

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE AGRONOMIA
CARRERA DE INGENIERIA AGRONOMICA**



TESIS DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA SUBCUENCA DEL
RÍO GRANDE DE LIPEZ DEL ALTIPLANO SUR CON FINES DE
APLICACIÓN DE RIEGO**

Edwin MAYTA CARRILLO

La Paz, Bolivia

2009

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE AGRONOMIA
CARRERA DE INGENIERIA AGRONOMICA**

**EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA SUBCUENCA DEL
RÍO GRANDE DE LIPEZ DEL ALTIPLANO SUR CON FINES DE
APLICACIÓN DE RIEGO**

*Tesis de Grado presentado como requisito
parcial para optar al Título de
Ingeniero Agrónomo*

EDWIN MAYTA CARRILLO

TUTOR

Ing. Edwin Eusebio Yucra Sea

ASESOR:

Ing. Roberto Miranda Casas

TRIBUNAL EXAMINADOR:

Ing. Ph.D. Aquiles Arce Laura

Ing. Ph.D. Magali García Cárdenas

Ing. Ph.D. René Chipana Rivera

APROBADA

PRESIDENTE TRIBUNAL EXAMINADOR:

.....

2009

DEDICATORIA:

Con toda mi admiración y cariño a mis padres:

*José Mayta Q. y Victoria Carrillo R.
por su incondicional apoyo, paciencia, comprensión
y por todas sus enseñanzas.*

*A mis hermanos Cleto, Rossmery, Ronald y Nilton
por su cariño y apoyo.*

A toda mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar un sincero agradecimiento a las siguientes instituciones y personas que de una u otra manera hicieron posible la realización del presente trabajo.

Al proyecto QUINAGUA (Cooperación del Consejo Interuniversitario Flamenco Bélgica) por darme la oportunidad de realizar la tesis de grado, concediéndome una beca tesis y por el apoyo brindado.

A la Comunidad de Mejillones por haberme abierto las puertas y acogido en la población.

A la Organización CEDEINKU por haberme acogido en sus instalaciones.

Al Centro INTI, Ing. Estanislao Quispe, Ing. Edgar Ticona, al Consorcio LIPEZ, al Ing. Hugo Bautista y a todos los profesionales que forman parte de estas instituciones, que colaboraron con este trabajo de investigación.

Al Laboratorio de edafología por haberme brindado sus instalaciones, equipos y materiales.

Al Ing. Roberto Miranda Casas, por su asesoramiento y por el apoyo brindado así también por las sugerencias, consejos y por el tiempo brindado para que este trabajo se realice de la mejor forma posible.

Al Ing. Edwin Yucra Sea, por su asesoramiento y por las recomendaciones siempre tan atinadas, por la paciencia, por brindarme sus conocimientos en forma incondicional y por todo el apoyo recibido para que se culmine el presente trabajo.

Al Ing. M.Sc. Sam Geerts un gran amigo, por compartir sus conocimientos, por brindarme su gran amistad, por su colaboración brindada durante la realización de este trabajo de investigación.

Al tribunal revisor; Ing. Ph.D. Aquiles Arce Laura, Ing. Ph.D. René Chipana Rivera, por la revisión, las correcciones y las sugerencias realizadas para nutrir el presente trabajo de investigación. Un agradecimiento muy grande a la Ing. Ph.D. Magali García Cárdenas por el tiempo brindado, por las correcciones, recomendaciones, por la confianza brindada para que este trabajo de investigación se hiciera realidad.

A mis docentes, compañeros, amigos y en general a toda mi Facultad, que formó parte de mi vida durante mi formación profesional.

Y finalmente a José Mayta y Victoria Carrillo mis padres, por haberme dado la oportunidad de ser educado y por brindarme un hogar.

INDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| INDICE GENERAL..... | i |
| INDICE DE CUADROS..... | v |
| INDICE DE FIGURAS..... | viii |
| RESUMEN..... | ix |
| SUMMARY | xii |
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.1.1 Objetivo general..... | 2 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 2 |
| 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 2.1 Recursos hídricos | 3 |
| 2.1.1 Recursos hídricos de Bolivia..... | 3 |
| 2.1.2 Recursos hídricos del altiplano sur | 3 |
| 2.1.3 Uso agrícola del agua en Bolivia..... | 4 |
| 2.2 Cuenca Hidrológica..... | 5 |
| 2.2.1 Superficie de la cuenca | 5 |
| 2.2.2 Perímetro de la cuenca | 6 |
| 2.2.3 Índice o factor de forma de una cuenca | 6 |
| 2.2.4 Índice de compacidad (índice de Gravelious) | 6 |
| 2.2.5 Rectángulo equivalente..... | 7 |
| 2.2.6 Perfil Longitudinal del Curso de Agua..... | 7 |
| 2.3 El ciclo hidrológico..... | 7 |
| 2.4 Recursos hídricos superficiales..... | 8 |
| 2.5 Recursos hídricos subterráneos..... | 9 |
| 2.5.1 Acuífero..... | 10 |
| 2.5.1.1 Acuífero libre..... | 10 |
| 2.5.1.2 Acuífero confinado | 10 |
| 2.5.1.3 Acuífero semiconfinado..... | 11 |
| 2.5.1.4 Acuífero semilibre | 11 |
| 2.5.2 Pozo | 11 |
| 2.5.3 Medida del nivel freático | 11 |
| 2.6 Balance hídrico del suelo | 12 |
| 2.6.1 Precipitación | 12 |
| 2.6.2 Escurrimiento | 13 |
| 2.6.3 Evapotranspiración | 13 |
| 2.6.3.1 Evaporación de referencia (ET _o) | 14 |
| 2.6.3.2 Evapotranspiración del cultivo (ET _c)..... | 14 |
| 2.6.3.3 Coeficiente de cultivo (K _c) | 15 |
| 2.6.4 Agua en el suelo | 15 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.6.4.1 | Agua disponible total..... | 15 |
| 2.6.4.2 | Agua fácilmente aprovechable (AFA)..... | 16 |
| 2.6.4.3 | Movimiento del agua en el suelo..... | 16 |
| 2.6.4.4 | Medición de la humedad del suelo..... | 17 |
| 2.7 | Calidad de agua..... | 17 |
| 2.7.1 | Problemas de la calidad del agua de riego..... | 17 |
| 2.7.1.1 | Salinidad..... | 17 |
| 2.7.1.2 | Problemas de infiltración..... | 18 |
| 2.7.1.3 | Toxicidad..... | 19 |
| 2.7.1.4 | Dureza..... | 20 |
| 2.7.1.5 | Riesgos de Obturación..... | 20 |
| 2.7.2 | Normas para la toma de muestras..... | 20 |
| 2.8 | La quinua..... | 21 |
| 2.8.1 | Tolerancia del cultivo de la quinua a la salinidad..... | 22 |
| 2.8.2 | Requerimientos hídricos de la quinua..... | 23 |
| 2.8.3 | Fases fenológicas críticas del cultivo de quinua a la sequía..... | 23 |
| 2.9 | El suelo..... | 24 |
| 2.9.1 | Materia orgánica en el suelo..... | 24 |
| 2.9.2 | pH del suelo..... | 25 |
| 2.9.3 | Suelos salinos..... | 25 |
| 2.9.4 | Densidad del suelo..... | 26 |
| 2.9.5 | Textura del suelo..... | 26 |
| 2.10 | El modelo BUDGET..... | 27 |
| 2.10.1 | Contribución o entradas..... | 28 |
| 2.10.2 | Producto o salida..... | 28 |
| 3 | LOCALIZACIÓN..... | 30 |
| 3.1 | Ubicación geográfica..... | 30 |
| 3.2 | Características ecológicas..... | 30 |
| 3.2.1 | Clima..... | 30 |
| 3.2.1.1 | Temperatura..... | 30 |
| 3.2.1.2 | Precipitación..... | 31 |
| 3.2.1.3 | Humedad relativa, insolación y viento..... | 31 |
| 3.2.2 | Fisiografía y suelos..... | 31 |
| 3.2.3 | Vegetación..... | 32 |
| 4 | MATERIALES Y MÉTODOS..... | 34 |
| 4.1 | Materiales..... | 34 |
| 4.1.1 | Materiales de laboratorio..... | 34 |
| 4.1.2 | Materiales de campo..... | 34 |
| 4.1.3 | Material de gabinete..... | 34 |
| 4.1.4 | Equipos..... | 35 |
| 4.2 | Metodología..... | 35 |
| 4.2.1 | Determinación de los parámetros físicos de la cuenca..... | 35 |
| 4.2.1.1 | Área y perímetro..... | 38 |
| 4.2.1.2 | Índice o factor de forma (F)..... | 38 |
| 4.2.1.3 | Índice de compacidad (índice de Gravelious)..... | 38 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.2.1.4 | Rectángulo equivalente..... | 39 |
| 4.2.2 | Determinación de la geología, fisiografía y topografía, y suelo de la cuenca | 40 |
| 4.2.3 | Determinación de la dinámica del flujo superficial | 40 |
| 4.2.4 | Determinación de la dinámica del flujo subsuperficial..... | 41 |
| 4.2.4.1 | Monitoreo de la humedad del suelo | 41 |
| 4.2.4.2 | Análisis de suelos | 44 |
| 4.2.4.3 | Validación del modelo BUDGET | 45 |
| 4.2.5 | Determinación del flujo subterráneo..... | 45 |
| 4.2.5.1 | Monitoreo del nivel freático | 45 |
| 4.2.5.2 | Monitoreo del caudal de manantiales agua..... | 47 |
| 4.2.6 | Determinación de la calidad de agua para riego..... | 47 |
| 4.2.7 | Relación de la dinámica del flujo superficial y subterráneo con los requerimientos de agua del cultivo de la quinua | 49 |
| 4.2.7.1 | Balance hídrico del suelo | 49 |
| 4.2.7.2 | Propuesta de riego..... | 52 |
| 5 | RESULTADOS Y DISCUSION..... | 53 |
| 5.1 | Situación social de la comunidad de Mejillones | 53 |
| 5.1.1 | Demografía | 53 |
| 5.1.2 | Ubicación | 53 |
| 5.1.3 | Autoridades..... | 53 |
| 5.1.3.1 | Corregidor | 53 |
| 5.1.3.2 | Agente comunal | 53 |
| 5.1.4 | Organizaciones de la Población..... | 54 |
| 5.1.5 | Empleo y Migración..... | 54 |
| 5.1.6 | Tenencia y Acceso a la Tierra..... | 55 |
| 5.1.7 | Uso y ocupación del suelo | 55 |
| 5.1.7.1 | Agricultura | 56 |
| 5.1.7.2 | Ganadería | 56 |
| 5.1.8 | Sistemas de producción..... | 57 |
| 5.1.9 | Educación | 59 |
| 5.2 | Parámetros físicos de la cuenca | 59 |
| 5.2.1 | Área y perímetro | 59 |
| 5.2.2 | Factor de forma..... | 61 |
| 5.2.3 | Índice de compacidad (Índice de Gravelious) | 61 |
| 5.2.4 | Rectángulo equivalente..... | 61 |
| 5.3 | Geomorfología de la cuenca | 63 |
| 5.3.1 | Geología | 63 |
| 5.3.2 | Relieve y topografía | 63 |
| 5.3.3 | Suelo..... | 64 |
| 5.4 | Dinámica del flujo de agua superficial..... | 66 |
| 5.5 | Dinámica del flujo de agua subsuperficial | 68 |
| 5.5.1 | Validación del programa BUDGET..... | 68 |
| 5.5.2 | Monitoreo de la humedad en parcelas de quinua | 72 |
| 5.5.3 | Monitoreo de la humedad de suelo en parcelas en descanso | 77 |
| 5.5.4 | Conductividad eléctrica y pH del suelo | 84 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.6 | Dinámica del flujo de agua subterránea..... | 85 |
| 5.6.1 | Monitoreo del nivel freático | 85 |
| 5.6.2 | Monitoreo del caudal del manantial M3..... | 87 |
| 5.7 | Calidad de agua para riego..... | 88 |
| 5.7.1 | Potencial de hidrogeniones..... | 88 |
| 5.7.2 | Conductividad Eléctrica..... | 89 |
| 5.7.3 | Infiltración..... | 91 |
| 5.7.4 | Toxicidad de iones | 93 |
| 5.7.4.1 | Sodio..... | 93 |
| 5.7.4.2 | Cloro | 94 |
| 5.7.4.3 | Boro | 95 |
| 5.7.5 | Sólidos disueltos | 97 |
| 5.7.6 | Dureza | 98 |
| 5.7.7 | Riesgos de obturación | 99 |
| 5.8 | Relación del flujo superficial y subterráneo con los requerimientos hídricos del cultivo de la quinua | 102 |
| 5.8.1 | Balance hídrico del suelo | 102 |
| 5.8.1.1 | Parcelas de quinua | 102 |
| 5.8.1.2 | Parcelas en descanso..... | 103 |
| 5.8.2 | Propuesta de riego..... | 104 |
| 6 | CONCLUSIONES..... | 107 |
| 7 | RECOMENDACIONES | 110 |
| 8 | BIBLIOGRAFIA | 111 |

INDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Rangos de área diferenciales para diferentes unidades hidrográficas..... | 6 |
| Cuadro 2. Principales especies vegetales de la Mancomunidad de Los López..... | 33 |
| Cuadro 3. Parámetros empleados para realizar la simulación del contenido de agua en el suelo | 45 |
| Cuadro 4. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo del nivel freático..... | 46 |
| Cuadro 5. Parámetros evaluados para determinar la calidad de agua de riego ... | 49 |
| Cuadro 6. Caudales del río Quetena registrados en el periodo 06/07 | 67 |
| Cuadro 7. Grado de correlación entre la humedad observada y simulada de parcelas de quinua | 70 |
| Cuadro 8. Grado de correlación entre la humedad observada y simulada de parcelas en descanso | 72 |
| Cuadro 9. Estados de humedad del suelo en parcelas de quinua | 73 |
| Cuadro 10. Promedios de humedad de suelo de parcelas de quinua..... | 75 |
| Cuadro 11. Densidad aparente y textura de suelo a diferentes profundidades en parcelas de quinua | 75 |
| Cuadro 12. Precipitación (PP), evapotranspiración real (ETr) y humedad de suelo en parcelas de quinua | 77 |
| Cuadro 13. Estados de humedad del suelo de parcelas en descanso | 78 |
| Cuadro 14. Promedios de humedad de suelo de parcelas en descanso | 80 |
| Cuadro 15. Densidad aparente y textura de suelo a diferentes profundidades en parcelas en descanso | 81 |
| Cuadro 16. Precipitación (PP), evapotranspiración real (ETr) y humedad de suelo (H°S°) de parcelas en descanso | 82 |
| Cuadro 17. Conductividad eléctrica del suelo de parcelas de quinua y parcelas en descaso | 84 |
| Cuadro 18. pH del suelo de parcelas de quinua y parcelas en descaso..... | 85 |
| Cuadro 19. Niveles freáticos registrados en dos pozos de agua | 86 |
| Cuadro 20. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base al pH..... | 88 |

| | |
|---|----|
| Cuadro 21. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base al pH..... | 89 |
| Cuadro 22. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base a la CE | 90 |
| Cuadro 23. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base a la CE | 91 |
| Cuadro 24. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base a la CE y al RAS..... | 91 |
| Cuadro 25. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base a la CE al RAS | 92 |
| Cuadro 26. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base al contenido de sodio | 93 |
| Cuadro 27. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base al contenido de sodio | 94 |
| Cuadro 28. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base al contenido de cloro | 94 |
| Cuadro 29. Clasificación de agua para riego correspondiente julio en base al contenido de cloro | 95 |
| Cuadro 30. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base al contenido de boro..... | 96 |
| Cuadro 31. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base al contenido de boro..... | 96 |
| Cuadro 32. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base a los sólidos disueltos | 97 |
| Cuadro 33. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base a los sólidos disueltos | 98 |
| Cuadro 34. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base a los grados hidrométricos franceses..... | 98 |
| Cuadro 35. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base a los grados hidrométricos franceses..... | 99 |

| | |
|---|-----|
| Cuadro 36. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en función al peligro de obturación | 100 |
| Cuadro 37. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en función al peligro de obturación | 101 |
| Cuadro 38. Balance hídrico del suelo de parcelas de quinua | 103 |
| Cuadro 39. Balance hídrico del suelo de parcelas en descanso | 104 |
| Cuadro 40. Requerimientos hídricos del cultivo de la quinua | 105 |
| Cuadro 41. Relación entre la oferta de agua y demanda de agua..... | 105 |

INDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1. | Esquema de la metodología aplicada durante el trabajo de investigación | 36 |
| Figura 2. | Digitalización del cauce de ríos y delimitación de la cuenca sobre la imagen satelital Landsat 6 ETM | 37 |
| Figura 3. | Ubicación de los puntos de muestreo del suelo | 43 |
| Figura 4. | Ubicación de los puntos de muestreo de las fuentes de agua | 48 |
| Figura 5. | Área y perímetro de la cuenca digitalizado sobre un imagen satelital 6 ETM..... | 60 |
| Figura 6. | Transformación de la cuenca en un rectángulo equivalente | 62 |
| Figura 7. | Comparación del caudal del río Quetena con la precipitación | 67 |
| Figura 8. | Simulación de la humedad de suelo de 8 parcelas de quinua | 69 |
| Figura 9. | Simulación de la humedad de suelo de 6 parcelas en descanso | 71 |
| Figura 10. | Fluctuaciones de la humedad del suelo de parcelas de quinua | 73 |
| Figura 11. | Comportamiento de la humedad en el perfil del suelo de parcelas de quinua | 74 |
| Figura 12. | Efecto del medio ambiente y del cultivo sobre la humedad de suelo en parcelas de quinua | 76 |
| Figura 13. | Fluctuaciones de la humedad de suelo de parcelas en descanso | 78 |
| Figura 14. | Comportamiento de la humedad en el perfil del suelo de parcelas en descanso..... | 79 |
| Figura 15. | Efecto del medio ambiente sobre la humedad de suelo de parcelas en descanso..... | 82 |
| Figura 16. | Comparación de la humedad de suelo entre parcelas de quinua y parcelas en descanso | 83 |
| Figura 17. | Comportamiento del nivel freático en dos pozos de agua..... | 86 |

RESUMEN

La agricultura en el altiplano enfrenta condiciones muy desfavorables, como el déficit hídrico, heladas y granizadas, suelos muy pobres y salinidad de los recursos hídricos. A pesar de esto, la quinua se desarrolla en estas condiciones, ya que se trata de un cultivo tolerante y resistente a la sequía, a heladas y al estrés salino. Por esta razón la quinua se constituye en un cultivo fundamental para la economía de muchas familias campesinas del sudoeste de Potosí.

Una de las grandes limitantes de la productividad de la quinua, es la poca disponibilidad de agua en el suelo, causada por el permanente déficit hídrico de la zona, a esto se suma la falta de cultura de riego por parte de los agricultores y las reducidas fuentes de agua.

Por esta razón el presente trabajo de investigación tiene por objeto evaluar los recursos hídricos de la subcuenca del río Grande de Lipez del altiplano sur con fines de aplicación de riego.

El trabajo de investigación se realizó en la Comunidad de Mejillones, de la provincia Enrique Baldivieso del departamento de Potosí, durante el periodo 06/07 (noviembre-julio). Se determinó las características físicas de la cuenca, el comportamiento del flujo de agua con el monitoreo del caudal del río Quetena, la humedad de suelo de parcelas de quinua y parcelas en descanso y del nivel freático. También se determinó la calidad de agua para riego y finalmente se relacionó el flujo de agua con los requerimientos hídricos del cultivo de la quinua.

Los resultados obtenidos, bajo las condiciones en las que se efectuó el estudio son:

La unidad fisiográfica estudiada se clasifica como una subcuenca por presentar un área menor a 50 km², presenta una forma alargada y la probabilidad de ser cubierta en su totalidad por una tormenta es reducida, afectando el comportamiento de los ríos y la humedad del suelo.

Geológicamente la cuenca esta compuesta de por rocas sedimentarias del terciario y del cuaternario. Forma parte de las provincias geográficas de la cordillera Occidental, conformada por montañas y serranías medias con pendientes entre 15 a 60%. Cordillera del Altiplano, formado por superficies de erosión (planicies) y llanuras aluviales con pendientes entres 2 a 5 %. Presenta 4 unidades de suelo: Consociación Leptosoles, consociación Leptosoles con inclusión Regosoles, consociación Cambiosoles y Calcisoles-Fluviosoles.

La zona esta formada por aguas superficiales con corrientes efímeras que son reguladas por la precipitación, ya que su cause se llena de agua solo cuando llueve o inmediatamente después; y aguas superficiales permanentes reguladas por las aguas subterráneas, como es el caso del río Quetena que lleva un caudal promedio de 1565 l/s durante todo el año.

La humedad del suelo (flujo subsuperficial) tanto en parcelas de quinua y parcelas en descanso presenta grandes fluctuaciones. Su contenido de agua se hallan por debajo de la fracción agua fácilmente aprovechable (AFA) e incluso en algunos casos por debajo de la humedad a punto de marchitez permanente, debido a precipitaciones bajas y suelos con capacidad de almacenamiento de agua muy reducido (textura franco arenosa). Por tal razón las parcelas de quinua sufrieron estrés hídrico en todo este periodo.

A 10 centímetros de profundidad del suelo y en la época húmeda se registra la mayor variación de la humedad, como efecto de la de la precipitación y la evapotranspiración, pero este efecto disminuye con la profundidad del suelo.

El mayor almacenamiento de agua en el perfil del suelo se registra entre los 60 y 90 centímetros, siendo menor a 10 centímetros, como efecto de la evapotranspiración.

El comportamiento de la humedad del suelo se halla influenciado por la precipitación, ya que los mayores niveles de agua en el suelo se presentan en la

época húmeda, en la época seca se halla influenciada por la regulación del agua subterránea, que realiza aportes al suelo. Otro factor de influencia es la evaporación del agua de la superficie del suelo y el consumo de agua por parte del cultivo.

El flujo de agua subterránea que se está utilizando ahora, depende de la recarga de los acuíferos suscitados hace 10000 años. La recarga de los acuíferos en la actualidad con agua proveniente de las precipitaciones es muy débil o casi inexistente. Por lo que estas pueden ser clasificadas como aguas fósiles y como un recurso no renovable.

Las vertientes de de agua MA1, MA2 y MA3 presentan corrientes de muy escaso caudal, pero con flujos de agua permanente, el mayor caudal corresponde a la vertiente MA3 con un caudal de 0,9 l/s.

Las fuentes de agua de esta zona: ríos, vertientes, manantiales, humedad del suelo, etc. son básicamente regulados por las aguas subterráneas.

Respecto a la calidad del agua para riego, las muestras RQ, P1 y P2 no son recomendables para riego por su elevada concentración de sales e iones tóxicos (sodio, cloro y boro). Siendo recomendable para el riego las fuentes de agua M1, M2 y M3.

Por lo mencionado anteriormente la fuente de agua M3, es considerada como una fuente de agua para riego potencial, por presentar una buena calidad de agua y un caudal constante de 0,9 l/s aproximadamente.

Tanto en parcelas de quinua y parcelas en descanso se advierte un marcado déficit hídrico, causado por las bajas precipitaciones y por la elevada evapotranspiración. Esto explicaría en parte los rendimientos bajos de la quinua en esta región del país.

SUMMARY

The agriculture in the highland faces very unfavorable conditions, as the deficit hídrico, icy and hailstorms, very poor floors and salinity of the resources hídricos. To pass of this, the quinua is developed under these conditions, since it is from a tolerant and resistant cultivation to the drought, to icy and to the saline estrés. For this reason the quinua is constituted in a fundamental cultivation for the economy of rural many families of the Southwest of Potosí.

One of the big obstacles of the productivity of the quinua, is the little readiness of water in the floor, caused by the permanent deficit hídrico of the area, to this he/she sinks the lack of watering culture on the part of the farmers and the reduced water fountains.

For this reason the present investigation work has for object to evaluate the resources hídricos of the subcuenca of the Big river of Lípez of the south highland with ends of watering application.

The investigation work was carried out in the Community of Mussels, of the county Enrique Baldivieso of the department of Potosí, during the period 06/07 (November-July). The physical characteristic of the basin, the behavior of the flow of water with the monitoreo of the flow of the river was determined Quetena, the humidity of floor of quinua parcels and parcels in rest and of the phreatic level. The quality of water couple watering was also determined and finally he/she was related the flow of water with the requirements hídricos of the cultivation of the quinua.

The obtained results, under the conditions in those that you makes the study are:

The unit studied fisiográfica is classified like a subcuenca to present a smaller area to 50 km², presents a lengthened form and the probability of being covered in its entirety by a storm it is reduced, affecting the behavior of the rivers and the humidity of the floor.

Geológicamente the basin this made up of for sedimentary rocks of the tertiary and of the quaternary one. It is part of the geographical counties of the Western mountain range, conformed by mountains and serranías stockings with slopes among 15 to 60%. Mountain range of the Highland, formed by erosion (plains) surfaces and alluvial plains with slopes enters 2 to 5%. It presents 4 soil units: Consociación Leptosoles, consociación Leptosoles with inclusion Regosoles, consociación Cambiosoles and Calcisoles-Fluvisoles.

The area this formed since by superficial waters with ephemeral currents that are regulated by the precipitation, their it causes you full with alone water when it rains or immediately later; and superficial permanent waters regulated by the underground waters, like it is the case of the river Quetena that takes a flow average of 1565 l/s during the whole year.

The humidity of the so much floor (flow subsuperficial) in quinoa parcels and parcels in rest presents big fluctuations. Their content of water is below the fraction it dilutes easily profitable (AFA) and even in some cases below the humidity about to permanent marchitez, due to low precipitations and floors with capacity of very reduced (sandy texture franc) storage of water. For such a reason the quinoa parcels suffered estrés hídrico in this whole period.

To 10 centimeters deep of the soil and in the humid time he/she registers the biggest variation in the humidity, as effect of that of the precipitation and the evapotranspiración, but this effect diminishes with the depth of the floor.

The biggest storage of water in the profile of the floor registers between the 60 and 90 centimeters, being smaller to 10 centimeters, as effect of the evapotranspiración.

The behavior of the humidity of the floor is influenced by the precipitation, since the greater levels of water in the floor show up in the humid time, in the time he/she dries off it finds influenced by the regulation of the underground water that he/she

carries out contributions to the floor. Another influence factor is the evaporation of the water of the surface of the floor and the consumption of water on the part of the cultivation.

The flow of underground water that is using now, depends on the recharge of the aquifers had raised for 10000 years. The recharge of the aquifers at the present time with water coming from the precipitations it is very weak or almost nonexistent. For that that these they can be classified as waters fossils and as a non renewable resource.

The slopes of of water MA1, MA2 and MA3 present currents of very scarce flow, but with flows of permanent water, the biggest flow corresponds pouring MA3 with a flow of 0,9 l/s.

The water fountains of this area: rivers, slopes, springs, humidity of the floor, etc. they are basically regulated by the underground waters.

Regarding the quality of the water for watering, the samples RQ, P1 and P2 are not advisable for watering for their high concentration of salts and toxic (sodium, chlorine and boron) ions. Being advisable for the watering the water fountains M1, M2 and M3.

For that mentioned the water fountain previously M3, it is considered as a water fountain for potential watering, to present a good quality of water and a constant flow of 0,9 l/s approximately.

So much in quinoa parcels and parcels in rest a marked deficit hídrico is noticed, caused by the drops precipitations and for the high evapotranspiración. This would explain the low yields of the quinoa partly in this region of the country

1 INTRODUCCIÓN

Bolivia es un país que cuenta con grandes recursos hídricos, superficiales y subterráneos, que son aprovechados en una escala muy pequeña. La agricultura es la actividad que demanda mayor cantidad de agua, se estima que las actividades agropecuarias consumen el 85% del total de agua consumida.

Por otro lado la agricultura en el Altiplano enfrenta condiciones climáticas adversas, tales como el déficit hídrico durante la mayor parte del año, heladas y granizadas muy frecuentes, suelos pobres y salinidad de los recursos hídricos. Esta situación conduce a una agricultura de subsistencia y provoca migración masiva a las ciudades y a otras zonas que ofrecen mejores perspectivas de vida.

El Sudoeste de Potosí es una zona que presenta condiciones climáticas adversas reflejadas en un permanente déficit hídrico, como consecuencias de las diferencias entre la precipitación y la evaporación, es una zona muy árida que generalmente recibe un promedio de 130 mm por año.

La quinua se constituye en uno de los principales cultivos de esta zona, por su alta tolerancia y resistencia a la sequía, a heladas y al estrés salino. Incluso puede producir con niveles de agua muy bajas como 150 mm/ciclo. Sin embargo, este alto nivel de resistencia se traduce en fuertes reducciones del rendimiento, siendo menores a 600 kg/ha por año.

Sin embargo la producción de quinua es fundamental para la economía de muchas comunidades campesinas, de la que dependen más de 4200 familias, la misma se destina al autoconsumo familiar y a la comercialización en los mercados internacionales mediante asociaciones conformadas y en cantidades menores al interior de Bolivia.

En la actualidad la producción de quinua, se lleva adelante bajo un sistema a secano, en parte porque los agricultores no tienen una cultura de riego y por que las zonas de cultivo cuentan con muy pocas fuentes de agua que pueden ser usadas como riego.

A pesar de los estudios existentes sobre los recursos hídricos del Sudoeste de Potosí, son de carácter general, vinculados a estudios más amplios y poco relevantes. Lamentablemente la mayoría de estos estudios no aportan datos científicos destinados a la utilización de estos recursos como fuente de riego para el cultivo de la quinua. Siendo que una gran limitante para la producción de quinua es la poca disponibilidad de agua en el suelo.

Por esta razón el presente trabajo pretende realizar un estudio de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de esta zona, que, permita conocer la calidad y cantidad de estos recursos en diferentes épocas del año y de esta manera determinar si estas aguas pueden ser utilizadas como fuente de riego en el cultivo de la quinua. La quinua es un cultivo potencial para la zona, a pesar de las malas condiciones climáticas limitantes, por ende la aplicación de riego contribuiría a mejorar los rendimientos y de esta manera mejorar las condiciones de vida de las comunidades del altiplano sur.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Evaluar el potencial de los recursos hídricos de la subcuenca del río grande de Lípez del altiplano sur con fines de aplicación de riego deficitario en el cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa W.*).

