovechamiento racional del agua.

A través de la herramienta WEAP, se recomienda desarrollar escenarios de planificación y gestión del agua, con la participación de los gobiernos municipales, organizaciones sociales, empresas, cooperativas de agua y gobierno nacional, para evaluar los impactos en el balance de la oferta y demanda de agua.

## 10. Bibliografía

ARNOLD, J. G. P. M. ALLEN. et al. (1995). "Automated base flow separation and recession techniques." *Ground Water* 33(6): 1010-1018.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S. & J. R. WILLIAMS. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. American Water Resour. Assoc.* 34(1):73-89

CHOW, V. T., D. R. MAIDMENT y L. W. MAYS (1994) *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H. & J. G. ARNOLD. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4): 1211-1250.

GOBIERNO DEPARTAMENTAL PREFECTURA SANTA CRUZ. 2008. Plan Departamental de Riego Departamento de Santa Cruz. Servicio Departamental de Riego.

IBISCH, P.L. & G. MERIDA (eds.) (2003): *Biodiversidad: La riqueza de Bolivia*. Estado de Conocimiento y Conservación. Ministerio de Desarrollo Sostenible. Editorial FAN. Santa Cruz de la Sierra. Bolivia.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. 2004. *Indicadores Sociodemográficos por Provincia y Secciones de Provincia 1992-2001*. Departamento de Santa Cruz. La Paz. Bolivia.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. 2005. *Estadísticas e Indicadores Sociodemográficos. Productivos y Financieros por Municipio*. Departamento de Chuquisaca. La Paz. Bolivia.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. 2013. *Bolivia. Características de Población y Vivienda*. Censo nacional de Población y Vivienda 2012. La Paz. Bolivia.

KANNAN, N.; WHITE, S. M.; WORRALL, F. & M. J. WHELAN. 2007. Hydrological modelling of a small catchment using SWAT-2000: Ensuring correct flow partitioning for contaminant modelling. *Journal of Hydrology*. 334: 64-72.

MINISTERIO DE DESARROLLO RURAL Y TIERRAS. 2011. *Mapa de Cobertura y Uso Actual de la Tierra 2010*. BOLIVIA. Viceministerio de Tierras. Unidad Técnica Nacional de Información de la Tierra (2010).

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE y AGUA. 2013. Plan Maestro Metropolitano de Agua y Saneamiento (PMM) en los municipios de La Paz, El Alto, Santa Cruz, Cochabamba y Tarija. Programa de Agua y Alcantarillado Periurbano (PAAP). TYPASA. CITEC. Land and Water Bolivia. Aguilar & Asociados.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D. & T. L. VEITH. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. 50(3): 885-900.

MUSEO DE HISTORIA NATURAL NOEL KEMPFER MERCADO. 2007. Mapa de Uso Actual y Cobertura Vegetal 2005 del Departamento de Santa Cruz. Prefectura del Departamento de Santa Cruz. Secretaria Departamental de Desarrollo Sostenible.

NAVARRO. G. 2002. Vegetación y unidades biogeográficas. En: Navarro. G. & M. Maldonado (eds). Geografía ecológica de Bolivia. Vegetación y ambientes acuáticos. Centro de Ecología Simón Patiño. Cochabamba. Bolivia. 1-500 pp.

NAVARRO G. & W. FERREIRA. 2007. Mapa de vegetación de Bolivia. CD-ROM interactive. The Nature Conservancy & Rumbol. ISBN 978-99954-0-168-9.

OÑATE F. 2004. Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su Aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. Revista Electrónica de la REDLACH. Numero1. Año 1. Universidad Técnica Particular de Loja. Ecuador.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. 2001. Desigualdades en el acceso, uso y gasto con el agua potable en América Latina y el Caribe. BOLIVIA. Serie de Informes Técnicos No. 1. Organización Mundial de la Salud. Programa de Políticas Públicas y Salud. División de Salud y Desarrollo Humano. Programa de Saneamiento Básico División de Salud y Ambiente. Washington, DC.

GOBIERNO MUNICIPAL DE EL TORNO. 2009. Plan de Desarrollo Municipal El Torno. 2009-2013. Santa Cruz. Bolivia.

GOBIERNO MUNICIPAL DE SAMAIPATA. 2005. Plan Municipal de Ordenamiento Territorial de Samaipata. Proyecto FORTEMU. Santa Cruz. Bolivia.

GOBIERNO MUNICIPAL DE LA GUARDIA. 2006. Plan de Desarrollo Municipal de La Guardia. CAEM Consultores. 2006-2010. Santa Cruz. Bolivia.

NEITSCH. S. L. J. G. ARNOLD. et al. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation - Version 2005.

NEITSCH. S. L. E. A. 2002. "Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation."

PNUD. 2004. Índice de Desarrollo Humano de Los Municipios de Bolivia. Un Informe Nacional de Desarrollo Humano. La Paz-Bolivia.

SCS. SOIL CONSERVATION SERVICE. 1984. Engineering Field. Manual for Conservation Practices. Fourth Printing. Chapter 2. Estimating Runoff.

SEI. STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE, 2008, Tutorial en inglés WEAP, Boston-US. <http://www.weap21.org/Tutorial>.

SEILER, C. 2009. Implementation and validation of a Regional Climate Model for Bolivia, Fundación Amigos de la Naturaleza.

WATSON R. ZINYOWERA M. & MOSS R.1997. Informe Especial Del IPCC Impactos Regionales Del Cambio Climático: Evaluación de la Vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

WISCHMEIER, WH & DD SMITH. 1978. Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agr. Handbook, 537.



Fundación Amigos de la Naturaleza  
Km 7 1/2 Doble Vía a La Guardia  
Tel: (591-3) 355-6800 Fax: (591-3) 354-7383  
e-mail: fan-bo.org - [www.fan-bo.org](http://www.fan-bo.org)