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar los parámetros físicos de la cuenca.
- Definir la dinámica del flujo superficial y subterráneo del agua en el área de estudio.
- Evaluar la calidad del agua para riego.
- Relacionar la dinámica del flujo superficial y subterráneo con los requerimientos de agua del cultivo de la quinua.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Recursos hídricos

Según Custodio y Llamas citado por Peña (1994) los recursos hídricos de una región, son el volumen de agua que dispone la población de dicha región en un determinado periodo de tiempo. Este término comprende las reservas hidráulicas de la cuenca tanto de origen superficial como subterráneo.

Los recursos hídricos son útiles para el consumo humano, riego, energía, transporte, pesquería, turismo, etc. Consiguientemente, en caso de limitaciones, su empleo para uno de estos fines, puede reducir su uso para otros (ZONISIG, 2001).

2.1.1 Recursos hídricos de Bolivia

Conforme a Montes de Oca (1992) Bolivia es un país que cuenta con grandes recursos hídricos, superficiales y subterráneos. Los recursos hídricos superficiales que se forman en la cordillera de los Andes forman parte de tres grandes cuencas con ríos caudalosos, muchos de los cuales son navegables. Lagos y lagunas esparcidas por todo el territorio completan el marco de estos recursos. Los recursos hídricos subterráneos siguen en general la configuración de las cuencas superficiales.

Bolivia pertenece a tres grandes cuencas hidrográficas: la cuenca del Amazonas, la cuenca del río de La Plata y la cuenca Endorreica o Cerrada del Altiplano. Esta división generalmente es adoptada en la mayoría de los libros generales sobre el tema (Van, 2002).

2.1.2 Recursos hídricos del altiplano sur

El departamento Potosí pertenece a tres cuencas hidrográficas: Cuenca del Amazonas, Cuenca del Plata y Cuenca Central o Lacustre. En la Cuenca Central se encuentran los ríos Pucamayú, Río Grande de Lípez, Kollpamayú, Quetena, Potrero, Pucara, Cancosa, Aguadillas, Salado Márquez y Mulatos.

La cuenca endorreica o cerrada del Altiplano se subdivide en muchas subcuencas, donde algunos de sus ríos vierten sus aguas en el salar de Uyuni, como el río Grande de Lípez que nace en las montañas de San Antonio de Lípez y Nuevo Mundo y se forma a partir de una serie de manantiales, pero también recibe las aguas de otros ríos (PDM de San Agustín, 2004)

Los ríos presentes en la Mancomunidad de los Lípez en su mayoría son de carácter temporal y de muy escaso caudal, producto de la extrema aridez del clima en la región, sin embargo, existen manantiales que permiten que algunos cursos de agua tengan caudal permanente. Los únicos cursos de agua de importancia son aquellas pertenecientes a la subcuenca del río Quetena, que se origina dentro de la reserva y fluye en dirección norte, estas aguas son permanentes, tienen buena calidad físico-química y dan origen a bofedales de gran importancia para la ganadería camélida de esta zona de la mancomunidad de los Lípez (PEDEL, 2004)

Estudios realizados por el SERGEOMIN (2001) revelan la íntima relación entre aguas superficiales y aguas subterráneas, que definen en cierto modo las características hidrológicas de la región; es decir, que la formación de lagunas bofedales en la superficie terrestre dependen del aporte de las aguas subterráneas, Por ejemplo toda el agua que fluye en la cuenca de Laguna Verde-Provincia Sud Lípez es de origen subterráneo que aflora a la superficie mediante manantiales o flujo subsuperficial.

2.1.3 Uso agrícola del agua en Bolivia

El uso agrícola del agua como su empleo por medio de sistemas de riego, en nuestro país es de limitado aprovechamiento. Se estima que el 2003 en Bolivia existían 1.800.000 ha de tierra cultivadas de las cuales tenían riego unas 226.564 Ha la mayoría bajo el sistema de micro riego y generalmente organizado bajo el control de comunidades o asociaciones campesinas.

Montes de Oca (2005) menciona que la mayoría de las tierras regadas, están ubicadas en las regiones áridas y semiáridas del altiplano, cabeceras de valles y valles. De un modo general las prácticas de riego en la parte andina son deficientes y la mayoría de los agricultores utilizan métodos primitivos de producción con poco uso de insumos agrícolas modernos. La utilización del agua y las prácticas de manejo de los suelos, son mal comprendidas y aplicadas, lo que ocasiona bajos rendimientos y retornos económicos limitados

El mayor consumidor de agua en Bolivia es la agricultura bajo riego. El riego es una actividad de alto consumo de agua (>80%), más importante que los usos urbanos (Van, 2002)

2.2 Cuenca Hidrológica

Villón, (2002) define a una cuenca hidrológica como un área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida para cada punto de su recorrido.

La delimitación de una cuenca se hace sobre un plano o mapa a curvas de nivel a escala 1:50000, siguiendo las líneas del *divortium acuarum* (parteaguas), es una línea imaginaria, que dividen las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, que en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parte aguas esta formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida, llamado estación de aforo.

Con el fin de establecer grupos de cuencas, se estudia una serie de características físicas en cada cuenca, entre las que se tiene: superficie, topografía, altitudes características, geología, suelos y cobertura.

2.2.1 Superficie de la cuenca

De acuerdo a Villón (2002) la superficie de la cuenca se refiere al área proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular, se obtiene después de delimitar la cuenca.

Según Vásquez *et al.* (s.f.) los rangos de área referenciales para las diferentes unidades hidrográficas, se pueden observar en el cuadro 1.

Cuadro 1. Rangos de área diferenciales para diferentes unidades hidrográficas

| Unidad hidrográfica | Área (ha) |
|----------------------------|------------------|
| Cuenca | 50 000 – 800 000 |
| Subcuenca | 5 000 – 50 000 |
| Microcuenca | < 5 000 |

A su vez Villón (2002) señala que una cuenca se puede clasificar atendiendo a su tamaño. Una cuenca, para fines prácticos, se considera grande, cuando el área es mayor de 250 km², y b) cuenca pequeña, es aquella cuenca que responde a las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración, y en la cual las características físicas (tipo de suelo, vegetación) son más importantes que las del cauce. Se considera cuenca pequeña aquella cuya área varíe desde unas pocas hectáreas hasta un límite, que para propósitos prácticos, se considera 250 km².

2.2.2 Perímetro de la cuenca

Según Villón (2002) el perímetro de la cuenca se refiere al borde de la forma de la cuenca proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular, se obtiene después de delimitar la cuenca.

2.2.3 Índice o factor de forma de una cuenca

Conforme a Villón (2002) el índice o factor de forma de una cuenca expresa la relación, entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud.

2.2.4 Índice de compacidad (índice de Gravelious)

Villón (2002) menciona que el índice de compacidad de una cuenca, definida por Gravelious, expresa la relación entre el perímetro equivalente de una superficie equivalente de una circunferencia, que tiene la misma área que la cuenca.

2.2.5 Rectángulo equivalente

Según Villón (2002) el rectángulo equivalente es una transformación geométrica, que permite representar a la cuenca, de su forma heterogénea, con la forma de un rectángulo que tiene la misma área y perímetro, e igual distribución de terreno, en cuanto a sus condiciones de cobertura. En este rectángulo, las curvas de nivel se convierten en rectas paralelas al lado menor, siendo estos lados, la primera y última curva de nivel.

2.2.6 Perfil Longitudinal del Curso de Agua

Vásquez *et al.* (s.f.) señala que perfil longitudinal del curso de agua es una curva que representa la relación entre la altitud y la longitud del curso principal. El perfil longitudinal del río es muy importante, porque permite conocer su pendiente en diferentes tramos de su recorrido.

2.3 El ciclo hidrológico

Conforme a Villón (2002) se denomina ciclo hidrológico, al conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.)

Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre, ríos, lagos y mares, se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor resultante es transportado por las masas de aire en movimiento. En determinadas condiciones, el vapor se condensa formando las nubes, que a su vez, pueden ocasionar precipitaciones que caen a la tierra. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse, o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes, o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora

nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otras formas grandes de masa de agua como los lagos. El agua que se infiltra satisface la humedad del suelo y abastece los depósitos subterráneos, de donde puede fluir hacia las corrientes de los ríos, o bien descargar en los océanos; la que queda detenida en la capa vegetal del suelo es regresada a la atmósfera por transpiración (Villón, 2002).

2.4 Recursos hídricos superficiales

Según Vásquez *et al.* (s.f.) las aguas superficiales son todas las aguas que fluyen sobre la superficie de la tierra formando cursos o corrientes. Proviene directamente de la escorrentía superficial que fluye o circula por el subsuelo. En el primer caso son los ríos, quebradas y lagunas. En el segundo caso, los manantiales.

A su vez Montes de Oca (1992) señala que las aguas superficiales comprenden un complejo sistema de ríos, lagos, lagunas, humedales y otros cuerpos de agua. Los recursos hídricos superficiales de una determinada región provienen de la precipitación pluvial caída en su cuenca de alimentación y de los manantiales.

La evaluación de las aguas superficiales está referida a determinar la cantidad y calidad del agua en una cuenca o microcuenca. La cantidad implica calcular o estimar los caudales de los ríos y su variabilidad o régimen en el tiempo; y la calidad se refiere a determinar la aptitud del agua para diversos fines (Vásquez *et al.*, s.f.).

También señala que el caudal, es definido como el volumen del flujo de agua de una corriente por unidad de tiempo, $Q = V/t$, es la principal variable que caracteriza a las aguas superficiales. Se expresa en m^3/s ó l/s .

Medición del caudal

Según Vásquez *et al.* (s.f.) la medición del caudal de un río se denomina aforo. Por su parte Villón (2002) menciona que aforar una corriente significa determinar a través de mediciones, el caudal que pasa por una sección dada y en un momento dado

Existen diversos métodos, para determinar el caudal de una corriente de agua, cada uno aplicable a diversas condiciones, según el tamaño de la corriente o según la precisión con que se requieran los valores obtenidos. Los métodos mas utilizados son: Aforo con flotadores, volumétricos, químicos, con vertederos, con cronómetro molinete y con medidas de la sección y la pendiente (Villón, 2002).

El aforo con molinete se fundamenta en determinar la velocidad de las aguas en puntos transversales de un río. Se llaman molinetes hidráulicos, los que miden mecánicamente la velocidad de la corriente de agua. Estos instrumentos están sumergidos y son los más utilizados en la actualidad para realizar aforos directos en canales o ríos (Custodio y Llamas, citado por Peña, 1994).

2.5 Recursos hídricos subterráneos

Por agua subterránea se entiende el agua que ocupa todos los vacíos dentro el estrato geológico, comprende toda el agua que se encuentra por debajo del nivel freático (Villón, 2002).

Los recursos hídricos subterráneos dependen fundamentalmente de las características sedimentológicas de los acuíferos, de sus características hidrodinámicas y de las condiciones de recarga y descarga.

Montes de Oca (2005) menciona que en el país existe gran disponibilidad de agua subterránea de buena calidad, que constituyen un recurso potencial par el

abastecimiento de agua con fines de dotación de agua a poblaciones, para riego e industria, que al presente solo se las aprovechan en mínima cantidad.

La recarga principal de los acuíferos se produce por acción de las aguas meteóricas y los ríos que drenan la zona. La descarga del acuífero se produce por flujo de manantiales, en muchos casos en forma surgente y en la mayoría mediante flujo subsuperficial formando ríos, bofedales o lagunas.

2.5.1 Acuífero

Según Villón (2002), es la parte saturada del perfil del suelo y que tiene la facilidad de almacenar y transmitir el agua

En la hidrología subterránea, se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas (Custodio y Llamas, citado por Peña, 1994).

Villón (2002) clasifica a los acuíferos de la siguiente manera:

2.5.1.1 Acuífero libre

Un acuífero libre, llamado también acuífero freático o capa freática, es una formación permeable saturada limitada en su parte inferior por una capa impermeable. El límite superior está formado por la tabla de agua, la que reencuentra en equilibrio con la presión atmosférica. El agua en un acuífero libre se llama agua freática o libre.

2.5.1.2 Acuífero confinado

Un acuífero confinado es una formación permeable completamente saturada de agua y cuyos límite superior e inferior son capas impermeables. En los acuíferos confinados, la presión del agua en ellos, es generalmente mayor que la

atmosférica, por tal razón, el agua en pozos que penetran en tales acuíferos permanecen por encima del nivel superior de las capas permeables. El agua de un acuífero confinado se denomina agua confinada o agua artesisiana.

2.5.1.3 Acuífero semiconfinado

Un acuífero semiconfinado es una formación permeable saturada, cuyo límite superior esta constituido por una capa semipermeable y cuyo límite inferior puede ser una capa impermeable o semipermeable. En la capa superior se encuentra la tabla de agua, cuya altura difiere a menudo a la carga piezométrica y al agua confinada en la capa permeable. En esos acuíferos para la obtención de la superficie piezométrica se utilizan los piezómetros.

2.5.1.4 Acuífero semilibre

El acuífero semilibre es en realidad una formación casi semiconfinada, en el cual la conductividad hidráulica de la capa semipermeable (grano fino) es tan grande que la componente horizontal de flujo de esta capa no puede ser despreciable. Esta tipo de acuífero es una forma intermedia entre el tradicional, acuífero semiconfinado y el acuífero libre.

2.5.2 Pozo

Según Duque (s.f.) un pozo es una perforación o excavación cuasivertical o vertical, que corta la zona de agua freática. Un pozo artesisiano se da donde el agua captada a profundidad se encuentra a una presión hidráulica suficiente para obligarla a subir hasta rebasar la superficie del terreno.

2.5.3 Medida del nivel freático

Se lleva a efecto haciendo uso de una cinta métrica graduada con un dispositivo en la parte inferior que produzca un sonido o una luz al tocar el agua.

La frecuencia de observación dependerá de la variación que presenten los niveles del manto freático según sea la recarga. Sin embargo, como es una labor que requiere de personal y tiempo, se acostumbra llevarla a efecto una vez por mes, y dentro del mismo periodo de días. Estos datos deben obtenerse de modo que sean lo más preciso posibles, evitando, en el momento de ejecutar la lectura, alguna influencia de carácter local que los altere, como por ejemplo precipitaciones o extracciones de agua (De la Peña, citado por Peña, 1994).

2.6 Balance hídrico del suelo

Según Aidarov *et al.* (1985) el balance hídrico del suelo es la expresión cuantitativa del conjunto de formas de entrada de la humedad al suelo, su gasto y la variación de las reservas de humedad. El balance de humedad del suelo se realiza para una capa de suelo determinada en un intervalo de tiempo determinado. Con frecuencia, dicho balance se realiza para una hectárea y se expresa en m³/ha o en mm de la capa de agua.

Los componentes de entrada son: La precipitación atmosférica, la afluencia de las aguas superficiales desde un lado, la absorción capilar por parte de las aguas subterráneas, la condensación de la humedad en forma de vapor que provienen de la atmósfera. Los componentes de gasto son: el escurrimiento de las aguas superficiales, la evaporación de la superficie del suelo, la toma de la humedad para la transpiración de las plantas y la infiltración de una parte de la humedad.

2.6.1 Precipitación

Vázquez *et al.* (s. f.) menciona que la precipitación es toda forma de agua cuyo origen está en las nubes, y cae a la superficie terrestre en forma de lluvia, granizo y nieve. En hidrología, el tipo de precipitación de mayor importancia es la lluvia, por lo cual es la variable de entrada más significativa en el sistema hidrológico.

La precipitación se mide en términos de la altura de la lámina de agua (hp), y se expresa comúnmente en milímetros. Esta altura de lámina de agua, indica la altura de agua que se acumularía en una superficie horizontal, la precipitación permaneciera donde cayó. Los aparatos de medición se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en su parte superior, en el cual se recoge el agua producto de la lluvia u otro tipo de precipitación, registrando su altura. Los aparatos de medición, se clasifican de acuerdo con el registro de las precipitaciones, en pluviómetros y pluviógrafos (Villón, 2002).

2.6.2 Escurrimiento

Por su parte Villón (2002) define al escurrimiento, como el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre, y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca

Según el ZONISIG (2001) el escurrimiento es la parte de la precipitación que no infiltra en el suelo, pero es descargada directamente al río de modo superficial. La parte que se infiltra se llama la precipitación efectiva.

2.6.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración incluye dos procesos distintos por el cual se pierde agua; una de carácter físico y otra de carácter fisiológico, que son la evaporación de agua del suelo y la transpiración de la plantas (Allen *et al.*, 2006).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir estos dos procesos. En la primera etapa del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte al proceso principal (Allen *et al.*, 2006)

Dentro este concepto general de evapotranspiración, se puede distinguir dos conceptos: la evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o) y la evapotranspiración del cultivo ET_c.

2.6.3.1 Evaporación de referencia (ET_o)

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración de referencia y se denomina ET_o. La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0.23. Los únicos factores que afectan ET_o son los parámetros climáticos, por lo tanto pueden ser calculado a partir de datos metereológicos sin considerar las características del cultivo, ni los factores del suelo (Allen *et al.* 2006).

2.6.3.2 Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

Allen *et al.* (2006) señala que las necesidades de agua del cultivo se refiere a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración.

La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith. Debido a que todavía existe una considerable falta de información para los diferentes cultivos, el método Penman-monteith se utiliza solo para la estimación la tasa de evaporación del cultivo de referencia (ET_o). La relación ET_c/ET_o puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como coeficiente de cultivo (K_c), y se utiliza para relacionar ET_c y ET_o de manera que $ET_c = K_c \times ET_o$.

2.6.3.3 Coeficiente de cultivo (Kc)

Los efectos combinados de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo se integran en el coeficiente de cultivo. El coeficiente Kc incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo. Para la planificación normal del riego y propósito de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, los coeficientes promedios del cultivos son apropiados y mas convenientes que los valores de Kc calculados con base diaria usando coeficientes separados de cultivo y suelo (Allen *et al.* 2006)

2.6.4 Agua en el suelo

2.6.4.1 Agua disponible total

Según Allen *et al.* (2006) debido a que contenidos de humedad por encima de capacidad de campo no pueden ser retenidos en contra de la fuerzas de gravedad y son drenados y debido a que contenido de humedad por debajo del punto de marchitez permanente no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas, el total de agua disponible en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La lamina ADT representa la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona radicular.

Por otro lado Shaxson y Barber (2005) mencionan que a cantidad máxima de agua disponible que puede retener un suelo (o sea la capacidad de agua disponible) varía con la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la profundidad de enraizamiento y la estructura. La materia orgánica del suelo es particularmente importante ya que puede retener agua cerca de 20 veces su peso. Los suelos orgánicos y los suelos francos de textura media con altos contenidos de arena muy fina y sedimentos tienen la capacidad disponible de agua más alta, los suelos

arcillosos tienen valores intermedios y los suelos con contenido de arena gruesa tienen la capacidad disponible de agua más baja.

2.6.4.2 Agua fácilmente aprovechable (AFA)

Allen *et al.* (2006) menciona que a pesar de que en teoría existe agua disponible hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el punto de marchitez permanente. Cuando el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua con suficiente velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción del agua será igual a la ETc. A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo este por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzara a sufrir de estrés. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo.

2.6.4.3 Movimiento del agua en el suelo

Por lo general el agua se mueve libremente en los grandes poros del suelo (Macroporos). Se podría decir, en términos generales, que el agua se desplaza de una zona de mayor potencial métrico a una zona de menor potencial mátrico. Winter, citado por Ramos (2000) señala que en términos sencillos, el agua se mueve de un lugar mojado (mayor potencial mátrico) a un lugar seco (menor potencial mátrico).

Según Aidarov (1991), el movimiento del agua en el suelo depende de dos factores: la presencia del gradiente de las fuerzas que rompen el estado de equilibrio de la humedad y la conductividad del suelo o la resistencia que encuentra la humedad al desplazarse.

2.6.4.4 Medición de la humedad del suelo

Según Baver *et al.* (1991) existen dos tipos generales de mediciones: a) aquellas que nos permiten obtener información acerca del contenido de agua en el suelo, y b) aquellas que se aplican para conocer la condición energética del agua del suelo, también denominada tensión, E. H. S., potencial mátrico.

Los principales métodos para determinar el contenido de agua en el suelo son: el método gravimétrico; el rápido (Speedy); el método del dispersor de neutrones; el método del tensiómetro, y el de la resistencia eléctrica.

2.7 Calidad de agua

Según Ayers y Westcot (1984) el concepto de calidad de agua se refiere a las características de las aguas que pueden afectar su adaptabilidad a un uso específico, en otras palabras, la relación entre la calidad del agua y las necesidades físicas, químicas y biológicas. En la evolución de calidad de agua para riego, se tiene en cuenta sobre todo las características químicas y físicas.

Por otro lado Vásquez *et al.* (s.f.) indica que la calidad del agua de riego está determinada por la composición y concentración de los diferentes elementos que pueda tener, ya sea en solución o en suspensión. Las características que determinan la calidad del agua de riego son: concentración total de sales solubles, concentración relativa de sodio, concentración de boro u otros elementos tóxicos, concentración total de sólidos en suspensión, presencia de semillas de malezas, larvas o huevos de insectos, dureza del agua, determinada por la concentración de bicarbonatos.

2.7.1 Problemas de la calidad del agua de riego

2.7.1.1 Salinidad

Ayers y Westcot (1984) mencionan que las sales tienen su origen en la disolución o meteorización de las rocas o suelos. Además de la disolución lenta de la caliza, del yeso y de otros minerales.

El uso de aguas de riego salinas supone el riesgo de salinizar el suelo, provocando en numerosos casos disminución en la producción del cultivo (la capacidad de la planta para absorber el agua disminuye a medida que aumenta el contenido de sales, teniendo la planta que realizar un mayor esfuerzo)

Las sales provienen por lo general de las contenidas en las aguas de riego. El rendimiento de los cultivos disminuye cuando el contenido de sales en la solución del suelo es tal que no permite que los cultivos extraigan suficiente agua de la zona radicular, provocando así un estado de escasez de agua en la planta por un tiempo significativo

2.7.1.2 Problemas de infiltración

De acuerdo a Ayers y Westcot (1984) los factores de calidad del agua que suelen influir en la infiltración son el contenido total de sales (salinidad) y el contenido de sodio en relación a los contenidos de calcio y magnesio.

Los problemas de infiltración ocasionados por la mala calidad del agua ocurren por lo general en los primeros centímetros del suelo y están ligados con la estabilidad estructural del suelo y con el contenido de sodio en relación con el calcio. Cuando los cultivos son regados con aguas de alto contenido de sodio, este elemento se acumula en los primeros centímetros de profundidad. Consecuentemente los agregados de esta capa superficial se dispersan en partículas mucho más pequeñas que obturan los poros del suelo. Este problema también puede ser provocado por un contenido de calcio extremadamente bajo

Cuando la velocidad de infiltración es muy baja, puede ocurrir que el agua infiltrada no baste para cubrir las necesidades del cultivo. Los problemas más frecuentes relacionados con una infiltración baja suelen producirse cuando el sodio se incorpora al suelo y deteriora su estructura; los agregados del suelo se dispersan en partículas pequeñas que tapan o sellan los poros y evitan que el agua pueda circular e infiltrarse con facilidad.

Por eso, para evaluar los problemas de infiltración se ha establecido el índice RAS (Relación de absorción de sodio), que viene definido por la siguiente fórmula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Donde Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} representan, respectivamente, las concentraciones de los iones de sodio, calcio y magnesio del agua de riego, expresado en meq/litro.

2.7.1.3 Toxicidad

Ayers y Westcot (1984) indica que los problemas de toxicidad surgen cuando ciertos elementos (iones) del suelo o del agua, son absorbidos por las plantas y acumulados en sus tejidos, en concentraciones suficientemente altas como para provocar daños y reducir sus rendimientos. La magnitud de estos daños depende de la cantidad de iones absorbidos y de la sensibilidad de las plantas. Los cultivos perennes son más sensibles a comparación de los cultivos anuales que son más tolerantes. Por otro lado todos los cultivos sufrirán daños y llegarán a morir si las concentraciones son lo suficientemente altas.

Los iones de mayor importancia son el sodio, cloro y el boro. El daño a las plantas ocurren cuando los iones son absorbidos en cantidades significativas, junto con el agua tomada por las raíces, Una vez absorbidos, los iones son transportados a las hojas en donde se acumulan en el proceso de transpiración. Así, los iones alcanzan una mayor concentración en las áreas por donde la transpiración es mas intensa, generalmente en las puntas y en los bordes de las hojas.

El sodio, el boro y el cloruro son las que, en general, ocasionan más problemas para los cultivos: Un exceso de sodio produce sequedad o quemaduras en los bordes exteriores de las hojas. El exceso de cloruro suele manifestarse con

quemaduras en la punta de las hojas y avanzar por los bordes. Los síntomas de toxicidad por boro suelen manifestarse por un amarillamiento de la punta de las hojas más antiguas que va desplazándose hasta el centro de las hojas entre los nervios y sequedad en algunas otras zonas de la planta.

2.7.1.4 Dureza

Según Ávila *et al.* (s.f.) el grado de dureza del agua hace referencia a sus contenidos en calcio y magnesio. Su resultado se expresa en grados hidrométricos franceses. Para su cálculo se emplea la siguiente fórmula:

$$Dureza = \frac{(mg / lCa^{++} * 2.5) + (mg / lMg^{++} * 4.12)}{10}$$

En general, las aguas muy duras son poco recomendables en suelos fuertes y compactos. Sin embargo su uso está muy indicado en la recuperación de suelos sódicos.

2.7.1.5 Riesgos de Obturación

Los sólidos en suspensión, las sustancias disueltas o los microorganismos contenidos en el agua de riego pueden producir obstrucciones en los emisores de riego localizado.

2.7.2 Normas para la toma de muestras

Los análisis requieren tomar una muestra representativa del agua a analizar, para ello se seguirán las siguientes normas.

- El recipiente debe ser de vidrio o plástico de aproximadamente un litro de capacidad, se debe lavar varias veces el envase con el propio agua de riego.

- La muestra debe ser tomada momento antes de ser llevadla laboratorio, ya que los resultados serán tanto mejor cuanto menor sea el intervalo de tiempo transcurrido entre la recogida de la muestra y el análisis.
- En pozos dotados de bomba, debe tomarse la muestra después de algún tiempo de su puesta en marcha.
- En ríos y embalses se recogen varias tomas en diferentes puntos representativos y se mezclan en una sola muestra. No deben tomarse en zonas estancadas, sino en lugares donde el agua esté en movimiento.
- La muestra debe tomarse a una profundidad intermedia entre la superficie el agua y el fondo.
- Deben mantenerse en una nevera a una temperatura de unos 5° C.
- Hay que cerrar el envase y etiquetarlo. Junto a la muestra debe acompañarse un informe indicando dónde ha sido tomada, para qué tipo de cultivo va a ser utilizada, características del suelo y cualquier otra información que pueda ser importante para determinar la calidad del agua.
- La muestra deben ir perfectamente identificada, indicando: origen, localización, cultivo de destino, características de los suelos a regar.

2.8 La quinua

GCP/BOL/ITA (2004) menciona que la quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) es considerada como el “grano de oro de los Andes” y se ha constituido, por aspectos socioeconómicos y culturales, en un cultivo importante en los sistemas de producción del Altiplano boliviano.

La planta de la quinua es erguida y puede alcanzar en la región del altiplano boliviano hasta 1,70 m, presentan una raíz pivotante, muy ramificada, que le permite captar la humedad en condicione de sequía, el tamaño de las raíces es directamente proporcional con el tamaño de la planta. El tallo es cilíndrico y anguloso que se angosta hacia el ápice, Las hojas tienen forma lanceolada. Las panojas con las flores y granos se ubican en el extremo anterior de la planta (Pacheco y Zamorano, 2004).

2.8.1 Tolerancia del cultivo de la quinua a la salinidad

Durand, citado por Valero (2006), indica que se seleccionaron accesiones de quinua en previos de la Universidad Nacional del Altiplano Puno-Perú, a diferentes concentraciones de NaCl (16, 32 y 57 mS/cm), siendo las más adecuadas las accesiones 03-08-656, 30-21-49, 03-21-128, 03-21-188, 03-21-297, 03-21-357, 04-02-586, 270, 310, 369 y variedad Sajama que poseen un poder germinativo 100% y una fluctuación de energía germinativa del 65 - 100% en la segunda concentración siendo las tolerantes 03-08-755, 344, 03-08-685, 665, 371, 03-21-188, 270, 639, 388 y variedad Sajama , en la tercera concentración salina fueron 03-08-656, 665, 342 y la variedad Sajama.

Mujica *et al.* citado por Pacheco y Zamorano (2004) indican que han observado importantes producciones de quinua en las proximidades de los salares en suelos alcalinos hasta con 9 de pH y concentraciones salinas extremas de hasta 52 mS/cm.

Cari, citado por Valero (2006), indica que el mayor rendimiento de grano y materia seca en quinua en predios de la Universidad Nacional del Altiplano Puno-Perú, se obtuvo en el rango de salinidad letal para el crecimiento y desarrollo de las plantas de quinua por encima de 8,1 a 16 mS/cm. Los efectos de la sal son la disminución del tamaño de la planta y defoliación. La variedad Kancolla resultó con mayor tolerancia a la sal que la variedad Sajama.

Jacobsen *et al.* citado por Valero (2006), indican que en concentraciones salinas 0,0; 9,5; 18; 28,5; 30, 47,5; 57, 66,5; 76, 85,5; y 95 mS/cm en 15 accesiones siendo las más adecuadas en concentración 0,6 M NaCl, es decir, las semillas de genotipos tolerantes a la sal germinan más del 75 % después de 6 a 7 días.

Valero (2006) realizó un estudio con cuatro genotipos de quinua y cuatro niveles de NaCl (0.0, 0.1, 0.2 y 0.3 moles) en condiciones de ambiente protegido, donde determinó que los genotipos de quinua Utusaya y G 205-95DK toleran una concentración de 0.3 moles de NaCl como límite.

2.8.2 Requerimientos hídricos de la quinua

Morales, citado por García (1991) determinó el Uso Consuntivo de la quinua por el método de lucímetros en función de sus periodos vegetativos y asume valores promedios de 519.5 mm. Además siendo la precipitación media de la zona (Patacamaya) durante el periodo agrícola de 350 mm, la quinua tendría un déficit hídrico aproximado de 134 mm, los que si fueran aplicados en forma de riego suplementario, podría arrojar mayores rendimientos en el cultivo.

Silva, citado por García (1991), en un estudio disimétrico, determinó la evapotranspiración del cultivo de la quinua, en el que halló que el cultivo, requería 284.5 mm de agua durante su ciclo vegetativo, sin embargo este estudio, no fue realizado con la ETM o con la ETR, sino que fue un estudio a secano, tomando en cuenta solo las precipitaciones con un rendimiento de 1800 kg/ha en variedad Real.

Choquecallata (1993) determinó por medio de lisimetria los requerimientos máximos de la quinua, fijando en 488 mm de agua como máximo de necesidad, los que se encuentran relacionados con el rendimiento obtenido.

2.8.3 Fases fenológicas críticas del cultivo de quinua a la sequía

Espíndola, citado por Ramos (2000) en un trabajo de respuestas fisiológicas, morfológicas y agronómicas de la quinua al déficit hídrico, en condiciones

controladas, indica que la fase fenológica de prefloración es la más susceptible al déficit hídrico, para el rendimiento de grano.

A su vez Huiza (1994) en un trabajo similar, da a conocer que la fase fenológica de grano lechoso es la más susceptible al déficit hídrico.

Por su parte Jacobsen *et al.* citado por Ramos (2000), indican que en quinua las fases fenológicas más susceptibles a la sequía, para el rendimiento de grano son: la vegetativa, anthesis y llenado de grano.

Mamani (2007) determinó que un riego deficitario con riego durante las etapas de germinación, floración y grano lechoso y sin riego en etapas vegetativas iniciales y sin riego durante la fase de grano pastoso, es beneficioso para el cultivo de la quinua.

2.9 El suelo

López y López (1978) mencionan que el suelo es un sistema muy complejo. En un volumen determinado de suelo coexisten tres fases, una sólida, otra líquida y otra gaseosa en estrecho equilibrio.

La matriz del suelo sirve de varias y muy valiosas formas, no sólo como una base sobre la cual las plantas se sostienen en posición vertical, sino también como una fuente de nutrientes y como proveedor de un buen balance entre la aireación y el contenido de humedad aprovechable para la planta (García y Briones 2003).

2.9.1 Materia orgánica en el suelo

La materia orgánica afecta al uso más eficiente del agua, debido a una serie de fenómenos promovidos por la presencia de materia orgánica, sobre todo en suelos de textura gruesa. Se sabe que la materia orgánica mejora la infiltración del agua, reduce su pérdida por evaporación, mejora el drenaje del suelo de textura fina, y

por lo tanto, ayuda a una mejor distribución de agua en el perfil del suelo, promueve un sistema de raíces mas profunda que permita el uso del agua un capa del suelo también mas profunda, al oscurecer el suelo en los climas templados fomenta su calentamiento y, por ende, promueve una mejor germinación y el fácil aprovechamiento del agua (Davaló, 1991).

2.9.2 pH del suelo

El pH de una solución es su grado de acidez o alcalinidad, y se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrogeno. Los suelos no se comportan como soluciones simples; por tanto no es posible definir exactamente el pH del suelo, pero para muchos propósitos puede considerarse similar a la descripción anterior (Fitz, 1996).

Davaló (1991) menciona que el pH del suelo depende de diversos factores: la estación del año, practicas de cultivo, el horizonte muestreado, el contenido hídrico en el momento del muestreo, la técnica para determinar el pH, incluyendo los factores que intervienen en a formación del suelo. En el cuadro 11 de anexos se muestra una evaluación del pH en términos descriptivos

2.9.3 Suelos salinos

Los suelos salinos presentan un elevado contenido de sales solubles. La definición específica utilizada por el *Laboratorio de Salinidad de EUA* se expresa en términos de la conductividad eléctrica de la solución que de de un suelo saturadote agua puede expresarse (Davaló, 1991).

Según Bohn (1993) los suelos afectados por sales son comúnmente en las regiones semiáridas y áridas, donde la precipitación anual es insuficiente para satisfacer las necesidades de evapotranspiración de los vegetales. Como resultado,

las sales del suelo no se disuelven. En vez de ello, se acumulan en cantidades que son perjudiciales par el crecimiento de los vegetales.

También menciona que muchos de los suelos actualmente afectados por sales son producto de las actividades humanas. Por lo común, las sales son transportadas desde zonas con riego excesivo para acumularse en zonas de drenaje deficiente. Al evaporarse los escurrimientos subsuperficiales (agua que es necesario desaguar) y los escurrimientos producidos por la aplicación excesiva de agua de riego, deja tras de sí concentraciones altas de sales.

2.9.4 Densidad del suelo

Narro (1994), la densidad aparente del suelo es la relación entre la masa de los sólidos y el volumen total que estos ocupan, es decir, se incluye el espacio poroso existente entre las partículas sólidas. El valor varía de 1,0 g/cm³ en suelos arcillosos, orgánicos y bien estructurados, hasta alrededor de 1,8 g/cm³ en suelos arenosos compactos. El valor de densidad aparente disminuye a mediada que se incremente al contenido de arcilla en el suelo.

La densidad del suelo es el peso de suelo por unidad de volumen total, este volumen incluye las partículas sólidas del suelo y el espacio poroso. La densidad aparente, es de interés desde el punto de vista del manejo del suelo ya que permite conocer sobre: la compactación del suelo, permite inferir las dificultades para la germinación, enraizamiento, circulación del aire y el agua, se halla relacionado con la textura del suelo y se utiliza para determinar el peso del suelo en campo (Miranda 2002).

2.9.5 Textura del suelo

Con forme a López y López (1978) la textura o composición granulométrica expresa las proporciones relativas de las partículas minerales de la tierra fina, clasificadas en categorías según unos gruesos arbitrarios.

2.10 El modelo BUDGET

Según RAES (2002) el BUDGET esta compuesto de un juego subprogramas validadas que describen los diferentes procesos involucrados en la extracción de agua por las raíces de la planta y el movimiento del agua en el perfil del suelo.

Los datos climáticos están constituidos por la observación de la ETo (evapotranspiración del cultivo de regencia) y la precipitación mensual o medias de 10 días. Al tiempo de ejecución los datos de 10 días o mensuales son procesados para obtener los datos de ETo y precipitación diarios. Especificando y seleccionando algunos parámetros del cultivo en el menú del disco duro, el programa crea un juego completo de los parámetros que pueden ser exhibidos y actualizados si la información adicional esta disponible. El perfil del suelo podría estar compuesto de algunas capas, cada una con sus características específicas. El BUDGET contiene un juego completo de distinto tipos de suelo con sus características específicas que pueden ser seleccionados y ajustados.

Calculando del contenido de agua y sal afectado por la adición y absorción de agua y sal en in perfil de suelo durante el periodo de simulación, el programa es apropiado:

- Para valorar la tensión de agua en el cultivo bajo condiciones dadas
- Para calcular la reacción del rendimiento de agua
- Para diseñar programas de irrigación
- Estudiar la formación de sal en la zona radicular, contrarias a las condiciones de irrigación.
- Para evaluar las estrategias de irrigación

2.10.1 Contribución o entradas

a. Datos climáticos diarios y de 10 días o mensuales como: La demanda de evapotranspiración de la atmósfera (Evapotranspiración del cultivo de referencia) y la precipitación

b. Parámetros que describen el desarrollo del cultivo y consumo de agua por parte de las raíces, como ser: tipo de cultivo, profundidad radicular, tolerancia al estrés hídrico, tipo y grado de cobertura del suelo y especificar el periodo del cultivo

El BUDGET genera un juego completo de parámetros del cultivo, Los parámetros del cultivo generados pueden ser ajustados.

c. Parámetros de suelo: el perfil del suelo podría estar compuesto de algunas capas de suelo, cada una con sus características específicas. El BUDGET contiene un juego completo de características que pueden ser seleccionados y ajustados para varias clases de capas de suelos.

d. Datos de irrigación: Calidad de agua (salinidad), los intervalos de irrigación y la profundidad de aplicación de agua.

e. Agua de suelo inicial y condiciones de salinidad en el perfil del suelo.

2.10.2 Producto o salida

Con la contribución descrita y para las condiciones iniciales en particular, el BUDGET simula el transporte de solutos y el consumo de agua por la atmósfera, cultivo, suelo especificado y para la alternativa de irrigación especificada.

a. Durante el proceso de simulación de la variación del contenido de agua del suelo y la constitución de sal en el perfil del suelo son visualizadas al final de a cada día

del punto de simulación: el agua del suelo y la sal contenida en las diferentes profundidades del perfil del suelo, el nivel de agua en el reservorio de agua del suelo y la reducción de agua en la zona radicular.

b. Al final de la simulación, las visualizaciones del BUDGET son: el perfil de humedad del suelo final, el contenido final de sal en la solución de agua en el perfil del suelo, el Valor total para cada uno de los parámetros del balance de agua del suelo, el rendimiento del cultivo esperado y el requerimiento de agua (riego).

El modelo BUDGET esta sustentado en los principios propuesto por Allen *et al.* (2006).

3 LOCALIZACIÓN

3.1 Ubicación geográfica

El presente trabajo de investigación se realizó en la comunidad de Mejillones, provincia Enrique Valdivieso del Departamento de Potosí. Esta comunidad, se encuentra al sud oeste de la Ciudad de Uyuni a 165 Km y a 107 Km de San Agustín. Geográficamente se sitúa entre las coordenadas 26°41' latitud sud y 67°41' longitud oeste, a una altura sobre el nivel del mar de 3980 m (Anexo 1).

3.2 Características ecológicas

3.2.1 Clima

La región tiene un clima árido y frío, condiciones climáticas que se da en función a la altura, dando lugar a una insolación e irradiación muy amplia, con poca humedad; donde los vientos cordilleranos y frecuentes heladas son característicos durante el año (PDM San Agustín, 2006).

3.2.1.1 Temperatura

Según información de las estaciones climatológicas de San Agustín y Mejillones, la temperatura media anual es de 8,4 °C, la máxima extrema de 25,5 °C y la máxima media de 16,6 °C, la temperatura mínima media 1 °C, y la temperatura mínima extrema de -16 °C (Montes de Oca, 2005).

La época de heladas se presenta en los meses de mayo, junio, julio, agosto y además en los meses de febrero y marzo que se manifiestan de manera sorpresiva, la misma que ocasiona muchas perdidas en los cultivos. Los días con heladas durante el año son de 211 días.

3.2.1.2 Precipitación

Con forme al PDM de San Agustín (2006) las precipitaciones que se presentan son irregulares en cuanto a su frecuencia e intensidad, como a su variabilidad interanual, esto debido a factores como incidencia de los vientos accidentales, normalmente secos.

De acuerdo a datos obtenidos la precipitación media varia de 120-154 mm distribuidos en 4 meses de diciembre a Marzo, representando el 97.7- 95.6% de la precipitación, la mayor precipitación se presenta en el mes de Enero, con un promedio de 16 días con lluvia, la precipitación efectiva de 99-130 mm lo representa el 78.1 a 82.7% de la precipitación.

3.2.1.3 Humedad relativa, insolación y viento

Se ha determinado de acuerdo a datos de SENAMHI, algunas características climáticas de estaciones meteorológicas ubicadas en estaciones próximas al Municipio, la humedad relativa alcanza al 34 %, la insolación es de 9,4 horas y los vientos van de dirección NW a 8,7 nudos (PDM San Agustín, 2006).

En los meses de agosto, septiembre y mediados de octubre el viento afecta a los cultivos en la fase de germinación, cubriendo con tierra las plántulas recién germinadas, ocasionando la muerte del vegetal. En la época de formación de panoja se produce el acame de las plantas de quinua y la perdida del grano maduro. La erosión del suelo se produce por vientos en zonas de planicies abiertas.

3.2.2 Fisiografía y suelos

Según Montes de Oca (2005) la fisiográfica de la zona es plana y ondulada. Los suelos son relativamente jóvenes, la textura franco arenosa, de escasa fertilidad, de

origen volcánico o fluvio lacustre con afloraciones salinas debida a la cercanía de los salares, en algunos lugares los suelos están conformados por dunas.

De manera general son suelos de textura arenosa, franco arenosa y franco limosa, son de estructura pobre, generalmente con fragmentos gruesos en los perfiles, en gran parte con baja retención de humedad y en otras pobremente drenados donde el nivel freático es superficial, son suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad, suelos aptos para el cultivo de quinua real y no así para otras gramíneas en importancia económica (PDEL, 2004)

Por otro lado con forme al PDM de San Agustín (2006) son suelos frágiles, donde los procesos de erosión eólica e hídrica están activos y la degradación de los suelos son provocados de forma laminar y en cárcavas. Ello ocasiona la erosión en los causes que a la vista deja cárcavas y que con el tiempo son difíciles de controlar, siendo una amenaza permanente para la actividad agropecuaria.

3.2.3 Vegetación

Según Montes de Oca (2005), la vegetación característica es xerofítica, debido a la extrema aridez y falta de humedad. La cobertura vegetal es pobre se distinguen comunidades de distintas especies de tholas por su gran tamaño y en algunas ecoregiones están asociados con gramíneas las especies vegetales mas importantes son la Nacia thola (*Baccharis incarum*), la ñahuaya (*Adesmia spinossisima*) y la sicuya (*Stipa ichu*).

Por otro lado PDEL (2004) menciona que en la zona también se aprecian variedad de cactus (*Trichocereus spp.*), yareta (*Azorella spp.*), keñua (*Polyllipsis tomentella*), pupusa (*Wemeria dactillophylla*), paja brava (*Festuca orthophylla*). Las principales especies vegetales existentes se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Principales especies vegetales de la Mancomunidad de Los Lípez

| Nombre común | Nombre científico |
|---------------------|------------------------------|
| Quiru th'ola | <i>Pararastrephya spp.</i> |
| T'ara | <i>Fabiana densa</i> |
| Lampaya | <i>Lampaya spp.</i> |
| Chircayhuaya | <i>Parastrephya spp</i> |
| Yareta | <i>Azórela spp</i> |
| Kota | <i>Anthobryum triandrum</i> |
| Kauchi | <i>Salicornia pulvinata</i> |
| Churqui | <i>Prosopis feroz</i> |
| Chachacoma | <i>Senecio graveolens</i> |
| Cactus | <i>Trichocereus spp.</i> |
| Keñua | <i>Polyllepis tomentella</i> |
| Molle | <i>Schinus molle</i> |
| Olmo | <i>Ulmus europea</i> |

La thola (*kiru thola*) es un excelente indicador para el cultivo de la quinua, en suelos con predominancia de esta especie se tiene bajas posibilidades de la incidencia de las heladas.

Sin embargo, la reducción de especies principalmente leñosas en la zona, viene ocasionando el despoblamiento de la cobertura vegetal de los suelos, dejando simplemente suelos descubiertos propensos a la erosión tanto hídrica como eólica. La tala indiscriminada de especies como la thola, la yareta, provocada por empresas de explotación minera (Azufre, Bórax) en su procesamiento (secado) reduce las especies nativas. Otro factor de reducción es debido a la ampliación de la frontera agrícola que realizan las familias productoras, por dicha actividad vienen ocasionando la reducción de muchas de estas especies (PDEL, 2004).

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales

4.1.1 Materiales de laboratorio

- Probeta de 1000 ml
- Probeta de 100 ml
- Pipetas de 10 ml
- Piceta 1000 ml
- Varilla de vidrio
- Vaso de precipitado de 200 ml
- Vaso de precipitadote de 500 ml
- Agitador de madera
- Cápsulas de aluminio
- Tamiz
- Cuaderno de datos
- Marcador indeleble
- Espátula
- Hexametafosfato de sodio
- Agua destilada
- Acido clorhidrico al 15 %

4.1.2 Materiales de campo

- Botellas de plástico de 2 litros
- Hielo
- Recipiente de plástico
- Cordel de 30 metros
- Estacas de madera
- Bincha de lona de 20 metros
- Flexometro de 5 metros
- Barreno con sus prolongaciones
- Combo
- Pala y picota
- Espátula
- Cuchillo
- Bolsas de polietileno
- Refrigerante de plastoform
- Piezómetros
- Marcador indeleble
- Planillas de datos
- Imágenes satelitales impresas

4.1.3 Material de gabinete

- Material de escritorio
- Cartas topográficas
- Imágenes satelitales
- Computadoras
- Sistema de Información Geográfica
- Planillas de registro pluviométrico

4.1.4 Equipos

- pH-Conductivímetro marca OAKTON
- Molinete Hélice
- Balanza marca KERN CM 320-IN
- Sistema de Posicionamiento Global
- Cámara fotográfica
- Mufla
- Ollas de Richard
- Balanza de precisión
- Agitador eléctrico
- Hidrómetro
- Termómetro
- Cronómetro

4.2 Metodología

4.2.1 Determinación de los parámetros físicos de la cuenca

En base a los requerimientos del Proyecto Quinagua, se identificó una zona “Tipo” para realizar el presente trabajo; en este caso la comunidad de Mejillones, que es una de las zonas productoras de quinua del sudoeste de Potosí. A continuación la figura 1 muestra un esquema de la metodología aplicada.

La información primaria se obtuvo a través de trabajo de campo, realizando un reconocimiento del terreno, marcando fuentes de agua y cultivos de quinua con ayuda de un GPS.

Para la interpretación y delimitación de la cuenca se utilizó imágenes satelitales LANDSAT 6 ETM en formato digital del año 2001 y curvas de nivel a escala 1:50 000 en formato digital. Dichas imágenes fueron georeferenciadas digitalizando el cauce de los ríos y marcando los cultivos de quinua, empleando el programa ArcGis versión 9.1.

La delimitación de la cuenca (Figura 2) se realizó siguiendo las líneas del divortium acuorum (parteaguas), la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, que en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida (Villón 2002).

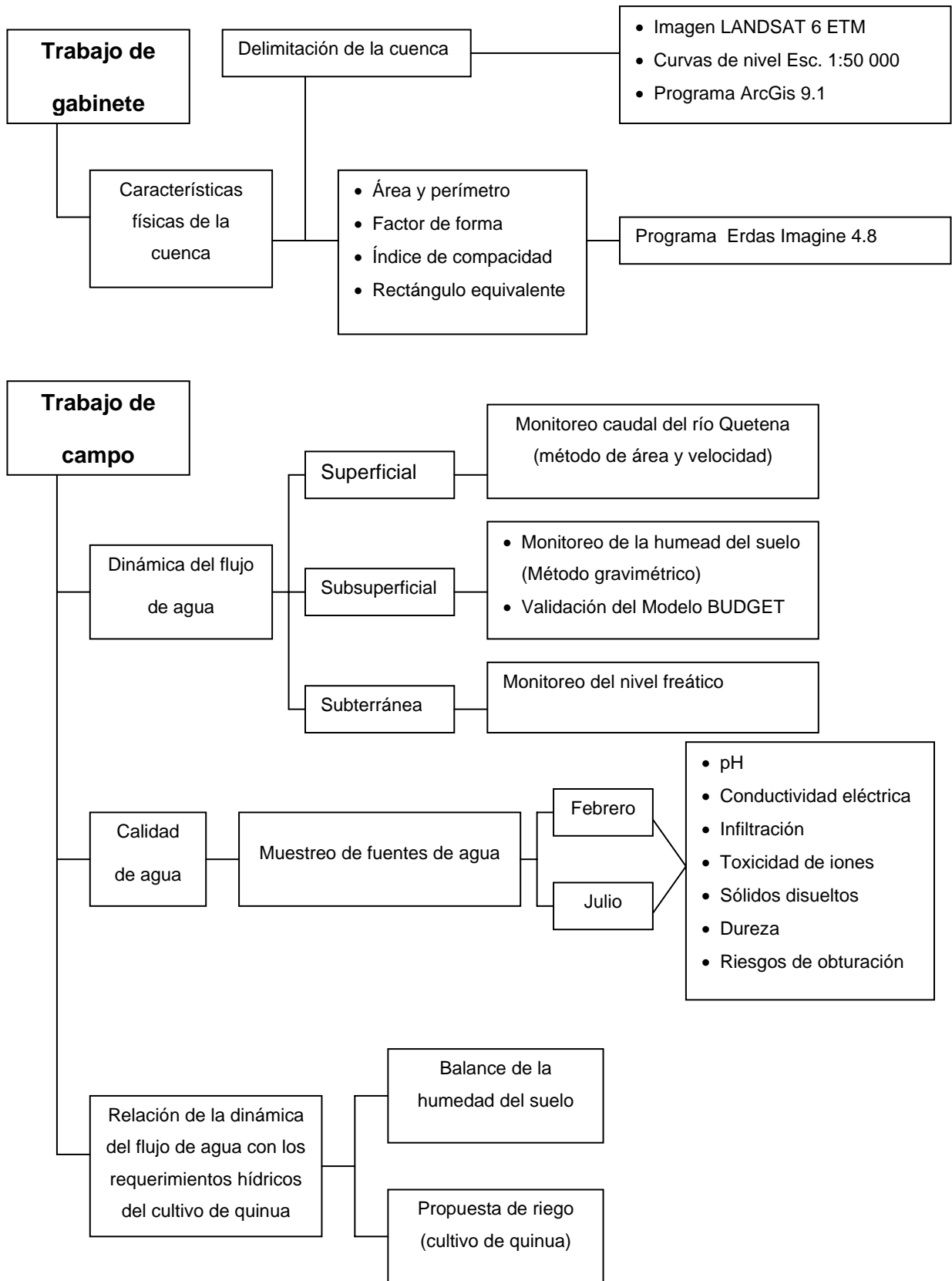


Figura 1. Esquema de la metodología aplicada durante el trabajo de investigación

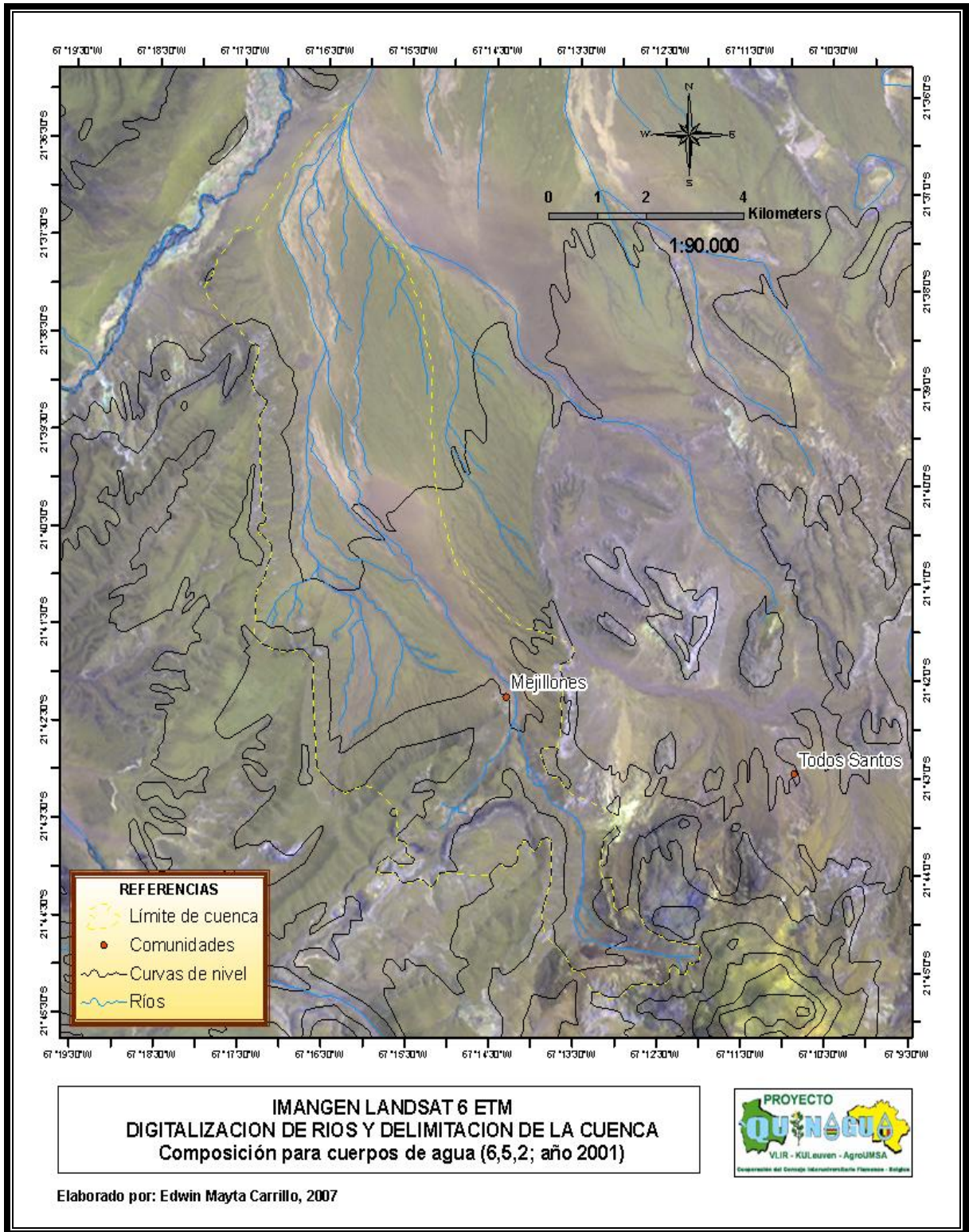


Figura 2. Digitalización del cauce de ríos y delimitación de la cuenca sobre la imagen satelital Landsat 6 ETM

4.2.1.1 Área y perímetro

Una vez delimitada la cuenca, se procedió a calcular el área y perímetro de la cuenca en metros cuadrados, empleando el programa ERDAS IMAGINE 8.4, por medio de la herramienta "AOI".

4.2.1.2 Índice o factor de forma (F)

Este factor se determinó en base a la metodología propuesta por Villón (2002), que expresa la relación, entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud. El ancho y la longitud de la cuenca se determinaron con ayuda del programa ArcGis, luego se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$F = \frac{B}{L} = \frac{B * L}{L * L} = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

B = Ancho (km)

L = Longitud (km)

4.2.1.3 Índice de compacidad (índice de Gravelious)

Este valor se determinó utilizando los datos de perímetro y área de la cuenca, empleando la siguiente expresión:

$$K = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

K = Índice de compacidad

P = Perímetro de la cuenca (km)

A = Área de la cuenca (Km²)

4.2.1.4 Rectángulo equivalente

Para diseñar el rectángulo equivalente se utilizó los datos de área de la cuenca e índice de compacidad, además se calcularon las áreas parciales entre curvas de nivel con ayuda del programa ERDAS IMAGINE 4.8. Se hizo uso de las siguientes ecuaciones.

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right) \quad (3)$$

$$l = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right) \quad (4)$$

L = Longitud del lado mayor del rectángulo (km)

l = Longitud del lado menor del rectángulo (km)

K = Índice de compacidad

Con el resultado de estas ecuaciones se dibujó un rectángulo de base l y de altura L después se halló los cocientes con la siguiente expresión:

$$L_1 = \frac{A_1}{l}; L_2 = \frac{A_2}{l}; \dots; L_n = \frac{A_n}{l} \quad (5)$$

$L_1; L_2; \dots; L_n$ = Longitud del lado mayor del rectángulo parcial (km)

$A_1; A_2; \dots; A_n$ = Área parcial (km²)

4.2.2 Determinación de la geología, fisiografía y topografía, y suelo de la cuenca

La composición geológica, unidades de terreno y suelo de la cuenca, se determinó en base a mapas temáticos en formato digital elaborados por el ZONISIG (2000), empleando el programa Arc Gis versión 9.1.

4.2.3 Determinación de la dinámica del flujo superficial

La cuenca se halla constituida por corrientes efímeras (Anexo 2), esto significa que el cauce de los ríos solo llevan agua cuando llueve o inmediatamente después (Villón, 2002), por tanto el tiempo de permanencia de estos ríos con agua es muy reducido, entre 5 a 12 horas aproximadamente. Por esta razón no realizó aforos de los mismos.

Al ser el río Quetena una de las principales fuentes de agua superficial de la zona, surgió la necesidad de conocer su origen, cantidad y calidad, para determinar si sus aguas son útiles para el riego de la quinua, ya que la zona no cuenta con muchas fuentes de agua o son muy reducidas.

El aforo se lo realizó en forma periódica cada 15 días aproximadamente, desde el mes de noviembre hasta el mes de julio.

Las dos primeras lecturas del caudal fueron registradas utilizando el método del flotador, metodología descrita por Briones y García (1997), posteriormente todas las lecturas del caudal se registraron con ayuda de un molinete de hélice (Anexo 3), empleando el método de área y velocidad descrita por Villón (2002).

La velocidad del agua entre dos verticales consecutivas se calculó con ayuda del molinete, empleando la siguiente ecuación:

$$V = (0.000854 * C) + 0.05 \quad (6)$$

V = Velocidad del agua (m/s)

C = Numero de vueltas (rpm)

Para determinar el área existente entre dos verticales consecutivas se utilizando la formula del trapecio, es decir:

$$A_1 = \frac{h_0 + h_1}{2} * L \quad (7)$$

A_1 = Área entre dos verticales consecutivas (m²)

h_0, h_1 = Altura de agua entre dos verticales consecutivas (m)

L = Longitud entre dos verticales consecutivas (m)

El río Quetena presenta una longitud de 165 km, por esta razón solo se realizó el aforo en un solo punto; 21° 36"30.1 latitud sur y 67° 17" 8.2 longitud oeste, que se halla al noroeste de la cuenca.

4.2.4 Determinación de la dinámica del flujo subsuperficial

4.2.4.1 Monitoreo de la humedad del suelo

Se tienen 15 puntos de observación en toda la cuenca, entre parcelas de quinua (Anexo 4) y parcelas en descanso (Anexo 5), se tomaron muestras: a 10, 30, 60 y 90 centímetros de profundidad del suelo. La ubicación de estos puntos en la cuenca se muestra en la figura 3.

Se hicieron mediciones quincenales durante 8 meses desde el mes diciembre hasta el mes de julio (2006-2007).

Para determinar la humedad del suelo se empleo el método gravimétrico descrito por Baver *et al.* (1991). Adicionalmente se empleo las siguientes ecuaciones (Chipana, 2003).

$$U\% = \frac{mw}{ms} \times 100 \quad (8)$$

$U\%$ = Humedad gravimétrica (%)

mw = Masa de agua (gr)

ms = Masa de suelo (gr)

$$\theta\% = \frac{U \times \rho_{ap}}{\rho_w} \times 100 \quad (9)$$

$\theta\%$ = Humedad volumétrica (%)

ρ_{ap} = Densidad aparente del suelo (gr/cc)

ρ_w = Densidad del agua (gr/cc)

$$L = \sum_i^n \theta_i \Delta_{zi} \quad (10)$$

L = Lamina de almacenamiento de agua (mm)

θ_i = Humedad gravimétrica de incremento "i"

Δ_{zi} = Amplitud de incremento "i"

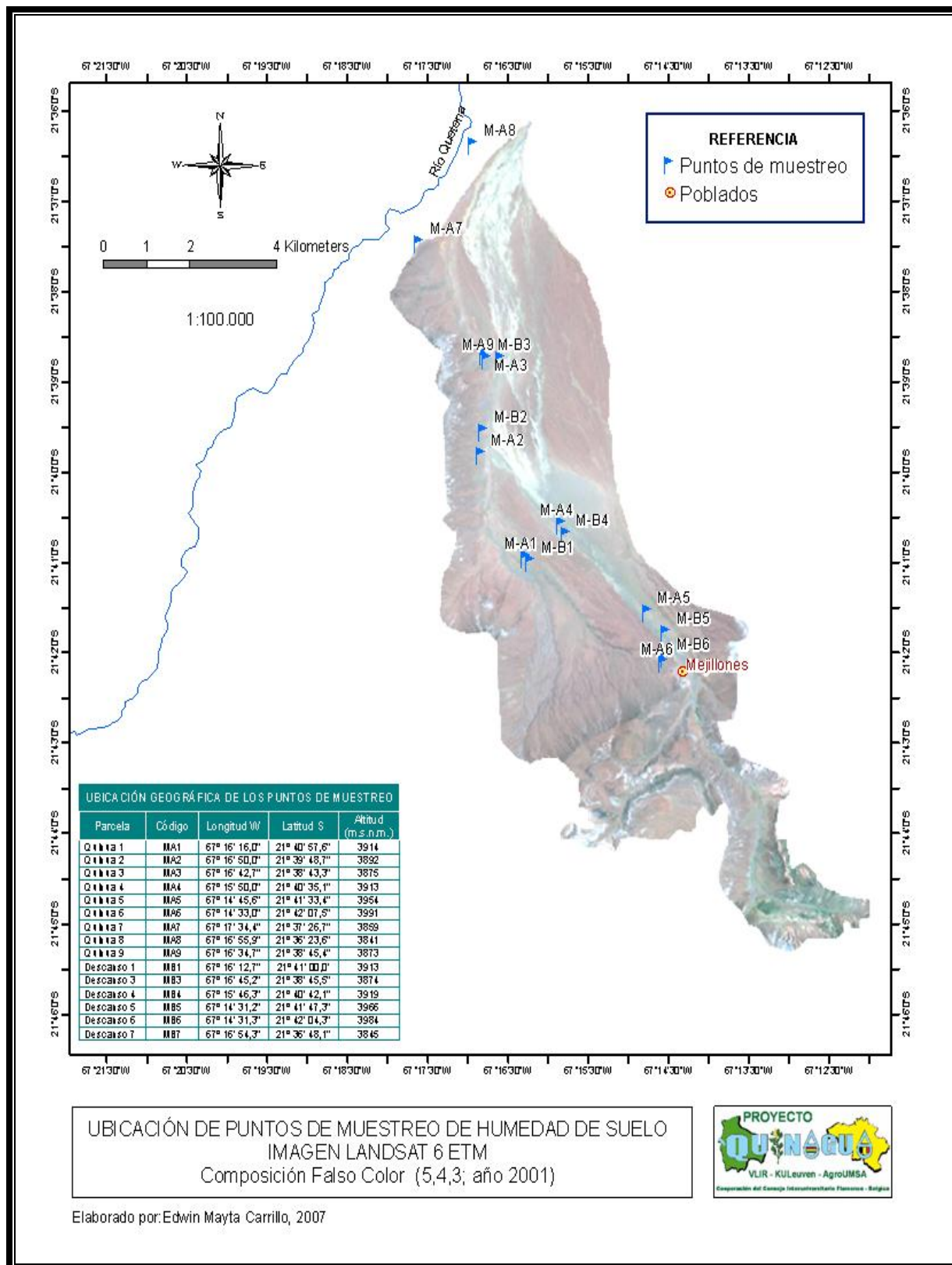


Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo del suelo

4.2.4.2 Análisis de suelos

a. Textura del suelo

Para determinar la textura del suelo (Anexo 6) se empleó el método Bouyucos descrito por Miranda (2002).

b. Densidad aparente

Se pesó 50 gr suelo seco en una balanza analítica, la muestra fue depositada en una probeta de 100 ml, se golpeó suavemente la base de la probeta con la palma de la mano para el acomodo de las partículas. Se registró el volumen total (sólidos + poros). La densidad aparente se calculo con la siguiente formula:

$$D_{ap} = \frac{MSS}{V_t} \quad (11)$$

D_{ap} = Densidad aparente (gr/cm³)

MSS = Masa de suelo seco (gr)

V_t = Volumen total (cm³)

c. Humedad de Saturación, Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente

Estos datos fueron tomados de 9 parcela de quina y 6 parcelas en descanso, a 30 y 60 centímetros de profundidad. Se tomaron muestras no perturbadas con ayuda de cilindros, estos fueron evaluados en el Laboratorio de Edafología de la Facultad de Agronomía, empleando la metodología del recipiente de arena y las ollas a presión de Richard.

d. pH y conductividad eléctrica de suelo

El pH y la conductividad eléctrica del suelo fueron determinadas empleando el método de extracto de saturación, utilizando una relación suelo-agua de 1:5. El pH y la conductividad eléctrica se midieron con ayuda de un pH-conductivímetro.

4.2.4.3 Validación del modelo BUDGET

Se simuló la humedad del suelo, de 9 parcelas de quinua y 6 parcelas en descanso, empleando el programa BUDGET (a soil water and salt balance model) versión 5.0. Los parámetros empleados para la modelación se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Parámetros empleados para realizar la simulación del contenido de agua en el suelo

| Parámetros | Descripción |
|---------------------|--|
| Datos de irrigación | No se empleo riego |
| Datos climáticos | <ul style="list-style-type: none"> • Precipitación diarias (Anexo 7) • Evapotranspiración diarias (Anexo 8) |
| Datos del cultivo | <ul style="list-style-type: none"> • Parcelas de quinua • Parcelas en descanso |
| Datos de suelo | Estados de humedad del suelo (Anexo 9) <ul style="list-style-type: none"> • Saturación (Vol%) • Capacidad de Campo (Vol%) • Punto de Marchitez Permanente (Vol%) La humedad de suelo Inicial (Vol%), ver anexo 10 |

Se realizó una prueba de de correlación lineal simple entre la humedad de suelo observado y la humedad de suelo simulado, de tal forma de determinar el grado de confiabilidad del modelo BUDGET, con la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n}}{\sqrt{\left(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}\right) \times \left(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}\right)}} \quad (12)$$

4.2.5 Determinación del flujo subterráneo

4.2.5.1 Monitoreo del nivel freático

Inicialmente se planificó la instalación de piezómetros, pero se tuvo problemas al momento de realizar las perforaciones, solo en una oportunidad se llegó a una

profundidad de 4 m sin encontrar el nivel freático. Por información de los comunarios el agua se hallaba a más de 10 m de profundidad, por esta razón solo se consideró la evaluación de pozos. Estos puntos se muestran en el cuadro 4.

Se hicieron mediciones cada 15 días durante 9 meses, desde el mes de noviembre hasta el mes de julio, se inició en el mes de noviembre con el pozo 1 y en el mes de enero con el pozo 2.

Para ello se estableció un punto de referencia, que se localiza en el borde del pozo (Anexo 11), se introdujo la bincha hasta penetrar el espejo de agua; luego se registro la longitud total y la longitud mojada de la bincha. La profundidad del nivel freático se determinó empleando la siguiente ecuación:

$$P = L - l \quad (13)$$

P = Profundidad del nivel freático (m)

L = Longitud total (m)

l = Longitud mojada de la bincha (m)

Cuadro 4. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo del nivel freático

| REFERENCIA | CODIGO | LOCALIZACIÓN | | ALTITUD (m.s.n.m.) |
|------------|--------|---------------|---------------|-----------------------|
| | | Longitud W | Latitud S | |
| POZO 1 | P1 | 67° 16' 17,6" | 21° 36' 09,9" | 3840 |
| POZO 2 | P2 | 67° 17° 21,7" | 21° 37' 31,7" | 3857 |

4.2.5.2 Monitoreo del caudal de manantiales agua

Se registro el caudal del manantial M3, debido a que los otros manantiales presentaban un caudal muy reducido, impidiendo de esta manera determinar su caudal. La vertiente M3 se observa en el anexo 12.

La medición del caudal se realizó empleando el método de aforo volumétrico descrito por Briones y García (1997). Se midió el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido, donde se colecta la descarga, el caudal se calculó con la siguiente ecuación:

$$Q = V/t \quad (14)$$

Q = Caudal (l/s)

V = Volumen (l)

t = Tiempo (s)

4.2.6 Determinación de la calidad de agua para riego

Para ello se tomaron muestras de agua, en botellas plásticas de 2 litros, evitando el ingreso de burbujas de aire. La ubicación de los puntos de muestreo se presentan en el figura 4.

Para determinar la calidad de agua del río Quetena se tomó la muestra de la parte media de la corriente a una profundidad promedio de 10 cm, en el punto de aforo, en dos oportunidades, una en el mes de febrero y otra en el mes de julio.

Con relación a los pozos de agua, las muestras se extrajeron directamente con ayuda de un una cubeta y un cordel, luego el agua fue introducida en botellas plásticas, se tomaron muestras en dos oportunidades, en el mes de febrero y julio.

Las muestras se tomaron de manantiales de agua subterránea, teniendo cuidado de no permitir el ingreso de burbujas de aire, para ello las botellas se taparon dentro del agua, solo se tomó muestras en el mes de febrero.

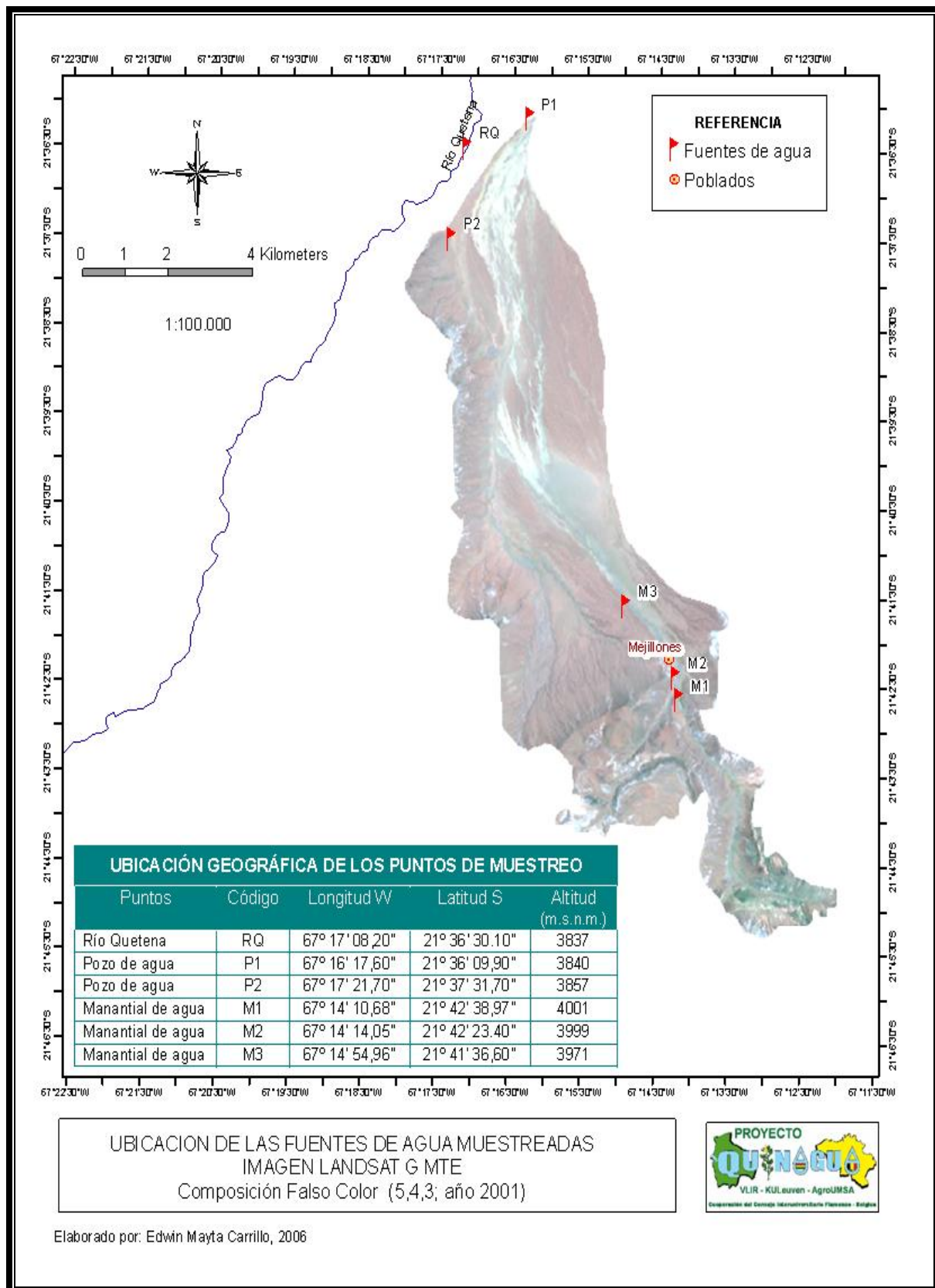


Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo de las fuentes de agua

Al momento de evaluar la calidad del agua de riego se consideró los parámetros mencionados en el cuadro 5. El análisis físico-química del agua de riego se realizó en el Instituto Boliviano de Tecnología Nuclear.

Cuadro 5. Parámetros evaluados para determinar la calidad de agua de riego

| Parámetros | Unidades |
|-------------------------|--------------|
| Sólidos Totales | mg/l |
| Sólidos en suspensión | mg/l |
| Sólidos Disueltos | mg/l |
| pH | Sin unidades |
| Conductividad Eléctrica | dS/m |
| Sodio | meq/l |
| Potasio | meq/l |
| Calcio | meq/l |
| Magnesio | meq/l |
| Cloruros | meq/l |
| Sulfatos | meq/l |
| Carbonatos | meq/l |
| Bicarbonatos | meq/l |
| Boro | ppm |

4.2.7 Relación de la dinámica del flujo superficial y subterráneo con los requerimientos de agua del cultivo de la quinua

4.2.7.1 Balance hídrico del suelo

El balance hídrico del suelo se lo realizo tanto para parcelas de quinua como para parcelas en descanso, empleando la ecuación propuesta por Thornthwaite-Mather, (1955), validada por el ZONISIG, (2001).

$$P = ETr + Ip + E + \Delta A \quad (15)$$

$$\Delta A = Aact_{mes-1} - Aact \quad (16)$$

En base a las ecuaciones (14) y (15), el déficit de agua se calcula como:

$$\boxed{Deficit = ETo - (P - E) + Ip + Aact_{mes-1} - Aact} \quad (17)$$

ETr = Evapotranspiración real (mm)

ETo = Evapotranspiración potencial (mm)

P = Precipitación (mm)

E = Escurrimiento (mm)

Ip = Percolación (mm)

ΔA = Variación del almacenamiento de agua en el suelo (mm)

$Aact$ = Almacenamiento de agua actual mensual (mm)

$Aact_{mes-1}$ = Almacenamiento de agua actual, del mes anterior (mm)

a. Evapotranspiración del cultivo de referencia

La evaporación del cultivo de referencia se calculo con la ecuación Penman-Monteith, propuesta por Allen *et al.* (2006).

$$\boxed{ETo = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}} \quad (18)$$

ETo = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día⁻¹)

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

G = Flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T = Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = Presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)

γ = Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

La evapotranspiración del cultivo de referencia se calculó con la siguiente formula:

$$\boxed{ET_c = ET_o \times K_c} \quad (19)$$

ET_c = Evapotranspiración del cultivo (mm día⁻¹)

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día⁻¹)

K_c = Coeficiente del cultivo

b. Precipitación

Los datos de precipitación del periodo de estudio fueron proporcionados por el SENAMHI.

c. Escurrimiento

El valor de escorrentía se calculó empleando la siguiente expresión:

$$\boxed{E = P \times C} \quad (20)$$

E = Escurrimiento (mm)

P = Precipitación (mm)

C = Factor de escorrentía

El factor de escorrentía se determinó empleando el coeficiente de escorrentia (Anexo 13).

d. Percolación

La percolación (lp), así como el agua disponible por capilaridad, no están considerados en el cálculo del balance hídrico del suelo.

e. Variación del almacenamiento de agua en el suelo

La variación del almacenamiento de agua en el suelo se determinó tanto para parcelas de quinua como para parcelas en descanso, en base a valores promedios del contenido de humedad de estas parcelas.

4.2.7.2 Propuesta de riego

Esta propuesta de riego va dirigida a un uso mas eficiente del agua, por esta razón se plantea el riego deficitario en quinua, debido a que la zona cuenta con fuentes de agua de escaso caudal.

a. Necesidades hídricas del cultivo de quinua

Para determinar los requerimientos hídricos del cultivo de quinua para esta región, se realizó un balance hídrico con datos climáticos de 40 años.

La evapotranspiración del cultivo de referencia se calculo con la ecuación (18), y la evapotranspiración del cultivo se calculó con la ecuación numero (19).

Para el calculo de evapotranspiración del cultivo se considero los valores de coeficiente de cultivo (k_c) propuestos por Choquecallata, (1993).

b. Fuentes de agua para riego

Como fuente de agua para riego, se consideró el manantial M3, por presentar buena calidad de agua, esta fuente de agua cuenta con un caudal aproximado de 0,9 l/s, invariable al lo largo del año. Se determinó la oferta de agua para cada mes del año y su oferta anual.

5 RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Situación social de la comunidad de Mejillones

5.1.1 Demografía

La comunidad de Mejillones se encuentra en la Provincia Enrique Baldivieso del Departamento de Potosí, y pertenece al Gobierno Municipal de San Agustín, cuenta con 31 familias y 138 habitantes, que viven permanentemente en todo el ciclo agrícola, sus actividades principales son la agricultura y la ganadería. La red vial es regular con algunos sectores muy arenosos, que en tiempo de lluvia se tornan intransitables.

5.1.2 Ubicación

Esta comunidad, se encuentra al sud oeste de la Ciudad de Uyuni a 165 km y a 107 km de San Agustín, geográficamente esta ubicado a 21° 42' 12.3" de latitud sur y a 67°14'19.4" de longitud oeste y a una altitud de 3980 msnm.

5.1.3 Autoridades

5.1.3.1 Corregidor

En cada comunidad se cuenta con el corregidor, para los comunarios es una prestación de servicio comunal, al ser parte de la misma, su duración como autoridad es por un lapso de un año y generalmente son nombrados comunarios que sepan escribir y leer.

5.1.3.2 Agente comunal

También es designado por la comuna en una asamblea ordinaria, quien hace la prestación de servicio, hacer el control de los daños que pueda ocasionar los ganados a los cultivos agrícolas, invasión de ganado equino a las zonas de pastoreo por otras comunidades otra de sus funciones es velar el orden y la

limpieza de la comunidad, controlar y programar los trabajos de faenas, este cargo que dura un año.

5.1.4 Organizaciones de la Población

Aparte de la comunidad no existe otra organización de base que agrupe a todos los habitantes. Los sindicatos agrarios no tienen vigencia, puesto que los campesinos de esta zona no recibieron sus tierras por la Reforma Agraria de 1953.

ANAPQUI es la Asociación Nacional de Productores de Quinua, que actualmente (desde 1993) cuenta con 7 regionales, una de ellas es CEDEINKU (Centro de Desarrollo Integrado Kuichi), creada en 1986 y la cual fue convertida en una regional de ANAPQUI, tiene su sede en la provincia Enrique Baldivieso. Tiene 6 comunidades afiliadas.

Estas regionales tienen como principal función acopiar la quinua de los productores en su área de influencia. Otra función es el apoyo a los productores de quinua mediante asistencia técnica a este cultivo y a la producción animal.

5.1.5 Empleo y Migración

Debido al monocultivo de la quinua y a la escasez de agua para riego, la labor agrícola es reducida, por lo que el trabajo se concentra en la preparación del terreno para la quinua, su siembra y su cosecha. De esta forma se establece que fuera de la época agrícola se genera el desempleo, favoreciendo a una migración temporal.

La migración se da en épocas en las cuales existe mayor actividad agrícola en Chile, como ser preparación de suelos, siembra y cosecha de cultivo hortícola y frutícola.

La migración de hombres y mujeres se da antes y después de las siembras en marzo, junio, agosto y noviembre.

Otras actividades que desarrollan son emigrantes son la albañilería, carpintería, limpieza y toda actividad de servicio en el caso de hombres. Las mujeres realizan generalmente labores de cocineras, barredoras, costureras o empleadas domésticas.

La migración temporal se la realiza, también a ciudades como Oruro, Cochabamba, Potosí, La Paz y la localidad cercana de Uyuni.

La mayor emigración se realiza a la Republica de Chile por los mejores ingresos económicos que se percibe, le sigue en orden importancia la ciudad de Sucre con fines de estudio.

5.1.6 Tenencia y Acceso a la Tierra

La tenencia de la tierra tiene dos formas: comunal y familiar. La comunidad es la que asigna a cada familia un pedazo de tierra para cultivar, que pertenece temporalmente a la misma familia mientras lo siga cultivando, cada familia posee una superficie cultivada en un rango de 0.9 ha, a 20 ha, según la situación social y económica del poblador.

La tierra no asignada para cultivos generalmente es destinada al pastoreo comunal de los animales. En algunos casos la familia pierde el derecho a sus tierras si deja de cultivarla durante 5 años. En otras, la familia migrante puede permanecer en posesión de la parcela hasta que algún otro miembro de la comunidad la reclame por haberla trabajado. En estos casos, el Corregidor en consulta con la comunidad decide sobre el caso.

5.1.7 Uso y ocupación del suelo

La comunidad de Mejillones cuenta con una superficie aproximada de 600 km², de las cuales 150 km² están destinadas a la explotación agrícola y 450 km² se destinan a la ganadería.

5.1.7.1 Agricultura

El cultivo más importante en la región es la quinua, debido a las condiciones de suelos extremos, adversidades climáticas y frecuentes sequías, es el cultivo que mejor se desarrolla.

La comunidad cuenta con aproximadamente de 47 ha de cultivos de quinua, que siembran cada ciclo agrícola y la producción de quinua orgánica es de 18 ha, para el cultivo de papa destinan 2 ha, cultivo netamente para el autoconsumo.

Además la comunidad cuenta con 150 ha de tierra virgen, aptas para el cultivo de quinua, 31 ha para el cultivo de papa, 2 ha que pueden ser habilitadas para la producción de hortalizas y 5 ha para el cultivo de Haba, siempre y cuando se habilite sistemas de riego empleando el agua del subsuelo.

La mayor parte de la producción de quinua es acopiada por los intermediarios, la que es comercializada en el mercado de la ciudad de Challapata (Oruro), lo que representa el 90% de la producción, el restante 10% es destinado al autoconsumo.

El control de plagas se realiza utilizando repelentes orgánicos como son la T'hola, que solo actúan como repelentes de polillas y ticonas, las dos plagas más importantes de la quinua, el control orgánico no ha sido muy eficiente por lo que muchos de los agricultores se han visto obligados a emplear insecticidas químicos no permitidos en la producción orgánica.

5.1.7.2 Ganadería

El suelo no cultivado es destinado al pastoreo de llamas, ovejas, cabras y burros. El pastoreo del ganado es conducido y extensivo dependiendo del ciclo agrícola. La comunidad de mejillones cuenta con aproximadamente 3030 llamas, 550 ovejas, 323 cabras y 300 Burros. Los camélidos y los ovinos son comercializados en los

mercados de la ciudad de Uyuni y Challapata del departamento de Oruro, siendo unos de los principales rubros que generan recursos económicos.

El control sanitario se efectúa esporádicamente de acuerdo al criterio de cada ganadero debido a que no se cuenta con asesoramiento técnico, para el control de los parásitos emplean el Ivomec. A pesar de contar con un baño antisarnico, este no es utilizado, por la falta de agua.

5.1.8 Sistemas de producción

Se tienen dos sistemas para el cultivo de la quinua: sistema de hoyos a mano y los sistemas semi-mecanizados con hoyos o con surcos.

La labranza mecanizada de las tierras se realiza normalmente el año anterior para permitir la acumulación de humedad en el suelo. En las laderas se procede directamente a la apertura de hoyos, después de la limpieza del terreno, sin preparación del terreno.

En la siembra se realiza la apertura de hoyos hasta encontrar algo de humedad, utilizando preferentemente la taquiza (herramienta típica de labranza de la zona). Sin embargo, en otros lugares, donde la mecanización está más avanzada, se siembra la quinua en surcos con tractor porque facilita ciertas labores. La época de siembra varía desde agosto hasta septiembre. La selección masal es una práctica común que realiza el agricultor, separando las mejores panojas para semilla. La cantidad de semilla utilizada varía de 8 a 12 Kg/Ha de acuerdo a la distancia entre los hoyos (50 – 100 cm.) y a la calidad de la semilla empleada. El uso de abonos naturales o químicos es poco común.

En el área existen alrededor de 34 ecotipos de quinua, de las cuales las más conocida y difundida es la variedad Blanca Real. El agricultor generalmente

siembra más de una variedad como estrategia para reducir los efectos negativos de las heladas.

Existen prácticas culturales como el uso de la T'hola y Pizarras para dar sombra después de la siembra. Cuando las plantas alcanzan aproximadamente 10 cm. se retira el sombreado para luego realizar el raleo y deshierbe.

La época apropiada de la cosecha es a partir del mes de abril. En la mayoría de los casos se efectúa la cosecha cortando la base del tallo manualmente, luego se procede al emparve y secado de los tallos, normalmente dentro de la misma parcela de siembra. La trilla se realiza generalmente desde el mes de mayo y la forma es la de pisado y frotado de las panojas sobre una lona y/o un piso de concreto o tierra dura. También se utilizan tractores o camiones para la trilla. El venteado (limpieza del grano) se realiza el mes siguiente a la cosecha, en forma manual y/o equipos manuales de venteo.

Después de la cosecha se deja la parcela en descanso por un período de 1-3 años, antes de volver a sembrar quinua.

Las plagas más importantes son: la polilla de la quinua (*Eurysacca melanocampta* Meyrick), complejo de las ticonas (*Heliothis titicaquensis*, *Spodoptera* sp. y *Copitarsia* sp). Insectos que muelen el grano y cortan las plantas tiernas, barrenador del tallo, conocido como “Kaspi churu” en quechua, bicho Moro o chitupa (probablemente *Epicauta willei*), conocido como “Challu challu” y pulgones (probablemente *Epitrix subcrinita*), conocido como “Piqui”.

Antes de la introducción de la mecanización las plagas aparentemente tenían poca presencia en la zona. El control se efectuaba principalmente con insecticidas elaborados por los propios productores (Muña, T'hola). La aplicación de los insecticidas tradicionales ya no da el resultado requerido y la mayoría de los productores actualmente recurren al uso de otros insecticidas sintéticos.

Las enfermedades más importantes son: el Mildiu (*Phonospora efusa*), la Podredumbre marrón del tallo (*Phoma* sp) y la Mancha foliar (*Ascochyta* sp)

Las comunidades con mayor extensión de siembra como son San Agustín, Alota, Cerro Gordo Mejillones y Todos Santos, presentan problemas de desertificación de suelos y es normal ver tierras marginales totalmente erosionadas, motivo por el cual los agricultores van habilitando tierras vírgenes, terminando de esta manera con la vegetación nativa y áreas de pastura que posteriormente será difícil solucionar este problema.

5.1.9 Educación

La comunidad de Mejillones de acuerdo a datos de la Dirección Distrital de Educación cuenta con una unidad educativa de nivel primario, la Unidad Educativa 1ro de Mayo, este establecimiento cuenta con un director y 3 profesores.

5.2 Parámetros físicos de la cuenca

5.2.1 Área y perímetro

La cuenca (Figura 5) tiene una extensión de 58 km², Vásquez *et al.* (s.f.) clasifica a esta unidad hidrográfica en base a los rasgos de área referenciales en una subcuenca por tener un área mayor a 50 km² y menor a 80 km². Por otro lado Villón (2002) la clasifica como una cuenca pequeña por presentar un área menor a 250 km². Al ser una cuenca pequeña responde a lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración.

Por otro lado la cuenca tiene un perímetro de 52 km de longitud.

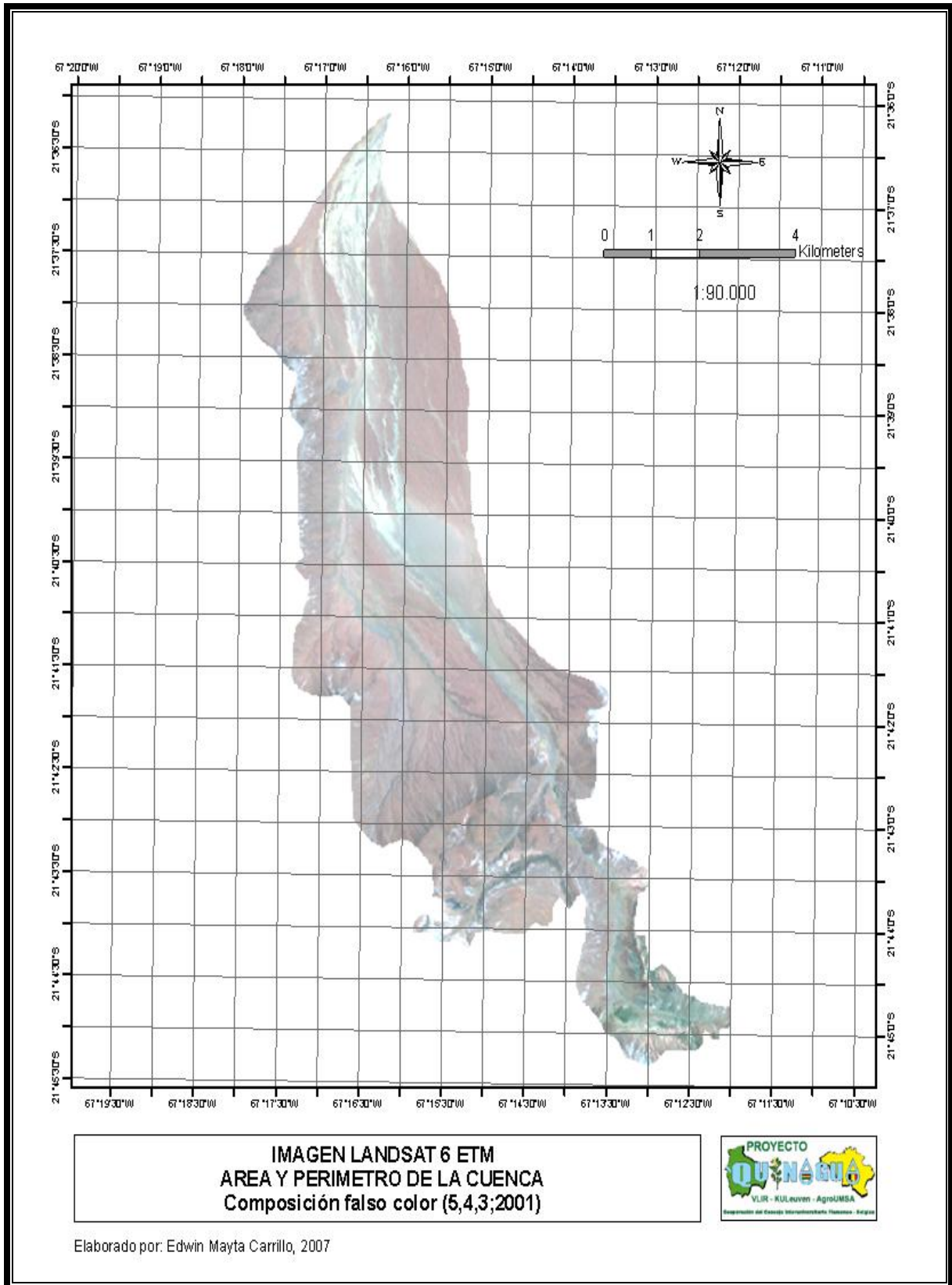


Figura 5. Área y perímetro de la cuenca digitalizado sobre un imagen satelital 6 ETM

5.2.2 Factor de forma

La cuenca tiene un factor de forma igual a 0,60, valor menor a la unidad, esto significa que la cuenca tiende una forma alargada, Villón (2002). señala que la cuenca tiene una menor probabilidad de presentar una tormenta intensa simultánea, sobre toda su extensión o sea tiene menos tendencia a concentrar las intensidades de lluvia.

5.2.3 Índice de compacidad (Índice de Gravelious)

El índice de compacidad de la cuenca es de 1.91, Villón (2002) menciona que cuencas alargadas tienen un índice de compacidad mayor a uno, las cuencas de forma alargada reducen las probabilidades, de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta, lo que afecta el tipo de respuesta que se presenta en el río.

5.2.4 Rectángulo equivalente

El rectángulo equivalente (Figura 6), muestra que entre los 3840 y 3900 m.s.n.m. (zona baja de la cuenca) se registra un área parcial de 22,6 km² siendo el mayor dentro la cuenca, por otro lado el área parcial menor se registra entre los 4100 a 4200 m.s.n.m. (zona alta de la cuenca) siendo 6,98 km².

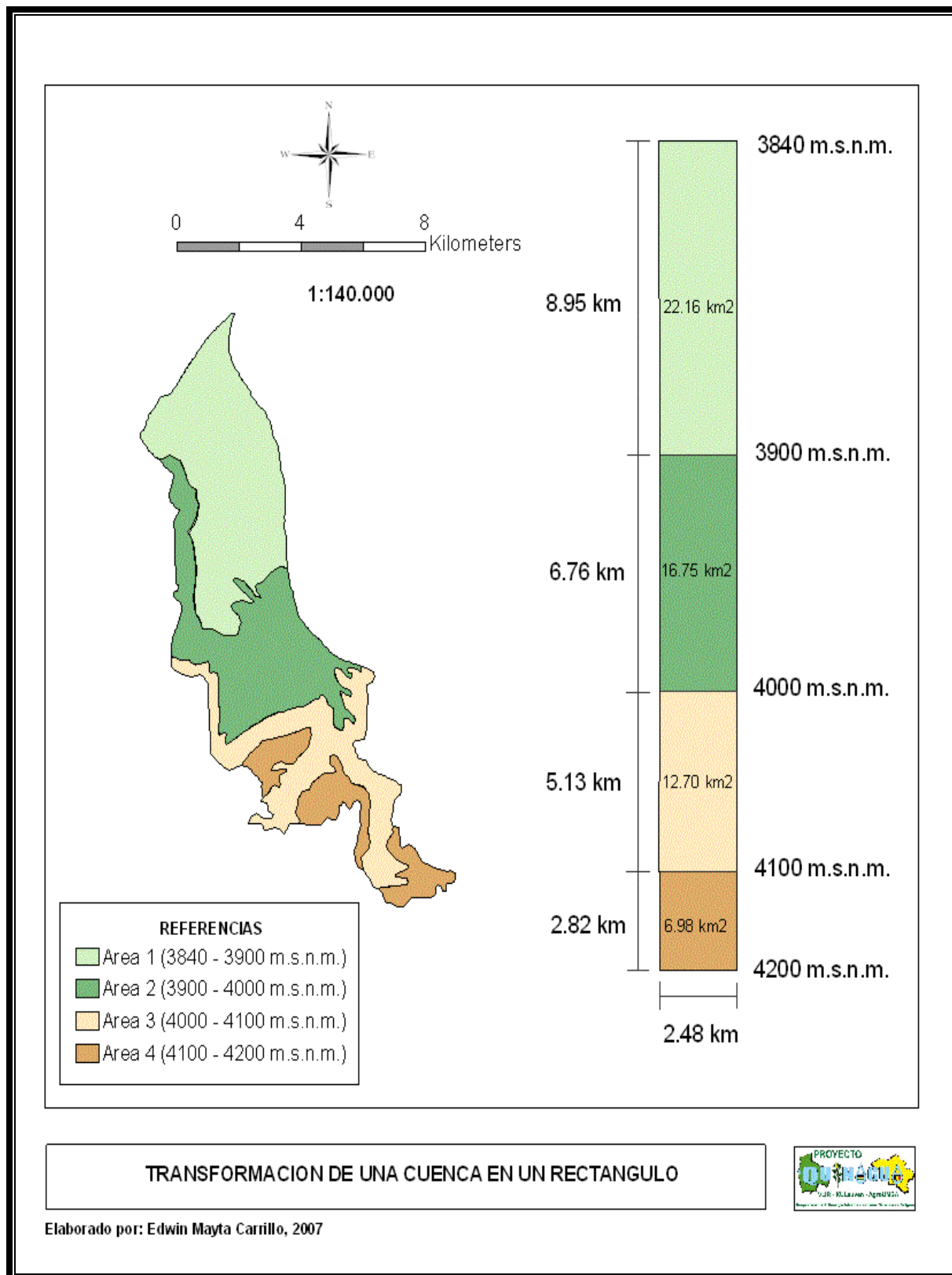


Figura 6. Transformación de la cuenca en un rectángulo equivalente

5.3 Geomorfología de la cuenca

5.3.1 Geología

La distribución de las unidades geológicas de la cuenca, se muestra en el anexo 14. La cuenca geológicamente se halla compuesta por dos tipos formaciones rocosas, la primera formada de rocas sedimentarias del terciario, la cual se extiende por la cuenca en 53 km², que corresponde al 91% del área total de la cuenca. La segunda formada por rocas pertenecientes al Cuaternario, la cual se extiende por la cuenca en 5 km², formando el 9% del área total de la cuenca.

El ZONISIG (2000) menciona que las rocas sedimentarias del Terciario se encuentran distribuidas en los bordes de la cuenca del río Grande de Lípez, estos se caracterizan por exponer areniscas rojizas, conglomerados, lutitas, margas y siltitas.

También indica que en el departamento de Potosí se encuentran depósitos superficiales pertenecientes al Cuaternario, los mismos que pueden ser de origen aluvial, eólico, coluvial, glacial y fluvio-lacustre.

5.3.2 Relieve y topografía

Las unidades de terreno están agrupadas por provincias fisiográficas y descritas a nivel de gran paisaje, con base en el grado de disección, la litología y la amplitud de relieve. En este documento se ha usando los siguientes rangos: para montañas y serranías: alta, más de 1000 m; media, 500 a 1000 m y para baja, menos de 500 m. para colinas: más de 150 m; media, 75 a 150 m, y baja, menos de 75 m (SONISIG, 2000).

Dentro la cuenca se puede distinguir 4 unidades de terreno, la distribución de estas unidades se muestra en el anexo 15, donde, se observa que la unidad de terreno

105 corresponde a un paisaje de montaña media, el cual se encuentra el gran paisaje de montañas en la Cordillera Occidental, cubre 3 km² de superficie de la cuenca.

La unidad de terreno 116 corresponde a un paisaje de serranía media, el cual se encuentra el gran paisaje de serranías en la Cordillera Occidental, cubre 21 km² de superficie de la cuenca.

La unidad de terreno 238 corresponde a un paisaje de superficie de erosión, el cual se encuentra el gran paisaje de planicies en el Altiplano, cubre 0.3 km² de superficie de la cuenca.

La unidad de terreno 270 corresponde a un paisaje de llanura aluvial, el cual se encuentra el gran paisaje de llanuras en el Altiplano, cubre 33.7 km² de superficie de la cuenca.

5.3.3 Suelo

En el departamento de Potosí se identificaron 46 unidades de suelo, 4 de ellas se encuentran en la cuenca Mejillones (Anexo 16), 3 km² se halla formado por Consociación Leptosoles, 21 km² por consociación Leptosoles con inclusión Regosoles, 0,3 km² por consociación Cambiosoles y 33,7 km² por asociación Calcisoles-Fluvisoles.

En base a los estudios realizados en el departamento de Potosí por el SONISIG (2000) se explica de un modo general los grandes grupos de suelos.

Los Leptosoles son suelos poco desarrollados, superficiales y limitados por estratos de rocas intemperizadas o roca no alterada. Por lo general son variables en textura, estructura y color, dependiendo del material parental y el clima. Son suelos en los que se encuentran los horizontes A-R o A-C-R; el horizonte A es poco profundo.

Estos suelos generalmente se encuentran en las cimas y pendientes de montañas y serranías fuertemente disectadas.

Los regosoles son suelos jóvenes formados a partir de materiales no consolidados, en ellos predominan los horizontes A ócrico o úmbrico y C, sin otra propiedad diagnóstica más que la del material parental. Son frecuentes tanto en relieves planos como en las pendientes inferiores de las formaciones montañosas. El desarrollo del perfil es débil a consecuencia del tiempo de formación y/o formación lenta por bajas temperaturas, sequías prolongadas o erosión natural. Las características morfológicas se determinan por el tipo de material parental.

Los Fluvisoles son suelos formados por la deposición de materiales aluviales, que generalmente sufren inundaciones periódicas. Los horizontes comúnmente identificados son A mólico, ócrico o úmbrico, H hístico y el horizonte C. En general son débilmente estructurados o sin estructura; las propiedades gleycas son comunes en los horizontes más profundos (pobrementemente drenados). Generalmente este tipo de suelos se encuentra en terrazas y llanuras aluviales.

Los calcisoles son suelos bien desarrollados, comunes en regiones áridas o semiáridas, formados básicamente por un proceso de translocación de carbonatos de calcio desde los horizontes superficiales a un horizonte de acumulación a cierta profundidad en el perfil, principalmente en sedimentos aluviales, lacustrinos y coluviales; en material rico en bases y en relieves plano u ondulado. Presentan una estructura de moderada a fuerte, en bloques a prismas. El desarrollo del perfil es de los horizontes A, B (t-k), C (k); el horizonte A es ócrico sobre un B cámbico o árgico.

Generalmente son suelos moderadamente profundos y de texturas finas, aunque también hay suelos poco profundos en casos cuando se presenta una capa cementada por carbonato cálcico de estructura laminar o masiva, impidiendo el paso de raíces, típicos en zonas de relieve plano a ondulado y régimen de humedad árido, con vegetación de matorral xerofítico ralo y espinoso, distribuidas

en las provincias fisiográficas de la Cordillera Oriental y el Altiplano representando una superficie de 10.748 km², que es 7% del total del departamento.

Los Cambisoles son suelos que se encuentran en proceso de “cambio”, en su color, estructura y/o textura, que no llegan a un B árgico, nátrico, cálcico, espódico o ferrálico. Están formados a partir de una diversidad de rocas "in situ", como también de depósitos aluviales y coluviales. Se los encuentra en relieves plano a fuertemente escarpado, en diferentes tipos de climas y con diversidad de vegetación. Generalmente se identifican en éstos suelos los horizontes A-Bw-C. Los Cambisoles se hallan distribuidos en el Altiplano, Cordillera Oriental y Occidental y cubren una superficie de 38.071 km², que representa 32% del total del departamento.

5.4 Dinámica del flujo de agua superficial

Los valores de caudal registrados en el punto de aforo se muestran en el cuadro 6 y en la figura 10. Se observa que las aguas del río Quetena en este punto, presenta un comportamiento heterogéneo. En la época húmeda se registra un leve incremento del caudal atribuible al escurrimiento producido por la precipitación, por el contrario en la época seca se ve aun un incremento mayor del caudal, dado que este río se origina en la Cordillera Occidental a altitudes próximas o superiores a los 5000 m.s.n.m., con 165 km de longitud y al ser alimentado en sus nacientes por vertientes (Servicio de Hidrografía Naval, 1998), se deduce que este incremento es resultado de la regulación subterránea.

A su vez Chaffaut, citado por Olivera *et al.* (2006) señala que el caudal de nacientes y ríos es independiente de las precipitaciones, donde menos del 20% del escurrimiento actual proviene de las precipitaciones. Por tanto no son las lluvias actuales las que alimentan esas vertientes.

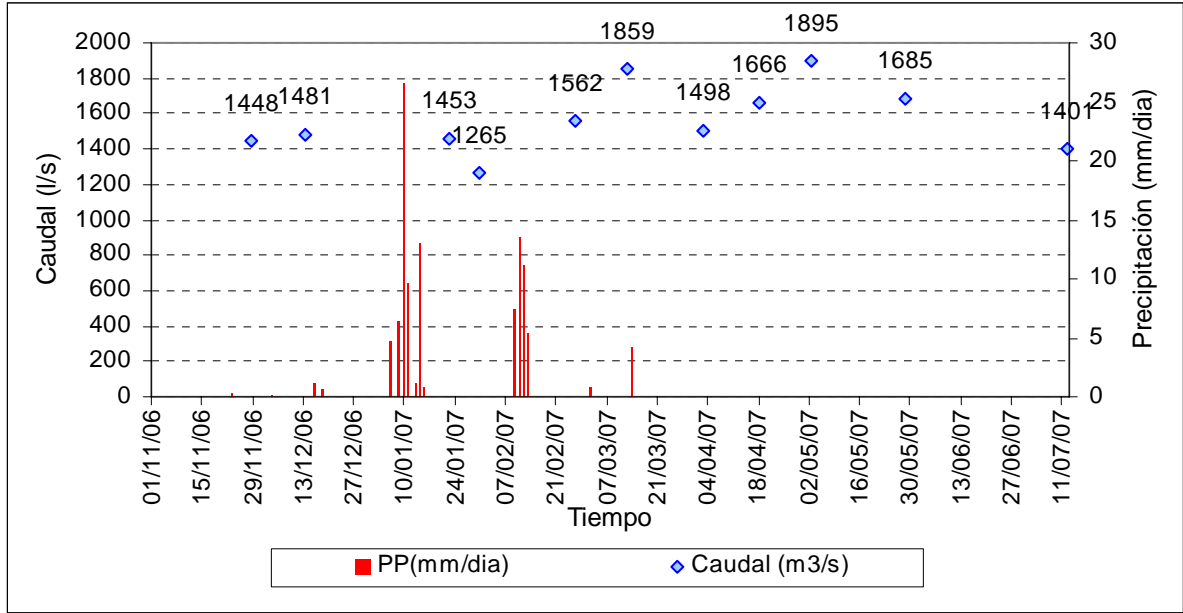


Figura 7. Comparación del caudal del río Quetena con la precipitación

Cuadro 6. Caudales del río Quetena registrados en el periodo 06/07

| Fecha | Caudal (l/s) |
|-----------------|--------------|
| 28-Nov-06 | 1448 |
| 13-Dic-06 | 1481 |
| 22-Ene-07 | 1453 |
| 30-Ene-07 | 1265 |
| 26-Feb-07 | 1562 |
| 12-Mar-07 | 1859 |
| 02-Abr-07 | 1498 |
| 18-Abr-07 | 1666 |
| 02-May-07 | 1895 |
| 28-May-07 | 1685 |
| 12-Jul-07 | 1401 |
| Promedio | 1565 |

Además Olivera *et. al.* (2006) menciona que los promedios de 15 años de caudales mensuales del río Salado ubicado en el norte chileno, al oeste de Laguna Colorada, en el Sifon Ayquina, muestran que el flujo promedio anual es del orden de 1,5 m³/s y que el caudal del río es virtualmente constante durante todo el año, con excepción de febrero. A pesar de que no llueve durante la mayor parte del año, el valor del caudal es constante, por tanto se tiene como única explicación posible la existencia de regulación subterránea. Es decir, que las aguas superficiales provienen de fuentes subterráneas.

El río Quetena transporta un promedio de 1565 l/s, Motes de Oca (2005) menciona que un aforo del río Alota 100 m al sur de su confluencia con el río Quetena dio 370 l/s. Por otro lado Ramos (1999), realizó un estudio de los recursos hídricos del cantón San Agustín, Provincia Enrique Baldivieso, donde determinó que las aguas del río San Agustín presenta un caudal de 137 l/s en la época de lluvias y 7.5 l/s en la época seca, por ende se habla de uno de los ríos mas importantes de la zona.

La Prefectura del Departamento de Potosí (2006) menciona que pese a que la precipitación anual en la provincia Enrique Baldivieso es muy reducida, los ríos más grandes son permanentes, lo que significa, que sus aguas provienen del aporte de los acuíferos adyacentes.

5.5 Dinámica del flujo de agua subsuperficial

La descripción de los puntos de muestreo de suelo, de parcelas de quinua se muestra en el anexo 17. Respecto a los puntos de muestreo de parcelas en descanso estos se describen en el cuadro 8 de anexos.

5.5.1 Validación del programa BUDGET

En la figura 11 se observa el comportamiento de la humedad de 8 parcelas de quinua, vemos que la humedad del suelo observado como el modelado presentan tendencias similares a excepción de algunas fechas en los cuales los valores de humedad no concuerdan, dado que los valores de humedad del suelo para un mismo suelo y profundidad pueden mostrar notoria variación (Baver *et al.* 1991), se puede indicar estos datos son confiables.

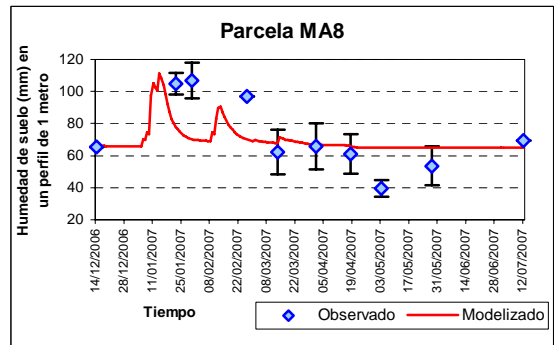
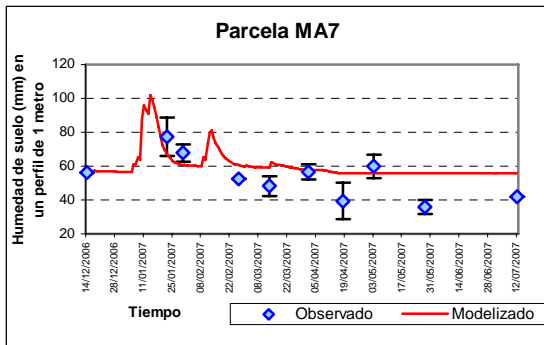
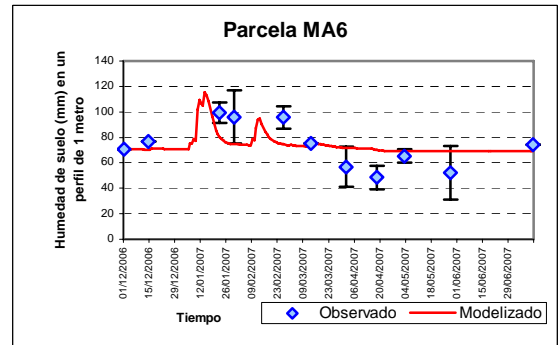
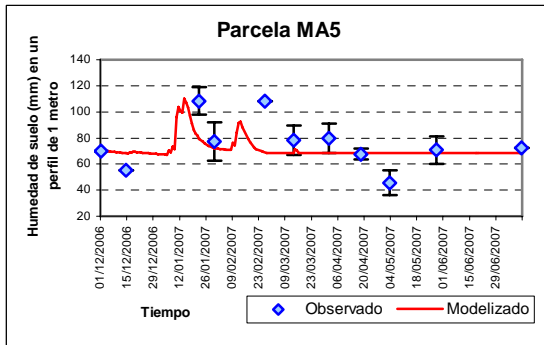
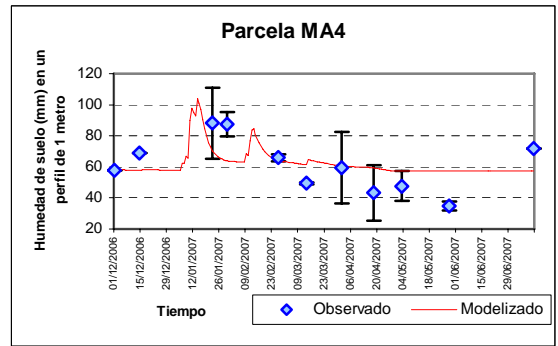
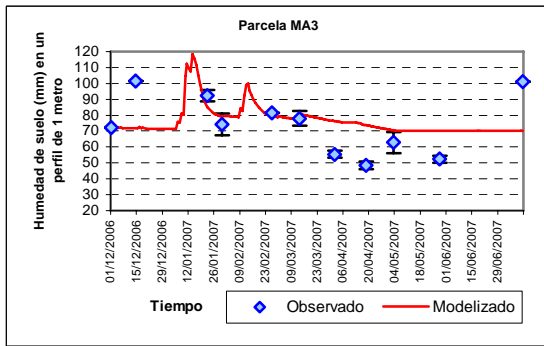
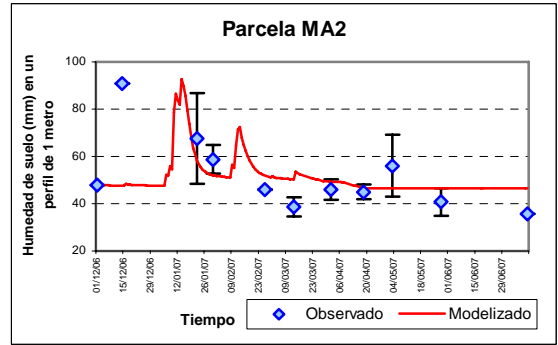
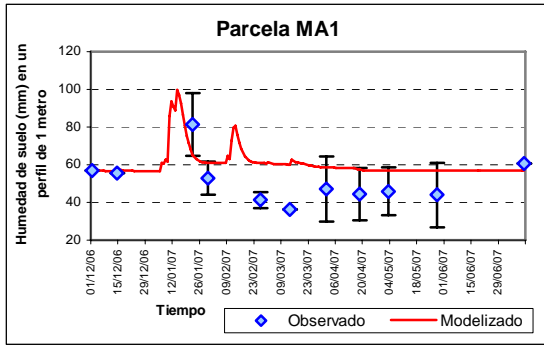


Figura 8. Simulación de la humedad de suelo de 8 parcelas de quinua

En el cuadro 7 cuadro se presenta los resultados de la prueba de correlación entre la humedad observada y la humedad simulada de parcelas de quinua a un nivel de significancia del 5%. La parcela MA1, Ma2, MA3 y MA5 presentan una correlación no significativa respecto a la humedad de suelo observado y simulado. A su vez la parcela MA4, MA6, MA7, MA8 y MA9 tienen una correlación significativa entre la humedad de suelo observado y simulado.

Cinco de las nueve parcelas tienen una correlación significativa, por tanto se recomienda el uso de del modelo BUDGET para la zona de estudio.

Cuadro 7. Grado de correlación entre la humedad observada y simulada de parcelas de quinua

| Parcela | Coefficiente de correlación calculado (rc) | Coefficiente de correlación tabulado (rt) | Nivel de significancia. (5%) |
|---------|--|---|------------------------------|
| MA1 | 0,44 | 0,602 | Ns |
| MA2 | 0,26 | 0,602 | Ns |
| MA3 | 0,19 | 0,602 | Ns |
| MA4 | 0,65 | 0,602 | * |
| MA5 | 0,58 | 0,602 | Ns |
| MA6 | 0,77 | 0,602 | * |
| MA7 | 0,77 | 0,632 | * |
| MA8 | 0,81 | 0,632 | * |
| MA9 | 0,75 | 0,666 | * |

Respecto a las parcelas en descanso la figura 12 muestra el comportamiento de la humedad de suelos observado y simulado de 6 parcelas. Se ve que la humedad de suelo observado tiene una tendencia similar a la humedad simulada.

Las pruebas de correlación entre la humedad de suelo observado y simulado (Cuadro 8), muestra que la parcela MB1, MB3; MB4 y MB6 presentan una correlación no significativa. Por otro lado la parcela MB5 y MB7 presenta una correlación significativa.

Dos de las seis parcelas tienen una correlación significativa, por tanto no se recomienda el uso de del modelo BUDGET para suelo que se hallan en barbecho.

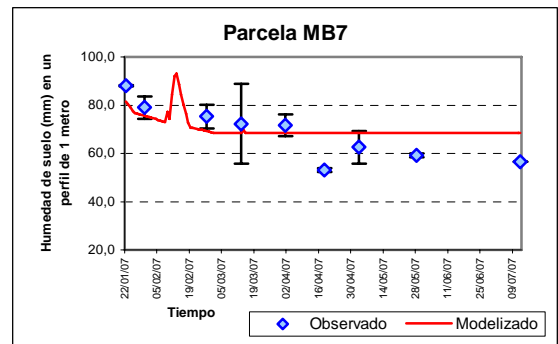
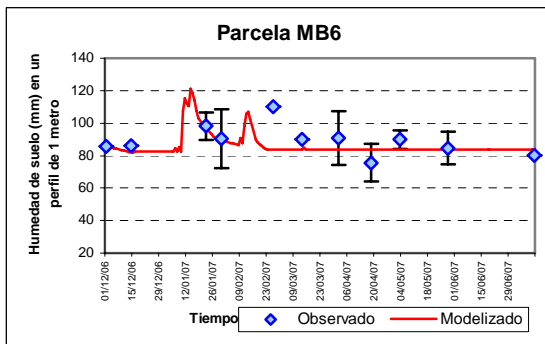
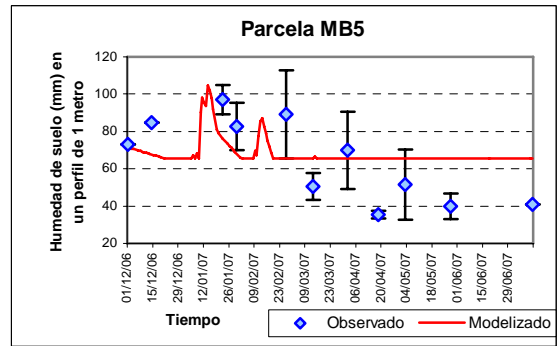
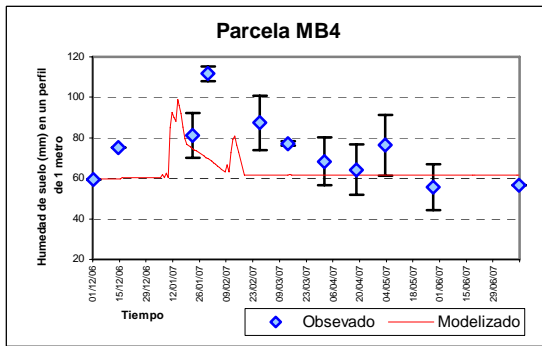
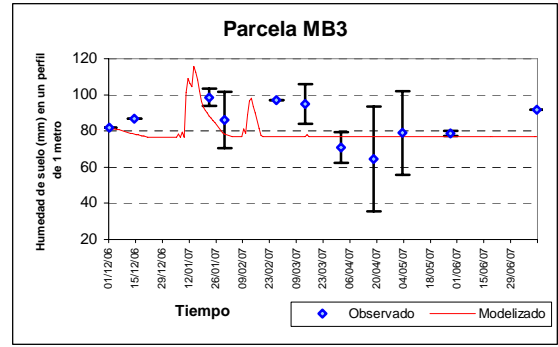
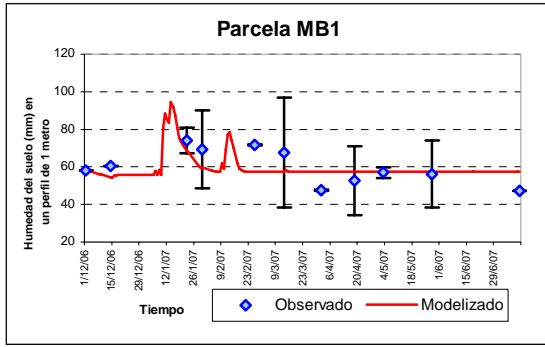


Figura 9. Simulación de la humedad de suelo de 6 parcelas en descanso

Cuadro 8. Grado de correlación entre la humedad observada y simulada de parcelas en descanso

| Código | Coefficiente de correlación calculado (rc) | Coefficiente de correlación tabulado (rt) | Nivel de significancia (5%) |
|--------|--|---|-----------------------------|
| MB1 | 0,51 | 0,602 | Ns |
| MB3 | 0,40 | 0,602 | Ns |
| MB4 | 0,57 | 0,602 | Ns |
| MB5 | 0,63 | 0,602 | * |
| MB6 | 0,32 | 0,602 | Ns |
| MB7 | 0,94 | 0,666 | * |

5.5.2 Monitoreo de la humedad en parcelas de quinua

El comportamiento y valores de la humedad del suelo de parcelas de quinua se muestra en la figura 13 y cuadro 9 respectivamente, se advierte que el flujo de agua entre parcelas en variado entre las diferentes parcelas.

El contenido de humedad de las parcelas: MA3, MA6, MA5 y MA8 se encuentran dentro del rango de capacidad de campo (201,7 mm) y punto de marchitez permanente (45,8 mm). Dado que la diferencia entre los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente representa la humedad del suelo que la planta puede aprovechar (Baver *et al.*, 1991), se puede indicar que estas parcelas presentan contenidos de humedad que son aprovechables por el cultivo de quinua.

La parcela MA1 y MA2, en los meses de febrero y marzo presentan contenidos de humedad que se hallan por debajo del punto de marchitez permanente, por ende no son utilizables por el cultivo de quinua, debido a que el contenido de humedad por debajo de este valor no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas (Allen *et al.*, 2006).

Respecto a las parcelas MA4, MA7 y MA9 presenta valores de humedad cercana y/o por debajo del punto de marchitez permanente en algunos meses. Estos niveles de humedad, no repercuten de manera negativa el en cultivo de quinua, ya que estos valores se registraron fuera del ciclo de cultivo.

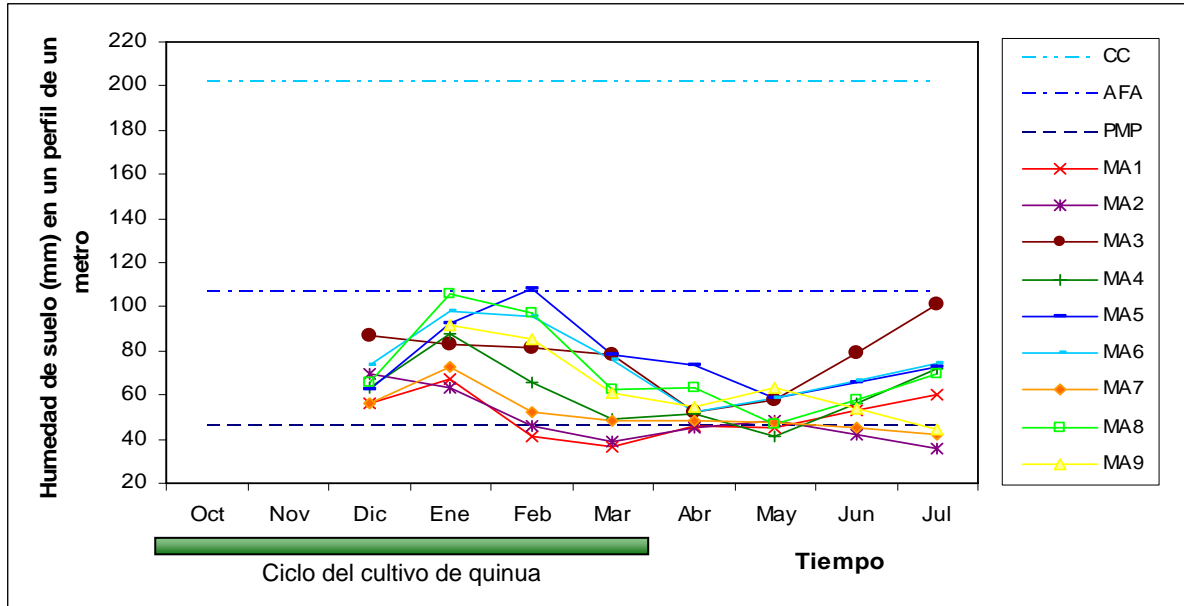


Figura 10. Fluctuaciones de la humedad del suelo de parcelas de quinua

Cuadro 9. Estados de humedad del suelo en parcelas de quinua

| Parámetros (mm) | Meses | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul |
| CC | 201,7 | 201,7 | 201,7 | 201,7 | 201,7 | 201,7 | 201,7 | 201,7 |
| AFA | 106,6 | 106,6 | 106,6 | 106,6 | 106,6 | 106,6 | 106,6 | 106,6 |
| PMP | 45,8 | 45,8 | 45,8 | 45,8 | 45,8 | 45,8 | 45,8 | 45,8 |
| MA1 | 56,2 | 67,1 | 41,2 | 36,3 | 45,8 | 45,0 | 52,8 | 60,5 |
| MA2 | 69,3 | 63,2 | 45,9 | 38,7 | 45,5 | 48,4 | 42,1 | 35,8 |
| MA3 | 86,9 | 83,2 | 81,6 | 78,0 | 52,0 | 57,6 | 79,4 | 101,1 |
| MA4 | 63,6 | 87,8 | 65,9 | 49,5 | 51,4 | 41,2 | 56,5 | 71,8 |
| MA5 | 62,6 | 92,8 | 108,2 | 78,3 | 73,7 | 58,3 | 65,3 | 72,4 |
| MA6 | 73,9 | 97,7 | 95,7 | 75,5 | 52,6 | 58,8 | 66,5 | 74,3 |
| MA7 | 56,2 | 72,5 | 52,6 | 48,3 | 48,0 | 47,9 | 44,9 | 41,9 |
| MA8 | 65,3 | 105,8 | 97,0 | 62,3 | 63,4 | 46,6 | 58,1 | 69,6 |
| MA9 | - | 91,9 | 85,7 | 60,9 | 54,9 | 63,4 | 54,0 | 44,6 |

Por otro lado, haciendo referencia al umbral del agua fácilmente aprovechable (AFA) cuyo valor está representado por 106,6 mm, se observa que todas las parcelas se hallan por debajo de este umbral, con excepción de la parcela MA5 cuyo valor es mayor (108,2 mm) en el mes de febrero. Dado que el AFA es la

fracción de agua total disponible (ADT) que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico (Allen *et al.*, 2006), se puede afirmar que estas parcelas se hallan sumidas en un constante estrés hídrico.

Espíndola, citado por Ramos (2000) menciona que la fase fenológica de prefloración es la mas susceptible al déficit hídrico, para el rendimiento en grano, a su vez Huiza (1994) da a conocer que la etapa fenológica mas susceptible al déficit hídrico es el de grano lechoso, por su parte Jacobsen *et al.* citado por Ramos (2000) señala que en quinua la fases fonológicas más susceptibles a la sequía, para el rendimiento de grano son: la vegetativa, antesis y llenado de grano.

La figura 14 y cuadro 10 muestra el comportamiento del contenido de agua en parcelas de quinua a diferentes profundidades. Se observa que el suelo presenta una gran variación del contenido de agua en los diferentes estratos del perfil del suelo respecto al tiempo, Narro (1994) indica que el contenido de humedad del suelo es muy variable, tanto en tiempo para un mismo punto, como en distancia y profundidad para un tiempo dado.

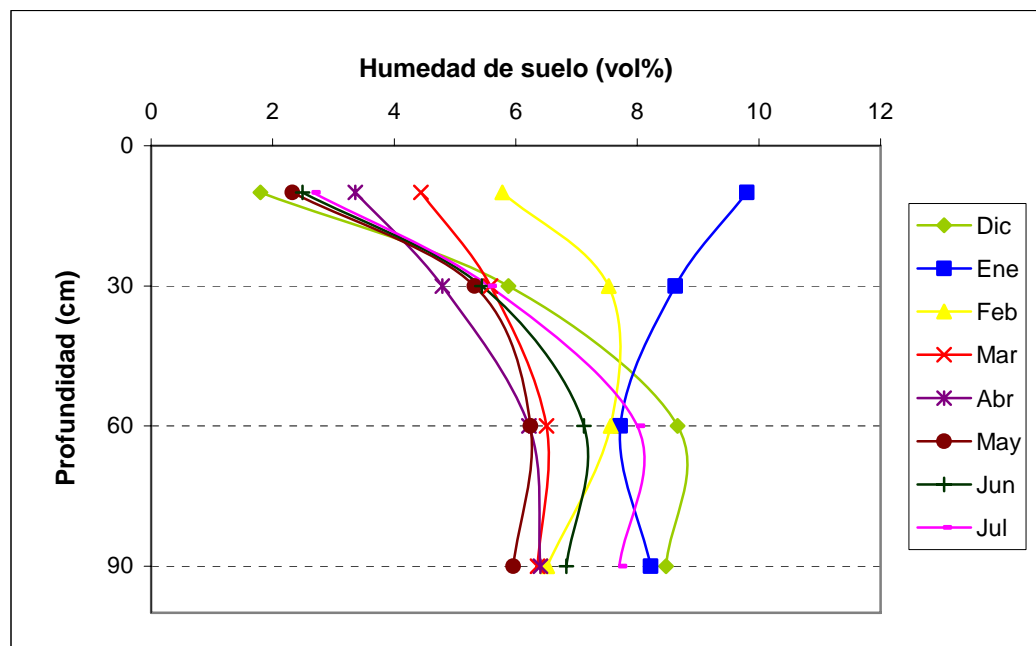


Figura 11. Comportamiento de la humedad en el perfil del suelo de parcelas de quinua

Cuadro 10. Promedios de humedad de suelo de parcelas de quinua

| Profundidad (cm) | Humedad de suelo (Vol%) | | | | | | | |
|------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | D | E | F | M | A | M | J | J |
| 10 | 1,8 | 9,8 | 5,8 | 4,4 | 3,4 | 2,3 | 2,5 | 2,7 |
| 30 | 5,9 | 8,6 | 7,5 | 5,6 | 4,8 | 5,3 | 5,4 | 5,6 |
| 60 | 8,7 | 7,7 | 7,6 | 6,5 | 6,2 | 6,2 | 7,1 | 8,0 |
| 90 | 8,5 | 8,2 | 6,5 | 6,4 | 6,4 | 6,0 | 6,8 | 7,7 |

Por otro lado, se advierte una mayor fluctuación en la superficie del suelo, a 10 centímetros de profundidad, sobre todo en la época húmeda. El grado fluctuación va disminuyendo con la profundidad, siendo menor en los estratos inferiores, a esto Baver *et al.* (1991) menciona que la superficie del suelo esta sujeta a grandes fluctuaciones del contenido de agua, como efecto de la precipitación y la evaporación, quedando amortiguadas a una profundidad mayor.

El cuadro 11, muestra los valores de densidad aparente y textura de parcelas de quinua a diferentes profundidades, según Narro (1994) la capacidad de retención de humedad de los suelos está íntimamente relacionada con la porosidad y con el diámetro de los poros; éstos, a su vez, dependen de la textura, del contenido de materia orgánica y de otras características físicas del suelo.

Cuadro 11. Densidad aparente y textura de suelo a diferentes profundidades en parcelas de quinua

| Profundad (cm) | Dap (g/cc) | Textura |
|----------------|------------|----------------|
| 10 | 1,6 | Franco arenoso |
| 30 | 1,5 | Franco arenoso |
| 60 | 1,5 | Franco arenoso |
| 90 | 1,4 | Franco arenoso |

El valor de densidad aparente del suelo a 10 centímetros de profundidad es de 1,6 g/cc, este valor disminuye a mediada que la profundidad aumenta, llegando a tener un valor de 1,4 g/cc a 90 centímetros de profundidad. Dado que un incremento en

el valor de la densidad aparente manifiesta la disminución del espacio poroso y una mayor compactación de la superficie del suelo, que reduce la pérdida de agua por evaporación (Narro, 1994), de ahí que la mayor concentración de agua se registra en las capas inferiores del suelo.

Con referencia a la textura del suelo, estas parcelas presentan suelos de textura franco arenosa en sus diferentes estratos (10, 30, 60 y 90 cm de profundidad), Gallegos del Tejo (1997) menciona que los suelos arenosos no retienen agua ni los cationes y son muy permeables, teniendo una capacidad reducida de retención de agua, debido a esta situación los suelo de la zona de estudio presentan reducidos niveles de humedad.

En la figura 14 se observa la influencia del medio ambiente y del cultivo sobre la humedad del suelo, en un perfil de un metro. Estos valores se presentan en el cuadro 12.

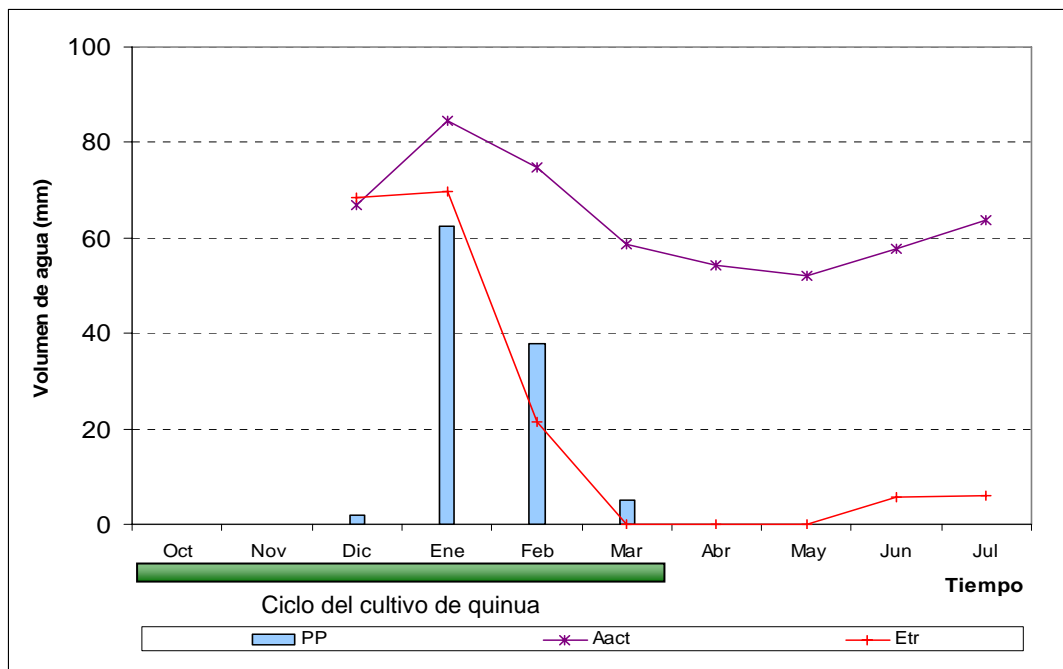


Figura 12. Efecto del medio ambiente y del cultivo sobre la humedad de suelo en parcelas de quinua

Cuadro 12. Precipitación (PP), evapotranspiración real (ETr) y humedad de suelo en parcelas de quinua

| Parámetro (mm) | Meses | | | | | | | |
|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul |
| PP | 2.0 | 62.4 | 37.7 | 5.0 | - | - | - | - |
| ETr | 68.5 | 69.6 | 21.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.8 | 5.9 |
| H°S° | 66.8 | 84.7 | 74.9 | 59.6 | 54.2 | 51.9 | 57.7 | 63.6 |

Los niveles mas altos de humedad se registran en el periodo de lluvias, diciembre a marzo, siendo mayor en el mes de enero (84,7 mm) como resultado de una elevada precipitación (62.4 mm), dado que la precipitación es la fuente primaria de agua de la superficie terrestre (Villón, 2002), se puede indicar que la precipitación tiene una influencia directa sobre la humedad del suelo.

Con forme va pasando el tiempo la humedad del suelo va disminuyendo, registrándose el menor nivel de humedad en el mes de mayo (51,9 mm), pero en el mes de junio y julio tiene un asenso, esto demuestra que la precipitación no es la única fuente de agua que realiza aportes al suelo.

La reducción de la humedad del suelo en la zona radicular según Allen *et al.* (2006), es resultado del consumo de agua por parte del cultivo, por otro lado Medina, citado por Alba (1995) menciona que la atmósfera que envuelve a las plantas, al no estar saturada de agua, ejerce una presión de succión tanto en el suelo como en las plantas, por consiguiente hay un flujo de agua en la dirección suelo-planta-atmósfera, por lo que dentro el ciclo de cultivo de la quinua, el consumo de agua se ve representado por la evapotranspiración real del cultivo de quinua (ETr). Y en los meses posteriores esta sujeta a la evaporación del agua contenida en el suelo debido a que la parcela pierde su cobertura vegetal.

5.5.3 Monitoreo de la humedad de suelo en parcelas en descanso

La figura 13, muestra la fluctuación de la humedad del suelo de 6 parcelas en descanso. Se observa una gran variación del contenido de agua entre las diferentes parcelas respecto al tiempo. Los valores de humedad se presentan en el cuadro 13.

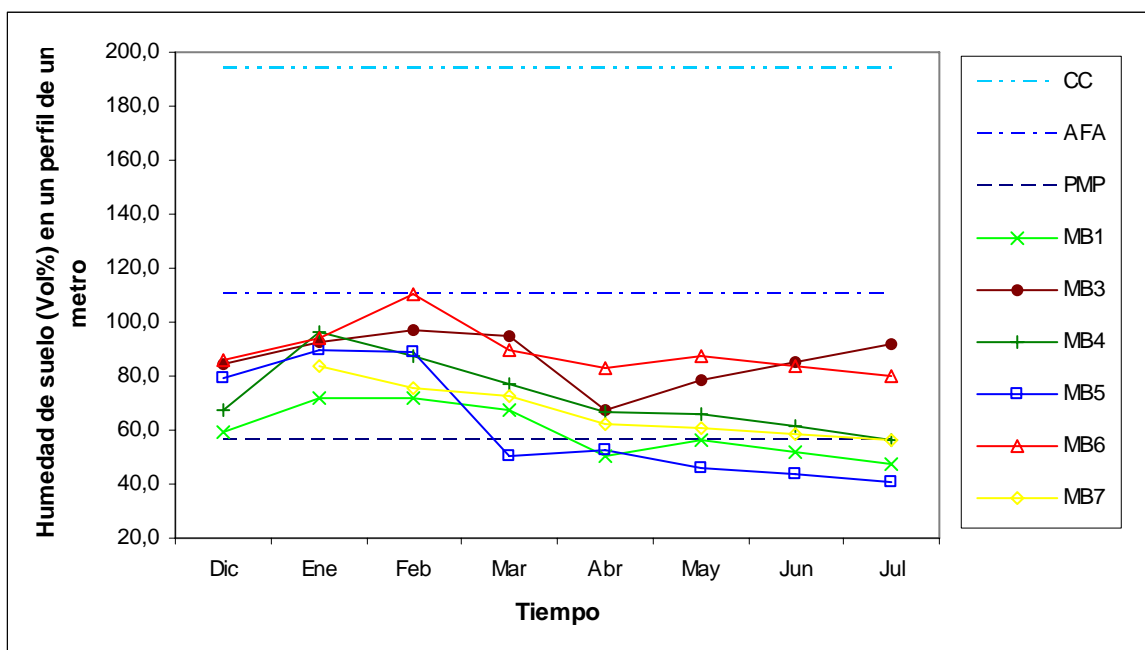


Figura 13. Fluctuaciones de la humedad de suelo de parcelas en descanso

Cuadro 13. Estados de humedad del suelo de parcelas en descanso

| Parámetros (mm) | Meses | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul |
| CC | 194,3 | 194,3 | 194,3 | 194,3 | 194,3 | 194,3 | 194,3 | 194,3 |
| AFA | 110,1 | 110,1 | 110,1 | 110,1 | 110,1 | 110,1 | 110,1 | 110,1 |
| PMP | 56,3 | 56,3 | 56,3 | 56,3 | 56,3 | 56,3 | 56,3 | 56,3 |
| MB1 | 59,3 | 71,6 | 71,7 | 67,7 | 50,1 | 56,6 | 51,8 | 47,1 |
| MB3 | 84,3 | 92,3 | 97,2 | 95,0 | 67,6 | 78,8 | 85,3 | 91,7 |
| MB4 | 67,4 | 96,5 | 87,5 | 77,1 | 66,3 | 66,0 | 61,3 | 56,5 |
| MB5 | 79,0 | 89,9 | 89,1 | 50,5 | 52,7 | 45,7 | 43,3 | 41,0 |
| MB6 | 85,8 | 94,2 | 110,2 | 90,0 | 83,3 | 87,3 | 83,7 | 80,2 |
| MB7 | - | 83,6 | 75,3 | 72,3 | 62,3 | 60,9 | 58,8 | 56,6 |

Las parcelas MB3, MB4, MB6 y MB7 presentan contenidos de humedad, que se hallan entre los límites de campo (194,3 mm) y punto de marchitez permanente (56,3 mm). Dado que la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente representa el total de agua disponible

(ADT) que un cultivo puede extraer de su zona radicular (Allen *et al.*, 2006), se puede indicar que estos niveles de humedad son aprovechables por los cultivos.

La parcela MB5 y MB1, a partir del mes de febrero y marzo respectivamente reducen su contenido de humedad, a tal punto de encontrarse por debajo del punto de marchitez permanente, por tanto no son aprovechables por las plantas.

Por otro lado, haciendo referencia al umbral del agua fácilmente aprovechable (AFA) cuyo valor esta representado por 110,1 mm, se observa que todas las parcelas se hallan por debajo de este umbral, con excepción de la parcela MB6 cuyo valor es similar (108,2 mm) en el mes de febrero.

En la figura 17 y cuadro 14 se observa el comportamiento de la humedad del suelo en parcelas en descanso a diferentes profundidades. Se advierte mucha variación del contenido de agua en los diferentes estratos del perfil del suelo respecto, Baver *et al.* (1991) indica que los valores de humedad del suelo para un mismo suelo y profundidad pueden mostrar notoria variación.

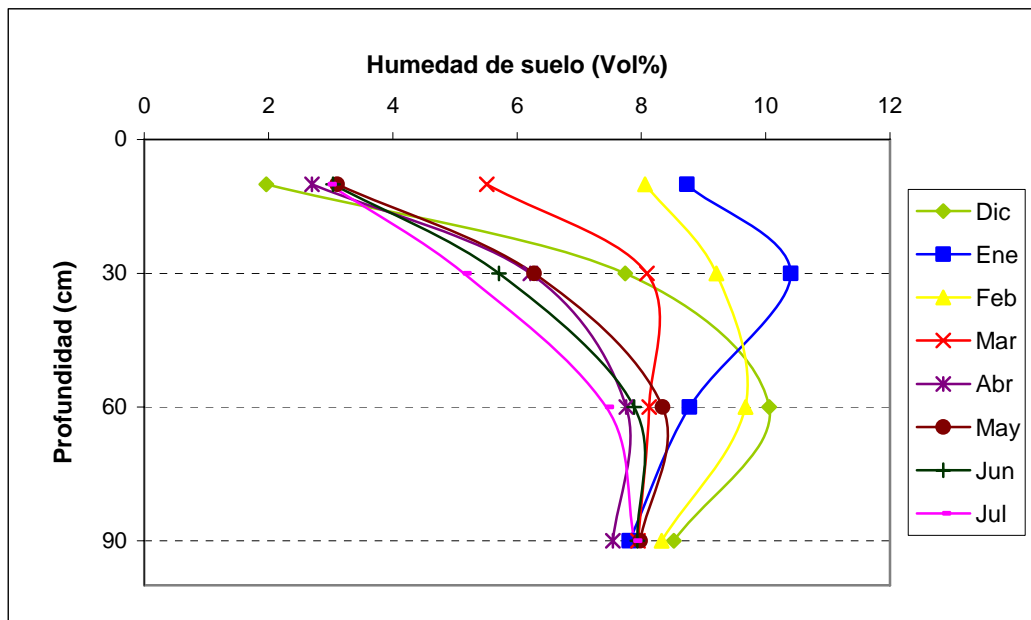


Figura 14. Comportamiento de la humedad en el perfil del suelo de parcelas en descanso

Cuadro 14. Promedios de humedad de suelo de parcelas en descanso

| Profundad (cm) | Humedad de suelo (Vol%) | | | | | | | |
|-------------------|-------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | D | E | F | M | A | M | J | J |
| 10 | 2,0 | 8,7 | 8,1 | 5,5 | 2,7 | 3,1 | 3,0 | 3,0 |
| 30 | 7,7 | 10,4 | 9,2 | 8,1 | 6,2 | 6,3 | 5,7 | 5,1 |
| 60 | 10,1 | 8,8 | 9,7 | 8,1 | 7,8 | 8,3 | 7,9 | 7,4 |
| 90 | 8,5 | 7,8 | 8,3 | 7,9 | 7,5 | 8,0 | 7,9 | 7,9 |

A mediada que aumenta la profundidad del suelo el contenido de agua en este también se incrementa. Los niveles de humedad mas bajos se presentan a 10 centímetros de profundidad, esto se debe a que la superficie del suelo se halla expuesta al ambiente, por ende el agua del suelo se evapora con mayor rapidez, a su vez Fitz (1996) menciona que la humedad retenida en el suelo se pierde principalmente por la evaporación.

En los meses de enero febrero y marzo no se repite este fenómeno, ya que en estos meses se registran precipitaciones.

Por otro lado, se advierte una mayor fluctuación de la humedad en la superficie del suelo, a 10 centímetros de profundidad, sobre todo en la época húmeda. El grado fluctuación va disminuyendo con la profundidad, siendo menor en los estratos inferiores, Baver *et al.* (1991), atribuye este efecto a la precipitación y la evaporación, que quedan amortiguadas a una profundidad mayor.

El cuadro 15, muestra los valores de densidad aparente y textura de parcelas de quinua a diferentes profundidades. El valor de densidad aparente del suelo a 10 centímetros de profundidad es de 1,5 g/cc, este valor disminuye con la profundidad del suelo, llegando a tener un valor de 1,3 g/cc a 90 centímetros de profundidad. Siendo mas compacto la superficie del suelo, Bowen citado por Porta *et al.* (1994) menciona que desde un punto de vista agrícola la compactación tiende a disminuir las cantidades de agua. Esto explicaría por que la mayor concentración de agua se registra en la parte inferior del perfil del suelo.

Cuadro 15. Densidad aparente y textura de suelo a diferentes profundidades en parcelas en descanso

| Profundad (cm) | Dap (g/cc) | Textura |
|-----------------------|-------------------|----------------|
| 10 | 1,5 | Franco arenoso |
| 30 | 1,5 | Franco arenoso |
| 60 | 1,4 | Franco arenoso |
| 90 | 1,3 | Franco arenoso |

Con referencia a la textura del suelo, estas parcelas presentan suelos de textura franco arenosa en sus diferentes estratos (10, 30, 60 y 90 cm de profundidad), Narro (1994) indica que los suelos arenosos presentan una baja capacidad de retención de humedad, Por esta razón estos suelos presentan reducidos niveles de humedad.

La figura 18 y cuadro 16 nos muestra la influencia que tiene el medio ambiente sobre la humedad de suelo, en parcelas en descanso, en el caso de la precipitación, vemos que esta tiene una gran relación con la humedad del suelo, ya que los niveles de humedad mas altos se registran justo en el periodo de lluvias, en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo.

Esta humedad va disminuyendo con el tiempo, pero en el mes de mayo registra un ligero incremento, esto indica que en la época seca se tiene un aporte de agua, que no proviene de la precipitación, Olivera et al. (2006) menciona que en la Provincia Sud Lítez, el sistema de aguas subterráneas, constituye un tejido interno regulador, que sostiene la humedad en el suelo, entonces se deduce que en la época seca existe un aporte de agua hacia el suelo por parte de las aguas subterráneas.

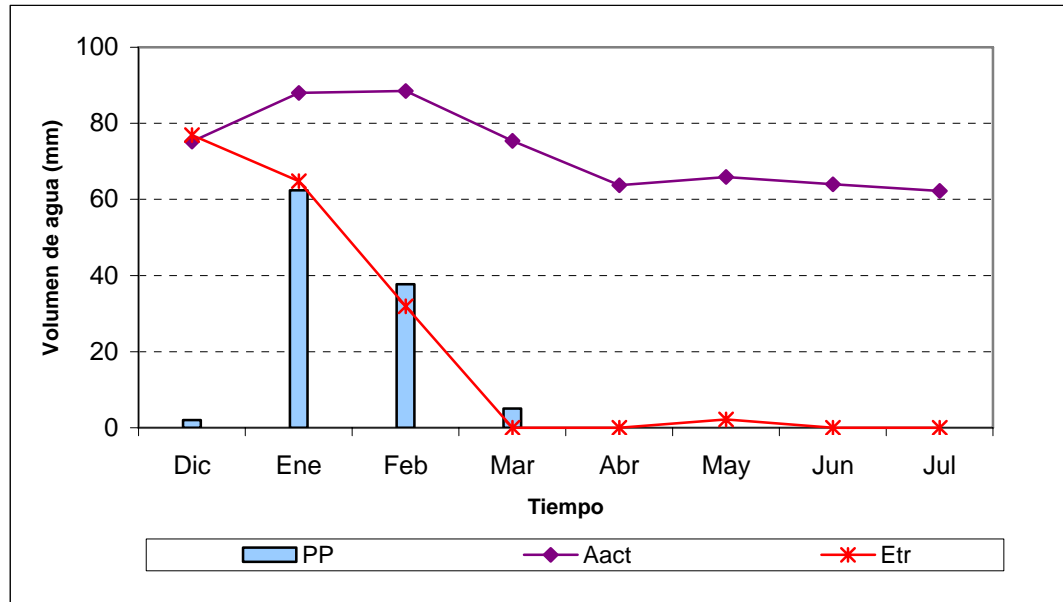


Figura 15. Efecto del medio ambiente sobre la humedad de suelo de parcelas en descanso

Cuadro 16. Precipitación (PP), evapotranspiración real (ETr) y humedad de suelo (H°S°) de parcelas en descanso

| Parámetros (mm) | Meses | | | | | | | |
|-----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul |
| PP | 2.0 | 62.4 | 37.7 | 5.0 | - | - | - | - |
| ETr | 76.9 | 64.8 | 31.9 | 0.0 | 0.0 | 2.2 | 0.0 | 0.0 |
| H°S° | 75.2 | 88.0 | 88.5 | 75.4 | 63.7 | 65.9 | 64.0 | 62.2 |

Otro componente que tiene una estrecha relación con la humedad del suelo, es la evaporación del agua, reduciendo de esta manera el contenido de agua en el suelo, a su vez Fitz (1996) señala que la humedad retenida en el suelo se pierde principalmente por la evaporación. Así la velocidad con que se pierde el agua depende de la temperatura, pero este efecto ve disminuido con la profundidad del suelo.

En la figura 19, se observa la comparación de la humedad del suelo promedio de parcelas de quinua y parcelas en descanso. Se ve que estas dos parcelas presentan tendencias similares.

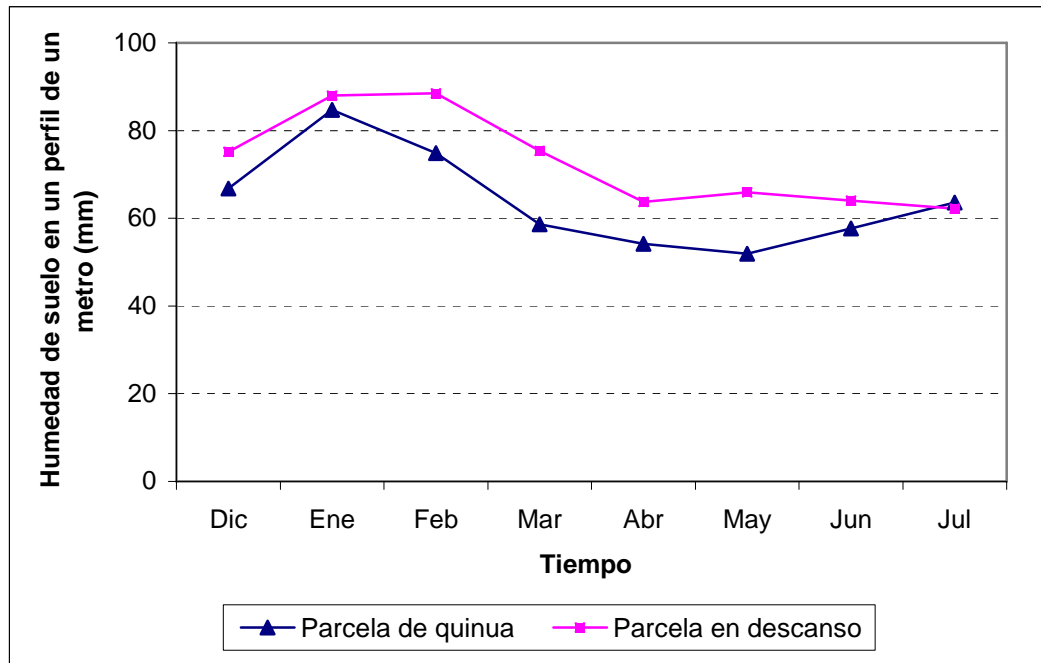


Figura 16. Comparación de la humedad de suelo entre parcelas de quinua y parcelas en descanso

A su vez se aprecia que el contenido de humedad de las parcelas en descanso son mayores, en todo este periodo, excepto en el mes de julio donde su valor disminuye llegando a tener un valor similar al contenido de agua de las parcelas de quinua.

Esta diferencia en el contenido de agua, se debe a que, las parcelas en descanso pierden el agua retenida en la superficie del suelo principalmente por la evaporación, en cambio sobre las parcelas de quinua actúa la evaporación y el consumo de agua por parte del cultivo. Además que las raíces del cultivo extraen el agua del suelo a profundidades mayores, por tanto la reducción de agua en parcelas de quinua es mayor, lo que refleja un contenido menor de agua en el suelo.

Ya en el mes de julio la evaporación del agua se constituye en el denominador común tanto en parcelas descanso y parcelas de quinua, ya estas carecen de cubierta vegetal, por tanto el contenido de agua en el suelo se regula, llegando a ser similares en las dos parcelas.

5.5.4 Conductividad eléctrica y pH del suelo

Considerando el cuadro 17 y la clasificación propuesta por la FAO (1997) anexo 19, los suelos tanto de las parcelas de quinua como de las parcelas en descanso en sus diferentes profundidades son catalogadas como suelos libres de exceso de sales o álcali. Prácticamente ningún cultivo inhibe su crecimiento, o muestra daños provocados por exceso de sales o álcali en estas parcelas.

Cuadro 17. Conductividad eléctrica del suelo de parcelas de quinua y parcelas en descanso

| Código | C E (dS/m) | | | |
|--------|------------|-----|-----|-----|
| | 10 | 30 | 60 | 90 |
| MA 1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| MA 2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| MA 3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| MA 4 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| MA 5 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| MA 6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| MA 7 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| MA 8 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 |
| MA 9 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| MB 1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| MB 2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| MB 3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,2 |
| MB 4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| MB 5 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 |
| MB 6 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| MB 7 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |

Con relación al pH del suelo el cuadro 18 y la clasificación propuesta por Davalo, (1991) anexo 20, clasifica estos suelos como neutros y ligeramente alcalinos.

Cuadro 18. pH del suelo de parcelas de quinua y parcelas en descanso

| Código | pH | | | |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 30 | 60 | 90 |
| MA 1 | 7,0 | 7,4 | 7,4 | 7,6 |
| MA 2 | 7,5 | 7,4 | 7,5 | 7,8 |
| MA 3 | 7,4 | 7,8 | 8,2 | 8,0 |
| MA 4 | 7,7 | 7,9 | 8,0 | 7,7 |
| MA 5 | 7,8 | 8,2 | 7,9 | 8,0 |
| MA 6 | 7,2 | 7,5 | 7,5 | 7,4 |
| MA 7 | 7,7 | 7,8 | 7,6 | 7,3 |
| MA 8 | 7,9 | 8,1 | 8,2 | 7,7 |
| MA 9 | 7,9 | 8,0 | 8,0 | 7,5 |
| MB 1 | 7,2 | 7,6 | 7,6 | 7,7 |
| MB 2 | 7,4 | 7,4 | 7,8 | 7,4 |
| MB 3 | 7,7 | 7,7 | 7,9 | 7,8 |
| MB 4 | 7,9 | 8,0 | 8,4 | 8,1 |
| MB 5 | 7,7 | 7,6 | 7,8 | 7,6 |
| MB 6 | 7,3 | 7,4 | 7,9 | 7,6 |
| MB 7 | 7,4 | 7,5 | 7,9 | 7,9 |

5.6 Dinámica del flujo de agua subterránea

5.6.1 Monitoreo del nivel freático

El nivel freático (Figura 20 y Cuadro 19) de los pozos de agua, presentan un comportamiento homogéneo a lo largo de este periodo, si bien se registra precipitaciones con picos altos en el mes de enero y febrero el nivel freático no presenta un incremento en estos meses ni en los meses posteriores, por tanto se deduce que el nivel freático del agua no esta condicionado por la precipitación y que depende principalmente del aporte subterráneo.

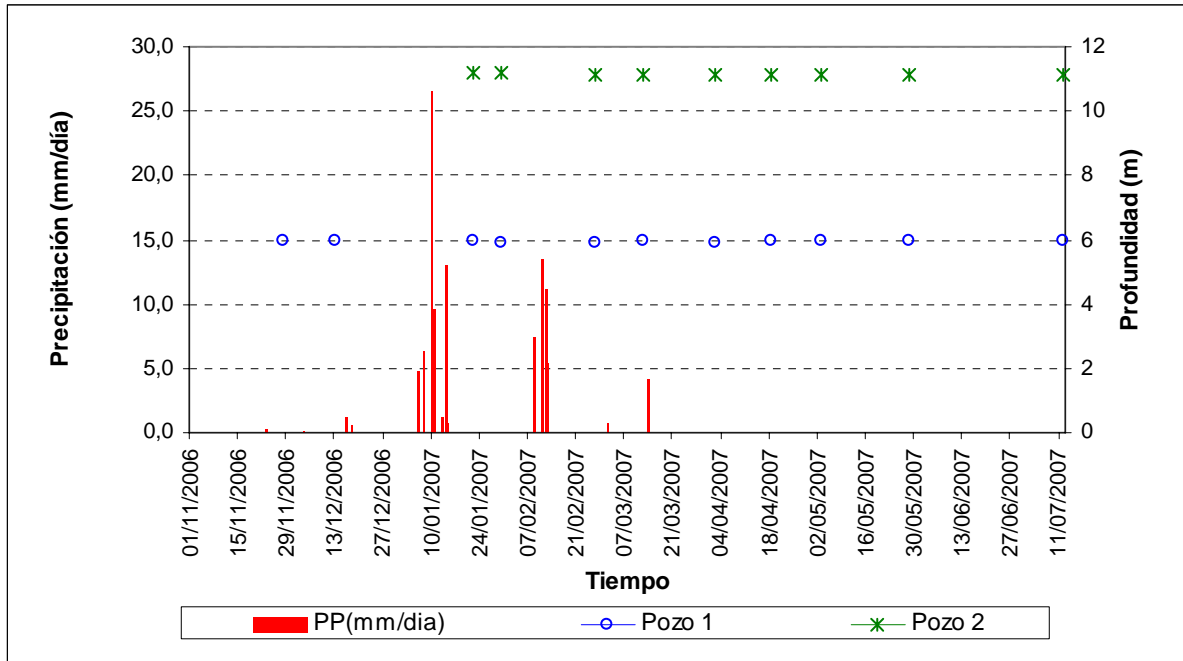


Figura 17. Comportamiento del nivel freático en dos pozos de agua

Cuadro 19. Niveles freáticos registrados en dos pozos de agua

| Fecha | Profundidad napa (m) | |
|-----------|----------------------|--------|
| | Pozo 1 | Pozo 2 |
| 28-Nov-06 | 5,98 | - |
| 13-Dic-06 | 5,98 | - |
| 22-Ene-07 | 6,00 | 11,20 |
| 30-Ene-07 | 5,94 | 11,17 |
| 26-Feb-07 | 5,87 | 11,07 |
| 12-Mar-07 | 5,98 | 11,12 |
| 02-Abr-07 | 5,94 | 11,14 |
| 18-Abr-07 | 5,95 | 11,14 |
| 03-May-07 | 5,96 | 11,08 |
| 28-May-07 | 5,96 | 11,13 |
| 12-Jul-07 | 5,97 | 11,14 |

Por otra lado estudios realizados por el SERGEOMIN (2001) coinciden con lo indicado, confirmando que la recarga de los acuíferos con agua proveniente de la precipitación en la región de los LÍpez es actualmente muy débil o casi inexistente. Por otro lado Olivera *et al.* (2006) indica que las aguas de esta región son básicamente subterráneas y son muy antiguas pudiendo ser clasificadas de aguas fósiles.

A su vez Montes de Oca (2005) señala que en la región de los LÍpez, existen fisuras de rocas ígneas. En la mina Toldos, provincia Nor LÍpez, departamento de Potosí, se perforaron pozos de hasta 250 m de profundidad que alumbraron acuíferos surgentes con caudales de 15 l/s.

Olivera *et al.* (2006) menciona que de acuerdo a estudios paleoclimáticos, las condiciones pluviométricas (volumen de lluvias varias veces mayor) fueron propicias para procurar una recarga anual de los acuíferos durante los periodos Glaciar Tardío y Holoceno Inferior. Es decir que llovía mucho más hace 10000 años, época que se produjo la recarga principal de los acuíferos que están siendo utilizados ahora. Por lo que se confirma que la regulación de agua de esta zona proviene del almacenamiento de agua en el subsuelo hace muchos años atrás.

5.6.2 Monitoreo del caudal del manantial M3

El manantial M3 registró un caudal de 0,86 l/s en el mes de diciembre y 0,92 l/s en el mes de julio, presentando un caudal promedio de 0.9 l/s, a su vez Pourrut *et al.* citado por Olivera (2006), señala que en las cuencas de la región de los LÍpez, no presentan una disminución en el escurrimiento ni en su rendimiento global. Por lo que se puede indicar que las vertientes de la zona tiene muy poca variación como se muestra en los resultados.

El agua subterránea del sudoeste de Potosí es esencial para alimentar a los bofedales de altura, que tienen una importancia económica para las poblaciones con hatos importantes de llamas (Olivera, 2006).

5.7 Calidad de agua para riego

La descripción de los puntos de muestreo del agua, para determinar su calidad para riego se muestra en el anexo 21. Los resultados del análisis físico-químico de agua para riego, se muestra en el anexo 22, referente al mes de febrero El anexo 23 muestra los resultados del análisis físico-químico de agua para riego, tomadas en el mes de julio

5.7.1 Potencial de hidrogeniones

1ra. Muestra (Febrero)

En base a los valores de pH (Cuadro 20) y de acuerdo a la clasificación propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24, las muestras de agua RQ, P1, P2, M1, M2 y M3 son catalogadas como normales.

Cuadro 20. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base al pH

| Fuentes de agua | pH | Tipo de agua |
|-----------------|------|--------------|
| RQ | 8,09 | Normal |
| P1 | 7,08 | Normal |
| P2 | 7,43 | Normal |
| M 1 | 7,44 | Normal |
| M2 | 7,26 | Normal |
| M3 | 7,34 | Normal |

2da. Muestra (Julio)

En base a los valores de pH (Cuadro 21) y de acuerdo a la clasificación propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24, las muestras de agua RQ, P1 y P2 son catalogadas como normales.

Cuadro 21. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base al pH

| Fuentes de agua | pH | Tipo de agua |
|------------------------|-----------|---------------------|
| RQ | 7,88 | Normal |
| P1 | 7,49 | Normal |
| P2 | 7,68 | Normal |

Por tanto, en función al pH, estas aguas pueden ser útiles para el riego de la quinua, ya que no causaría un efecto adverso sobre el suelo ni sobre cultivo, Mújica *et al.* (2001) menciona que estudios efectuados al respecto indican que pH del suelo alrededor de la neutralidad son ideales para la quinua. Además indica que la quinua tiene un amplio rango de crecimiento y producción a diferentes pH del suelo, se ha observado que da producciones buenas en suelos alcalinos de hasta 9 de pH, en los salares de Bolivia y de Perú, como también en condiciones de suelos ácidos encontrando el extremo de acidez donde prospera la quinua, equivalente a 4.5 de pH, en la zona de Michiquillay en Cajamarca, Perú.

5.7.2 Conductividad Eléctrica

1ra. Muestra (Febrero)

Considerando los valores de conductividad eléctrica del cuadro 22 y tomando en cuenta la clasificación propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24, sobre la calidad de agua de riego, se determina que las aguas de la muestra RQ presentan un grado de restricción de uso severo, con relación a las muestras P1, P2 y M3 esta agua presentan un grado de restricción de uso de ligera a moderada, por otro lado las muestras de agua M1 y M2 no presentan ningún grado de restricción.

Cuadro 22. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base a la CE

| Fuentes de agua | Conductividad Eléctrica (dS/m) | Grado de restricción |
|-----------------|--------------------------------|----------------------|
| RQ | 4,8 | Severa |
| P1 | 1,4 | Ligera a Moderada |
| P2 | 0,7 | Ligera a Moderada |
| M 1 | 0,6 | Ninguna |
| M2 | 0,6 | Ninguna |
| M3 | 0,8 | Ligera a Moderada |

2da. Muestra (Julio)

Considerando los valores de conductividad eléctrica del cuadro 23 y tomando en cuenta la clasificación propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24, sobre la calidad de agua de riego, se determina que las aguas de la muestra RQ presentan un grado de restricción de uso severo, lo que es corroborado el CEEDI, citado por Olivera (2006) donde menciona que el río Quetena presenta aguas de muy buena calidad en su tramo superior, pero esta se saliniza a medida que su curso desciende y se aproxima al río Grande de López, alcanzando finalmente un valor relativamente alto cerca a 2 g/l. Por ende el uso de estas aguas supone el riesgo de salinizar el suelo, lo que provocaría la disminución de la capacidad de absorción de agua por parte el cultivo y se suscitaría la disminución del rendimiento.

A su vez Ayers y Westcot (1984) mencionan que el agua de riego con una conductividad eléctrica elevada, ocasiona una sustancial reducción en los rendimientos de muchos cultivos

Con relación a las muestras P1 y P2, estas aguas presentan un grado de restricción de uso ligero a moderado. Porta, citado por Herve *et al.* (2002) menciona que cualquier aumento de la concentración de sales en la solución del suelo hace

disminuir el potencial osmótico del agua del suelo, lo que incide drásticamente en el aprovechamiento del agua por las plantas.

Cuadro 23. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base a la CE

| Fuentes de agua | Conductividad Eléctrica (dS/m) | Grado de restricción |
|-----------------|--------------------------------|----------------------|
| RQ | 3,3 | Severa |
| P1 | 1,9 | Ligera a Moderada |
| P2 | 0,8 | Ligera a Moderada |

5.7.3 Infiltración

1ra. Muestra (Febrero)

En base a los resultados de CE y RAS, que se muestran en el cuadro 24 y de acuerdo a la clasificación propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24, las muestras de agua P2, M1 y M2 tienen un grado de restricción de uso ligera a moderada, con relaciones a la muestras de agua RQ, P1 y M3 estas no presenta ningún grado de restricción.

Cuadro 24. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base a la CE y al RAS

| Fuentes de agua | Infiltración | | Grado de restricción |
|-----------------|--------------|-----------|----------------------|
| | RAS | CE (dS/m) | |
| RQ | 9,2 | 4,8 | Ninguna |
| P1 | 3,6 | 1,4 | Ninguna |
| P2 | 1,2 | 0,7 | Ligera a Moderada |
| M 1 | 0,9 | 0,6 | Ligera a Moderada |
| M2 | 1,1 | 0,6 | Ligera a Moderada |
| M3 | 1,3 | 0,8 | Ninguna |

2da. Muestra (Julio)

En base a los resultados de CE y RAS, que se muestran en el cuadro 25 y de acuerdo a la clasificación propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24, las muestra de agua P1 tiene un grado de restricción de uso ligera a moderada, con relaciones a la muestras de agua RQ y P2 estas no presenta ningún grado de restricción.

Cuadro 25. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base a la CE al RAS

| Fuentes de agua | Infiltración | | Grado de restricción |
|-----------------|--------------|-----------|----------------------|
| | RAS | CE (dS/m) | |
| RQ | 10,0 | 3,3 | Ninguna |
| P1 | 9,4 | 1,9 | Ligera a Moderada |
| P2 | 2,0 | 0,8 | Ninguna |

Un problema de infiltración relacionado con la calidad del agua ocurre cuando la velocidad normal de infiltración del agua de riego o de lluvia se reduce apreciablemente. Como consecuencia el agua permanece sobre el suelo por un tiempo demasiado largo, o se infiltra muy lentamente y el cultivo no recibe el agua que necesita para producir cosechas aceptables, a esto Ayers y Wescott (1985) indican que cuando los cultivos son regados con aguas de alto contenido de sodio, este elemento se acumula en los primeros centímetros de profundidad, consecuentemente los agregados de esta capa superficial se dispersan en partículas mucho mas pequeñas que obturan los poros del suelo.

5.7.4 Toxicidad de iones

5.7.4.1 Sodio

1ra. Muestra (Febrero)

Aplicando los niveles de toxicidad de sodio de Ayers y Wescott (1985) anexo 24 y en base al contenido de sodio de las muestras de agua (Cuadro 26) se determina que la muestra RQ presenta restricciones severas respecto a su uso, la muestra P1 presenta una restricción ligera a moderada, por tanto estas fuentes de agua no son recomendable para el riego ya que provocarían toxicidad a los cultivos. A esto Ayers y Wescott (1985) comentan que la toxicidad del sodio es resultado de una alta proporción de sodio en el agua (alto sodio o RAS). Los síntomas típicos del sodio aparecen en forma de quemaduras o necrosis a lo largo de los bordes de las mismas. Las concentraciones de sodio en las hojas alcanzan niveles tóxicos después de varios días o semanas. Los síntomas aparecen primero en las hojas más viejas y en los bordes y, a medida que se intensifica, la necrosis se desplaza progresivamente en el área intervertebral, hacia el centro de las hojas.

Las muestras P2, M1, M2 y M3 pueden ser utilizadas si ningún tipo de restricción.

Cuadro 26. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base al contenido de sodio

| Fuentes de agua | Sodio (RAS) | Grado de restricción |
|-----------------|-------------|----------------------|
| RQ | 9,2 | Severo |
| P1 | 3,6 | Ligera a Moderada |
| P2 | 1,2 | Ninguna |
| M 1 | 0,9 | Ninguna |
| M2 | 1,1 | Ninguna |
| M3 | 1,3 | Ninguna |

2da Muestra (Julio)

Aplicando los niveles de toxicidad de sodio de Ayers y Wescott (1985) anexo 24 y en base al contenido de sodio de las muestras de agua (Cuadro 27) se determina que las muestras RQ y P1 presentan restricciones severas respecto a su uso, en cambio la muestra P2 puede ser utilizada si ningún tipo de restricción.

Cuadro 27. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base al contenido de sodio

| Fuentes de agua | Sodio (RAS) | Grado de restricción |
|-----------------|-------------|----------------------|
| RQ | 10,0 | Severo |
| P1 | 9,4 | Severo |
| P2 | 2,0 | Ninguna |

5.7.4.2 Cloro

1ra. Muestra (Febrero)

Aplicando los niveles de toxicidad de sodio propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24 y en base al contenido de sodio de las muestras de agua (Cuadro 28) se determina que la muestra RQ presenta un grado de restricciones de uso severo, la muestra P1 presenta una restricción ligera a moderada, en cambio las muestras P2, M1, M2 y M3 son clasificadas como aguas de buena calidad al no presentar restricciones de uso.

Cuadro 28. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base al contenido de cloro

| Fuentes de agua | Cloro (me/l) | Grado de restricción |
|-----------------|--------------|----------------------|
| RQ | 32,2 | Severa |
| P1 | 9,2 | Ligera a Moderada |
| P2 | 2,5 | Ninguna |
| M 1 | 0,8 | Ninguna |
| M2 | 1,1 | Ninguna |
| M3 | 2,4 | Ninguna |

2da Muestra (Julio)

Aplicando los niveles de toxicidad de sodio propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24 y en base al contenido de sodio de las muestras de agua (Cuadro 29) se determina que las muestras RQ y P1 presenta un grado de restricciones de uso severo, la muestra P2 presenta una restricción ligera a moderada.

Cuadro 29. Clasificación de agua para riego correspondiente julio en base al contenido de cloro

| Fuentes de agua | Cloro (me/l) | Grado de restricción |
|-----------------|--------------|----------------------|
| RQ | 25,2 | Severa |
| P1 | 16,8 | Severa |
| P2 | 4,5 | Ligera a Moderada |

Según Ayers y Wescott (1985) la toxicidad mas frecuente es la provocada por el cloro contenida en el agua de riego. El cloro no es retenida o absorbido por las partículas del suelo, por la cual se desplaza fácilmente con el aguadle suelo, es absorbida por la raíces y translocado a las hojas, en donde se acumula por la transpiración. Si su concentración excede la tolerancia de la planta, se produce daños, como necrosis y quemaduras en las hojas. Normalmente los daños se manifiestan primero en las puntas de las hojas, lo que es característico de su toxicidad, para luego desplazarse, a lo largo de las hojas. Una necrosis excesiva va acompañada generalmente de una defoliación temprana.

5.7.4.3 Boro

1ra. Muestra (Febrero)

Considerando la clasificación propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24, referente a lo niveles de toxicidad del boro y en base al contenido de boro de las muestras de agua (Cuadro 30) se establece que las muestras RQ, P1 y P2

presenta una restricción de uso severa, por otro lado las muestra de agua M1, M2 y M3 presentan un grado de restricción ligera a moderada.

Cuadro 30. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base al contenido de boro

| Fuentes de agua | Boro (mg/l) | Grado de restricción |
|-----------------|-------------|----------------------|
| RQ | 6,4 | Severo |
| P1 | 4,1 | Severo |
| P2 | 4,6 | Severo |
| M 1 | 1,3 | Ligera a Moderada |
| M2 | 1,6 | Ligera a Moderada |
| M3 | 2,5 | Ligera a Moderada |

2da Muestra (Julio)

Considerando la clasificación propuesta por Ayers y Wescott (1985) anexo 24, referente a lo niveles de toxicidad del boro y en base al contenido de boro de las muestras de agua (Cuadro 31) se establece que las muestras RQ, P1 y P2 presenta una restricción de uso severa.

Cuadro 31. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base al contenido de boro

| Fuentes de agua | Boro (mg/l) | Grado de restricción |
|-----------------|-------------|----------------------|
| RQ | 7,5 | Severo |
| P1 | 5,3 | Severo |
| P2 | 4,2 | Severo |

Ayers y Wescott (1985) indican que los problemas de toxicidad se producen frecuentemente a causa del boro contenido en el agua de riego, que del boro del suelo. La toxicidad puede afectar prácticamente a todos los cultivos. Los síntomas aparecen generalmente en las hojas viejas, como mancha amarillas o secas en los

bordes y lo ápices de las hojas, a mediada que el boro se acumula, los síntomas se extienden por las áreas intervertebrales hacia el centro de las hojas.

5.7.5 Sólidos disueltos

1ra. Muestra (Febrero)

Considerando la clasificación de aguas de riego propuesta por Epstein citado por Herbe *et al.* (2002) anexo 25 y en base al contenido de sólidos disuelto (Cuadro 32), las muestras de agua RQ, P1, P2, M1, M2 y M3 son catalogadas como marginales.

Cuadro 32. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base a los sólidos disueltos

| Fuentes de agua | Sólidos disueltos (ppm) | Calidad de agua |
|-----------------|-------------------------|-----------------|
| RQ | 3318,5 | Marginal |
| P1 | 1035,2 | Marginal |
| P2 | 633,2 | Marginal |
| M 1 | 565,7 | Marginal |
| M2 | 580,6 | Marginal |
| M3 | 649,5 | Marginal |

2da. Muestra (julio)

Considerando la clasificación de aguas de riego propuesta por Epstein citado por Herbe *et al.* (2002) anexo 25 y en base al contenido de sólidos disuelto (Cuadro 33), las muestras de agua RQ, P1 y P2 son catalogadas como marginales.

Cuadro 33. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base a los sólidos disueltos

| Fuentes de agua | Sólidos disueltos (ppm) | Calidad de agua |
|-----------------|-------------------------|-----------------|
| RQ | 1832,1 | Marginal |
| P1 | 1159,1 | Marginal |
| P2 | 637,4 | Marginal |

5.7.6 Dureza

1ra. Muestra (Febrero)

Aplicando la clasificación propuesta por Ávila *et al.* (s.f.) anexo 26, se clasifica a las muestras QR, P1, P2, M1, M2, y M3 como agua muy dulce (Cuadro 34).

Cuadro 34. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en base a los grados hidrométricos franceses

| Fuentes de agua | Dureza (F°) | Tipo de agua |
|-----------------|-------------|--------------|
| RQ | 3,1 | Muy dulce |
| P1 | 1,2 | Muy dulce |
| P2 | 1,2 | Muy dulce |
| M 1 | 1,1 | Muy dulce |
| M2 | 1,0 | Muy dulce |
| M3 | 1,3 | Muy dulce |

2da. Muestra (Julio)

Aplicando la clasificación propuesta por Ávila *et al.* (s.f.) anexo 26, se clasifica a las muestras QR, P1 y P2 como agua muy dulce (Cuadro 35).

Cuadro 35. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en base a los grados hidrométricos franceses

| Fuentes de agua | Dureza (F°) | Tipo de agua |
|-----------------|-------------|--------------|
| RQ | 2,2 | Muy dulce |
| P1 | 1,4 | Muy dulce |
| P2 | 1,1 | Muy dulce |

5.7.7 Riesgos de obturación

1ra. Muestra (Febrero)

En base a los resultados del cuadro 36 y la clasificación propuesto por Ávila *et al.* (s.f.) anexo 27, con respecto al peligro de obturación se presenta los siguientes resultados:

Considerando los sólidos disueltos presentes en el agua, las muestras RQ, P1, P2, M1, M2 y M3 presenta un peligro de obturación bajo.

Con relación al pH del agua, las muestras RQ, P1, P2, M1, M2 y M3 presenta un peligro de obturación medio.

Tomando en cuenta la concentración de magnesio, la RQ presenta un peligro de obturación alto, en cambio las muestras P1, P2, M1, M2 y M3 presentan un peligro de obturación medio.

En base al contenido de Calcio, las muestras de agua RQ, P1, P2, M1, M2 y M3 presentan un peligro de obturación Bajo.

Tomando en cuenta la concentración de carbonatos, la muestra RQ presenta un peligro de obturación Bajo, con respecto a las muestras P1, P2, M1, M2 y M3 no se detectó la presencia de carbonatos en el agua.

Cuadro 36. Clasificación de agua para riego correspondiente a febrero en función al peligro de obturación

| Parámetros determinados | Muestras de agua | | | | | |
|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | RQ | P1 | P2 | M1 | M2 | M3 |
| Sólidos en suspensión (mg/l) | 24,0 Bajo | 9,0 Bajo | 1,2 Bajo | 1,1 Bajo | 13,0 Bajo | 4,4 Bajo |
| pH | 8,09 Medio | 7,08 Medio | 7,43 Medio | 7,44 Medio | 7,26 Medio | 7,34 Medio |
| Magnesio (mg/l) | 3,2 Alto | 1,3 Medio | 1,1 Medio | 1,0 Medio | 0,6 Medio | 1,0 Medio |
| Calcio (mg/l) | 7,3 Bajo | 2,7 Bajo | 2,9 Bajo | 2,9 Bajo | 2,9 Bajo | 3,6 Bajo |
| Carbonatos (mg/l) | 0,04 Bajo | 0,0 NSD | 0,0 NSD | 0,0 NSD | 0,0 NSD | 0,0 NSD |

NSD = No se detectó

2da. Muestra (Julio)

En base a los resultados del cuadro 37 y la clasificación propuesto por Ávila *et al.* (s.f.) anexo 27, con respecto al peligro de obturación se presenta los siguientes resultados:

Considerando los sólidos disueltos presentes en el agua, las muestras RQ, P1 y P2 presenta un peligro de obturación bajo.

Con relación al pH del agua, las muestras RQ, P1 y P2 presenta un peligro de obturación medio.

Tomando en cuenta la concentración de magnesio, la RQ presenta un peligro de obturación alto, en cambio las muestras P1 y P2 presentan un peligro de obturación medio.

En base al contenido de Calcio, las muestras de agua RQ, P1 y P2 presentan un peligro de obturación Bajo.

Tomando en cuenta la concentración de carbonatos, la muestra RQ presenta un peligro de obturación Bajo, con respecto a las muestras P1 y P2 no se detectó la presencia de carbonatos en el agua.

Cuadro 37. Clasificación de agua para riego correspondiente a julio en función al peligro de obturación

| Parámetros determinados | Muestras de agua | | |
|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | RQ | P1 | P2 |
| Sólidos en suspensión (mg/l) | 23 Bajo | 17 Bajo | 84 Medio |
| pH | 7,88 Medio | 7,49 Medio | 7,68 Medio |
| Magnesio (mg/l) | 2,4 Alto | 1,5 Medio | 1,0 Medio |
| Calcio (mg/l) | 4,8 Bajo | 3,2 Bajo | 2,9 Bajo |
| Carbonatos (mg/l) | 0,0 NSD | 0,0 NSD | 0,0 NSD |

NSD = No se detectó

Los sólidos en suspensión, las sustancias disueltas o los microorganismos contenidos en el agua de riego pueden producir obturaciones en los emisores de riego localizado.

En base a los resultados se indica que la fuentes de agua RQ, P1 y P2 son aguas con una calidad muy mala por presentar elevadas concentraciones de sales e iones tóxicos. A su vez las fuentes de agua M1, M2 y M3 se pueden catalogar como agua con una calidad buena.

Ramos (1999), encontró valores similares en el río San Agustín, clasificando a estas como aguas salinas por presentar una conductividad eléctrica de 1430 a 1530 $\mu\text{mhos/cm}$, con relación al RAS (4.93 a 5.08) estas aguas pueden utilizarse en la mayoría de los suelos y niveles de boro no significativo (0.020 a 0.018 ppm).

A su vez el SERGEOMIN (2001), en un estudio de los recursos hídricos de la cuenca Zapaleri (sudoeste de Potosí), obtuvo similares resultados de algunos parámetros estudios: CE promedio de 600 $\mu\text{S/cm}$, que lo caracteriza como agua dulce, un pH promedio de 7,98 en rangos neutros, alcalinidad de 0,70 a 4,01 mval/l. La dureza tiene un promedio de 97,44 mg/l de CO_3Ca , las clasifica como aguas muy blandas a blandas.

Por otro lado el CEEDI, citado por Olivera (2006) realizó muestreos de la calidad en la Laguna Colorada, río Huayllajara, Salar de Challviri, río Quetena y río Grande de Lípez .Los valores de pH indican que el agua es generalmente alcalina. El Valor de sólidos disueltos indica que la mayor parte de las lagunas son muy saladas con valores extremos de más de 100 g/l, lo que representa tres veces el contenido de sal en el agua de mar (Anexo 28).

Por lo tanto se deduce que el principal problema de los recursos hídricos del sudoeste de Potosí son las concentraciones altas de sales.

5.8 Relación del flujo superficial y subterráneo con los requerimientos hídricos del cultivo de la quinua

5.8.1 Balance hídrico del suelo

5.8.1.1 Parcelas de quinua

El cuadro 38, presenta el balance hídrico del suelo, de parcelas de quinua. En este periodo se observa un evidente déficit hídrico, siendo mayor en el mes de diciembre con 116,0 mm., cuando la quinua se encuentra en la etapa de floración, Espíndola, citado por Ramos (2000) en un trabajo de respuestas fisiológicas,

morfológicas y agronómicas de la quinua al déficit hídrico, en condiciones controladas, demostró que la fase fonológica de prefloración es la más susceptible al déficit hídrico, para el rendimiento de grano.

En el mes de enero, febrero y marzo (cuando la quinua ingresa a la etapa fenológica de grano lechoso, grano pastoso y madurez fisiológica respectivamente), se observa un leve descenso del déficit hídrico, como efecto de la precipitación y la disminución del requerimiento hídrico de la quinua. A pesar de esta situación la quinua aun continua expuesto al déficit hídrico, Huiza (1994) indica que la fase fonológica de grano lechoso es la más susceptible al déficit hídrico.

Cuadro 38. Balance hídrico del suelo de parcelas de quinua

| Parámetros (mm) | Meses | | | |
|--------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar |
| PP | 2.0 | 62.4 | 37.7 | 5.0 |
| E | 0.3 | 10.7 | 6.5 | 0.9 |
| ETc | 184.5 | 165.1 | 108.1 | 70.1 |
| Aact | 66.8 | 84.7 | 74.9 | 59.6 |
| Déficit | 116.0 | 95.5 | 86.7 | 70.1 |

Al ser sometida la quinua a un permanente déficit hídrico, tiene como resultado la reducción del rendimiento en grano, el PEDEL (2004) menciona que todo el territorio de la Mancomunidad de los Lípez, las mayores pérdidas en la producción agropecuaria son causados por la sequía, que se presenta con frecuencia en estos últimos años, particularmente en los meses de diciembre a marzo, que aparentemente corresponden a periodos de lluvia, generando pérdidas irreversibles a la producción agrícola (quinua real).

5.8.1.2 Parcelas en descanso

Se observa en el cuadro 39, la persistencia del déficit hídrico en todo el periodo de estudio, acentuándose con mayor fuerza en el mes de marzo con 129,8 mm. Esto

dado por valores mensuales reducidos de precipitación efectiva y de almacenamiento en el suelo, las cuales no son suficientes para atender las necesidades de la evapotranspiración potencial, por lo que se tiene un déficit de agua y consecuentemente una reducción de las posibilidades de desarrollo de la vegetación natural o de los cultivos (ZONISIG, 2001).

Olivera (2006), menciona que en tres de las cuencas estudiadas por el SERGEOMIN: Salar de Challviri, Laguna Verde y Zapaleri, se estableció, con registros que van desde el año 1983, hasta el año 1995, que la evapotranspiración es de 914 mm, quince veces mas alta que la precipitación. Esta acentuada diferencia entre la evapotranspiración y la precipitación deviene en un permanente déficit hídrico de la zona.

Cuadro 39. Balance hídrico del suelo de parcelas en descanso

| Parámetros (mm) | Meses | | | | | | | |
|--------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul |
| PP | 2.0 | 62.4 | 37.7 | 5.0 | - | - | - | - |
| E | 0.3 | 10.4 | 6.3 | 0.8 | - | - | - | - |
| ET _o | 170.8 | 144.8 | 138.6 | 129.8 | 126.0 | 121.2 | 116.3 | 111.2 |
| A _{act} | 75.2 | 88.0 | 88.5 | 75.4 | 63.7 | 65.9 | 64.0 | 62.2 |
| Déficit | 93.9 | 80.0 | 106.7 | 129.8 | 126.0 | 119.0 | 116.3 | 111.2 |

5.8.2 Propuesta de riego

Esta propuesta de riego esta dirigida a la aplicación de riego deficitario. Mamani (2007) en un estudio determinó que un riego deficitario con riego durante las etapas de germinación, floración y grano lechoso y sin riego en etapas vegetativas iniciales y sin riego durante la fase de grano pastoso, es beneficioso para el cultivo de la quinua.

El cuadro 40, presenta el balance realizado para determinar el requerimiento de riego para el cultivo de quinua de acuerdo a las fases fenológicas del cultivo.

Cuadro 40. Requerimientos hídricos del cultivo de la quinua

| Meses | Fase fenológica | ET _o (mm) | K _c | ET _c (mm) | P (mm) | Demanda (mm) | Demanda (m ³ /ha) |
|-------|---------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|-----------|-----------------|---------------------------------|
| Oct | 5 hojas alternas | 157.6 | 0.54 | 85.1 | 3.6 | 81.3 | 831 |
| Nov | 13 hojas alternas | 164.8 | 0.63 | 103.8 | 5.7 | 98.1 | 981 |
| Dic | Floración | 169.5 | 1.08 | 183.1 | 29.2 | 153.9 | 1539 |
| Ene | Grano lechoso | 154.7 | 1.14 | 176.4 | 73.0 | 103.4 | 1034 |
| Feb | Grano pastoso | 137.9 | 0.78 | 107.6 | 22.7 | 84.9 | 849 |
| Mar | Madurez fisiológica | 144.2 | 0.54 | 77.9 | 24.4 | 53.5 | 535 |

En el cuadro 41, se presenta la oferta de agua por mes y la demanda de agua por parte del de la quinua, considerando las recomendaciones de Mamani (2007), solo se planifica el riego en los meses de octubre, diciembre y enero.

Cuadro 41. Relación entre la oferta de agua y demanda de agua

| Meses | Oferta de agua (m ³ /ha) | Demanda de agua (m ³ /ha) | Riego deficitario (m ³ /ha) |
|------------|--|---|---|
| Julio | 2411 | - | |
| Agosto | 2333 | - | |
| Septiembre | 2333 | - | |
| Octubre | 2411 | 831 | 831 |
| Noviembre | 2333 | 981 | |
| Diciembre | 2411 | 1539 | 1539 |
| Enero | 2411 | 1034 | 1034 |
| Febrero | 2255 | 849 | |
| Marzo | 2255 | 535 | |
| Abril | 2333 | - | |
| Mayo | 2411 | - | |
| Junio | 2333 | - | |
| Total | 28227 | | 3386 |

De acuerdo a lo menciona se tiene una oferta total de 28227 m³/ha por año y una demanda de riego deficitario de 3386 m³/ha por ciclo agrícola, con esta relación, se determina que se podría regar 8 hectáreas de cultivo de quinua.

Para esto de requiere considerar estructuras de almacenamiento de agua. Según Ávila *et al.* (s.f.) los embalses permiten la recogida de aguas de lluvia y sobre todo pueden efectuar las operaciones de llenado en “horas, días o periodos valle”, además nos permiten el ahorro energético por el concepto de bombeo. Por esta razón se recomendaría la construcción de un embalse que nos remitiría almacenar esta agua y además podríamos almacenar el agua proveniente de la lluvia.

6 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, bajo las condiciones en las que se efectuó el estudio, se llega a las siguientes conclusiones:

Por su área (58 km²) esta unidad geográfica es clasificada como una subcuenca, presenta una forma alargada, por tal razón la probabilidad de ser cubierta en su totalidad por una tormenta es reducida, lo que afecta el comportamiento de los ríos y la humedad del suelo, ya que las lluvias pueden concentrarse en un solo sector de la cuenca.

Geológicamente la cuenca esta constituida por rocas sedimentarias del terciario y del cuaternario. Forma parte de las provincias geográficas de la cordillera Occidental y del Altiplano, en el primer caso se halla constituida por montañas medias y serranías medias con pendientes entre 15 a 60%, en el segundo caso formado por superficies de erosión (planicies) y llanuras aluviales con pendientes entre 2 a 5 %. Se halla formada por 4 unidades de suelo: Consociación Leptosoles, consociación Leptosoles con inclusión Regosoles, Consociación Cambiosoles y Calcisoles-Fluviosoles.

Las aguas superficiales de la zona se dividen en dos grupos: aguas superficiales con corrientes efímeras y aguas superficiales con corrientes perennes, la primera esta regulada por las precipitaciones ya que llevan agua en su cauce, solo cuando llueve o inmediatamente después, en el segundo caso está regulada por las aguas subterráneas, siendo independiente de las precipitaciones, ya que su cauce contiene agua permanentemente, aun en época seca. Esto las hace aptas para considerar pequeños sistemas de riego.

El río Quetena se halla compuesto por corrientes de agua perenne, alimentada en sus nacientes por vertientes que son reguladas por las aguas subterráneas, lleva en su cauce un caudal promedio de 1565 l/s.

La humedad del suelo (flujo subsuperficial) tanto en parcelas de quinua y parcelas en descanso presenta grandes fluctuaciones, entre parcelas y en el tiempo. El contenido de humedad de estas parcelas se hallan por debajo de la fracción agua fácilmente aprovechable (AFA) e incluso en algunos casos por debajo de la humedad a punto de marchitez permanente, debido a precipitaciones bajas y suelos de textura Franco Arenosa con capacidad de almacenamiento de agua muy reducido. Por tal razón las parcelas de quinua sufrieron estrés hídrico en todo este periodo.

El perfil del suelo se halla sujeto a numerosas fluctuaciones de su contenido de agua, siendo mayor en la superficie, a 10 centímetros de profundidad y en la época húmeda, como efecto de la de la precipitación y la evapotranspiración, pero este efecto disminuye con la profundidad, de tal manera que la fluctuación de la humedad del suelo se reduce a 90 centímetros de profundidad.

El mayor almacenamiento de agua en el perfil del suelo se registra entre los 60 y 90 centímetros, siendo menor a 10 centímetros, como efecto de la evapotranspiración. A la vez que, a 10 centímetros de profundidad la densidad aparente del suelo es mayor, siendo mayor su compactación, lo que reduce la pérdida de agua por evaporación de los estratos inferiores.

El comportamiento de la humedad del suelo se halla influenciado por la precipitación, ya que los mayores niveles de agua en el suelo se presentan en la época húmeda, en la época seca se halla influenciada por la regulación del agua subterránea, que realiza aportes al suelo. Otro factor de influencia es la evaporación del agua de la superficie del suelo y el consumo de agua por parte del cultivo.

El flujo de agua subterránea que se está utilizando ahora, depende de la recarga de los acuíferos suscitados en los periodos Glaciar Tardío y Holoceno Inferior es decir hace 10000 años. La recarga de los acuíferos en la actualidad con agua

proveniente de las precipitaciones es muy débil o casi inexistente. Por lo que estas pueden ser clasificadas como aguas fósiles y como un recurso no renovable.

Las vertientes de de agua MA1, MA2 y MA3 presentan corrientes de muy escaso caudal, pero con flujos de agua permanente, el mayor caudal corresponde a la vertiente MA3 con un caudal de 0,9 l/s.

Por todo lo indicado, las fuentes de agua de esta zona: ríos, vertientes, manantiales, humedad del suelo, etc. son básicamente regulados por las aguas subterráneas.

Respecto a la calidad del agua para riego, las muestras RQ, P1 y P2 no son recomendables para riego por su elevada concentración de sales e iones tóxicos (sodio, cloro y boro). Siendo recomendable para el riego las fuentes de agua M1, M2 y M3.

Por lo mencionado anteriormente la fuente de agua M3, es considerada como una fuente de agua para riego potencial, por presentar una buena calidad de agua y un caudal constante de 0,9 l/s aproximadamente.

Tanto en parcelas de quinua y parcelas en descanso se advierte un marcado déficit hídrico, causado por las bajas precipitaciones y por la elevada evapotranspiración. Esto explicaría en parte los rendimientos bajos de la quinua en esta región del país.

7 RECOMENDACIONES

Sobre la base de las conclusiones se llega a las siguientes recomendaciones.

Se recomienda continuar con los trabajos sobre la evaluación de los recursos hídricos del Sudoeste de Potosí, para validar los resultados obtenidos o mejorarlos.

Realizar otros estudios sobre la humedad del suelo en parcelas de quinua, parcelas en descanso y tholares.

Por otro lado se recomienda un estudio específico de la calidad de agua de la zona y de tal manera que se puedan identificar las fuentes de contaminación.

Con los resultados obtenidos con respecto a la dinámica del flujo de agua subterránea se recomienda un uso racional de este, al no ser un recurso hídrico renovable.

Se recomienda la construcción de reservorios de agua, para almacenar el agua producto del escurrimiento de las precipitaciones y el agua proveniente de las vertientes, para que de esta manera estas aguas se aprovechen en el riego del cultivo de la quinua.

8 BIBLIOGRAFIA

AIDAROV, I. P. y GOLOVANOV, A. I. 1982. El riego. Editorial Mir. Moscú, URSS. 367 p.

AIDAROV, I. P.; GOLOVANOV, A. I.; MAMAIEV, M. G. 1985. El riego. Editorial Mir. Moscú, URSS. p. 42-45.

ALVA, W. J. 1995. Efecto de métodos y umbrales de riego en el desarrollo de la quinua (*Chenopodium quinua*) en el Altiplano Central. Tesis de Grado Lic. Ing. Arg. La Paz, Bolivia. U.M.S.A. 80 p.

ALLEN, G. R.; PEREIRA, S. L.; RAES, D.; SMITH, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo. "Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia

AVILA, R.; CABELLO, A.; LIROLA, J.; MARTIN, A.; ORTIZ, O. s.f. AGUA, RIEGO Y FERTIRRIGACIÓN. DIRECCION GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y FORMACION AGRARIA. Editorial A. G. Novograt, S. A. Sevilla, 153 p.

AYERS, R. y WESTCOT, D. 1984. La calidad de agua en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Estudio FAO riego y drenaje/ 29 Rev. 1. Roma, Italia. p. 1-17, 77-83.

BAVER, C. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. 1991. Primera Edición. Grupo Noriega Editores. México. 529 p.

BOHN, H.; McNEAL, B.; O'CONNOR. 1993. Química del suelo. Primera Edición. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México. p. 259-264.

- BRIONES, G. y GARCIA, I. 1997. AFORO DEL AGUA EN CANALES Y TUBERIAS. Segunda Edición. Editorial Trillas S.A. de C.V. México D. F. 92 p.
- BRIONES, G. y GARCIA, I. 1997. Sistemas de riego por aspersión y goteo. Primera Edición. Editorial Trillas S.A. de C.V. México D. F. 263 p.
- CHIPANA, R. R. 2003. PRINCIPIOS DE RIEGO Y DRENAJE. UMSA. Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia. 202 p.
- CHOQUECALLATA J. 1993. Evapotranspiración máxima (ETM) del cultivo de la quinua por lisimetría y su relación con la evapotranspiración potencial en el altiplano boliviano. Tesis de grado en Ing. Agronómica. U.G.R.M. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias. Santa Cruz. Bolivia.
- DAVALO, J. M. 1991. Química de suelos. Segunda Edición. Editorial Trillas. México. p 46-47, 108-109.
- DUQUE, G. s.f. MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS, cap. 18, AGUAS SUBTERRANEAS. Disponible en: http://www.geocities.com/manualgeo_18/
- FAO (Organización de Naciones Unidas para La Agricultura y la Alimentación). 1997. Guía para la descripción de perfiles de suelo. Segunda Edición. Servicio de Fomento y Conservación de Recursos de Suelos Dirección de Fomento de Tierra y Aguas. Roma. p. 69.
- FITZ P., E. A. 1996. Introducción a la ciencia del suelo. Primera Edición. Editorial Trillas. México. p. 126,132, 153
- GALLEJOS DEL TEJO, A. 1997. La aptitud agrícola de los suelos. Primera Edición. Trillas. México. p. 149.

- GARCIA C., M. 1991. Análisis del comportamiento hídrico en dos variedades de quinua frente a la sequía. Tesis de Grado Lic. Ing. Arg. La Paz, Bolivia. U.M.S.A. 126 p.
- GCP/BOL/ITA. 2004. Producción de quinua orgánica en el Altiplano sur de Bolivia. La Paz, Bolivia.
- GOBIERNO MUNICIPAL DE SAN AGUSTIN. 2006. Plan de Desarrollo Municipal, Municipio de San Agustín Primera sección, Provincia Enrique Baldicieso. Potosí, Bolivia. 246 p.
- HERVE, D.; LEDESMA, R.; ORSAG, V. 2002 Limitantes y manejo de los suelos salinos y/o sódicos en el altiplano boliviano. Taller Gráfico "Pérez", La Paz Bolivia. 266 p.
- HUIZA, L. Z. 1994. Efecto del déficit hídrico a marchites intensa sobre el ritmo de crecimiento de la quinua (*Chenopodium quínoa* Willd). Tesis de Grado Lic. Ing. Arg. La Paz, Bolivia. U.M.S.A.
- LOPEZ RITAS, J y LOPEZ MELIDA. J. 1978. EL DIAGNOSTICO DE SUELOS Y PLANTAS. Tercera Edición. Ediciones Mundi. Madrid. 337 p.
- MAMANI Y., R. S. 2007. Partición de biomasa y evapotranspiración del cultivo de quinua (*Chenopodium quinua* Willd), sometida a estrés hídrico en diferentes etapas de crecimiento. Tesis de Grado Lic. Ing. Arg. La Paz, Bolivia. U.M.S.A. 80 p.
- MIRANDA, R. 2002. Apuntes de la materia de edafología. U.M.S.A. Paz, Bolivia.
- MONTES DE OCA, I. 1992. Sistemas de riego y agricultura en Bolivia. Cooperación Técnica Canadiense. La Paz, Bolivia. p. 79-113.

- MONTES DE OCA, I. 2005. Enciclopedia Geográfica de Bolivia. Editora Atenea. La Paz, Bolivia. 871 p.
- MUJICA, A; CANAHUA, A.; SARAVIA, R. 2001. Agronomía del cultivo de la quinua. In: Quinua, Ancestral cultivo andino, Alimento del presente y futuro. Eds. A Mújica; SE Jacobsen; J Izquierdo. FAO – CIP. Santiago, CL. CD Cultivos andinos, versión 1.0 FAO.
- NARRO F., E. 1994. Física de suelos: con enfoque agrícola. Primera Edición. Trillas. México. 195 p.
- OLIVERA, M.; ERGUETA, P.; VILLACA, M. 2006. Conservación y desarrollo sostenible en el suroeste de Potosí, Bolivia. PREFECTURIA DEL DEPARTAMENTO DE POTOSI, TRÓPICO. La Paz, Bolivia. p. 101-106.
- PACHECO, A. 2004. Quinua en Bolivia. Modelo sistémico para el análisis y diagnóstico de la producción. Primera Edición. Plural editores, La Paz, Bolivia. 210 p.
- PDEL (Plan Estratégico de Desarrollo Local). 2004. Recuperando nuestra identidad. Mancomunidad “Gran Tierra de los Lípez”. Caracterización territorial.
- PEÑA W., O. L. 1994. Evaluación de los recursos hídricos del cantón San José de Llanga. Tesis de Grado Lic. Ing. Arg. La Paz, Bolivia. U.M.S.A. 147 p.
- PORTA, J.; LOPEZ A., M y ROQUERO, C. 1994. Edafología. PARA LA AGRICULTURA Y EL MEDIO AMBIENTE. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. p. 701.

- PREFECTURA DEL DEPARTAMENTO DE POTOSI, BO. 2006. Servicio Departamental Agropecuario; Fundación AUTAPO, BO. Programa quinua Altiplano Sur. Diagnóstico del sector quinuero del departamento de Potosí. Potosi, Bolivia. 66 p.
- RAES, D. 2002. Reference Manual. BUDGET. A soil water and salt balance model. K.U: Leuven. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences. Institute for Land and Water Management. LEUVEN, Belgium.
- RAMOS. G., J. L. 1999. Evaluación de los recursos hídricos con fines de riego en la localidad de San Agustín provincia Enrique Baldivieso del Departamento de Potosí. Tesis de Grado Lic. Ing. Arg. Oruro, Bolivia. U.T.O. 78 p.
- RAMOS F., M. E., 2000. Comportamiento de dos variedades de quinua (*Chenopodium quinua* Willd) bajo riego diferenciado por fases fonológicas en el altiplano central. Tesis de Grado Lic. Ing. Arg. La Paz, Bolivia. U.M.S.A. 110 p.
- SHAXSON, F. y BARBER, R. 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal (significado de porosidad del suelo) boletín de suelo de la FAO (79), Roma, Italia. p. 9-21.
- SERGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería). 2001. Proyecto de Integración Regional. Estudio de cuencas hidrográficas, Cuenca Zapaleri, Provincia Sud Lípez Departamento de Potosí. La Paz, Bolivia. 48 p.
- SERVICIO DE HIDROGRAFIA NAVAL. 1998. Hidrografía de Bolivia. Fuerza Naval Boliviana. Taller Grafico del Instituto Geográfico Militar. 305 p.
- VALERO M., R. 2006. Efecto de estrés salino en cuatro genotipos de quinua (*Chenopodium quinua* Willd) en ambiente protegido. Tesis de Grado Lic. Ing. Arg. La Paz, Bolivia. U.M.S.A. 84 p.

VAN, P. 2002. Disponibilidad, uso y calidad de los recursos hídricos en Bolivia.
Disponible en:
http://www.zabalqueta.org/documentos/tecnicos/recursos_hidricos_boli.pdf

VASQUEZ, A.; TORREZ, C.; TERAN, R.; ALFARO, J.; VILCHEZ, G., ALCANTARA,
J.; SEVILLA, A.; HUANACO, V.; MONCADA, E. s.f. MANEJO DE CUENCAS
ALTOANDINAS. Tomo I. Universidad Nacional Agraria la Molina.

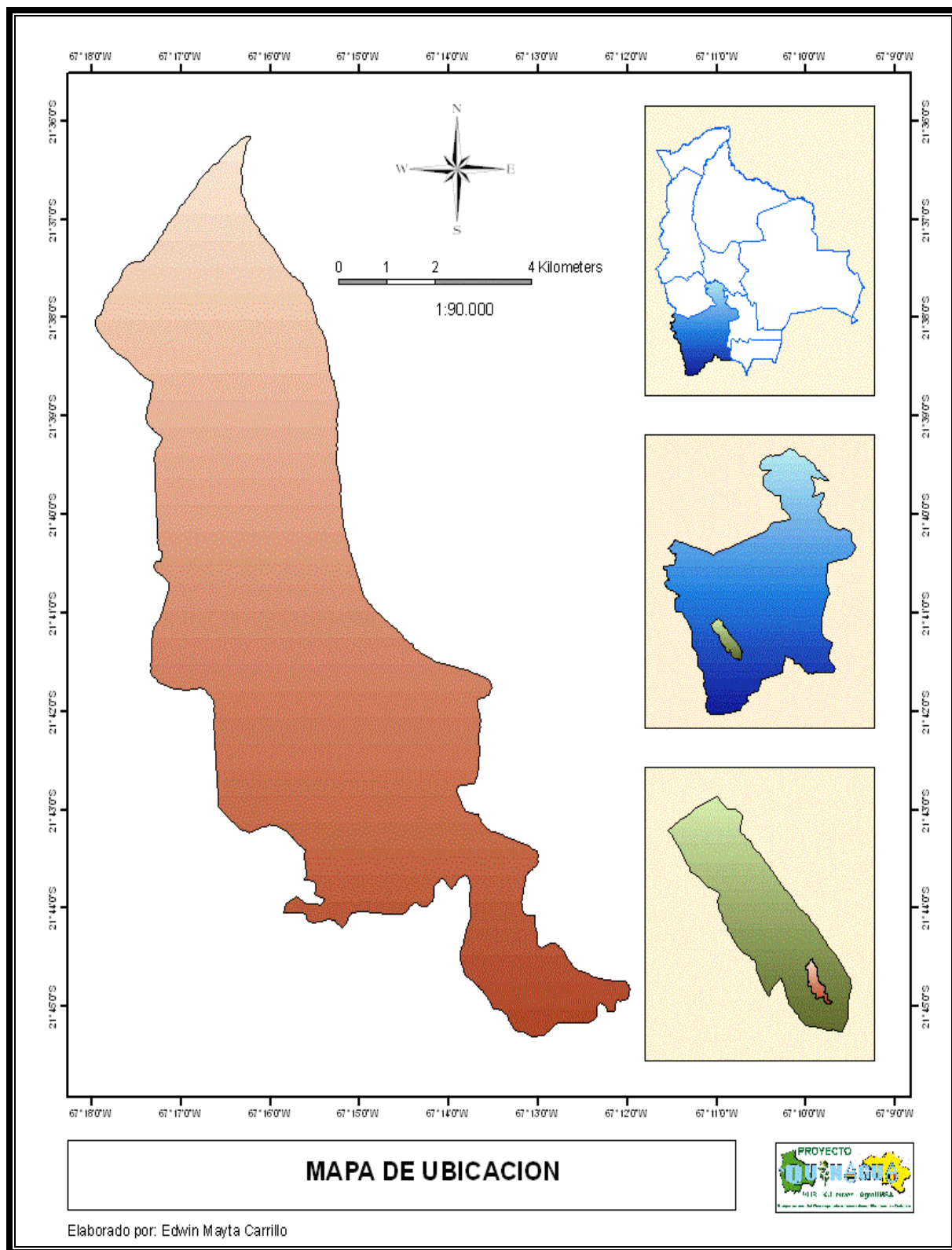
VILLON, M. 2002. Hidrología. Segunda Edición. Editorial Villón. Lima, Perú. 435 p.

ZONIZIG (Proyecto de Zonificación Agroecológica y Establecimiento de una Base
de datos y Red de Sistema de Información Geográfica en Bolivia). 2000.
Zonificación Agroecológica y socioeconómica del Departamento de Potosí. 235
p.

ZONISIG. 2001. Procedimientos Metodológicos de la Zonificación Agroecológica y
Socioeconómica. La Paz, Bolivia. 127 p.

ANEXOS

Anexo 1. Ubicación de la zona de estudio



Anexo 2. Cauce de río ubicado en la región inferior de la cuenca, sin contenido de agua



Fuente: Proyecto Quinagua

Anexo 3. Aforo realizado en el río Quetena con un molinete de hélice



Fuente: Proyecto Quinagua

Anexo 4. Muestreo de suelo de una parcela en descanso, cultivada el ciclo anterior



Fuente: Proyecto Quinagua

Anexo 5. Muestreo de suelo de una parcela de quinua, con la ayuda de un barreno



Fuente: Proyecto Quinagua

Anexo 6. Determinación de la textura del suelo por el método de Bouyucos en el laboratorio de edafología de la Facultad de Agronomía



Fuente: Proyecto Quinagua

Anexo 7. Datos de precipitación diaria del periodo 06/07 (Septiembre-Julio)

| Días | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul |
|------|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9,6 | 13,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,2 | 5,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 4,2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 1,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 31 | | 0 | | 0 | 0 | | 0 | | 0 | | 0 |

Fuente: SENAMHI

Anexo 8. Evapotranspiración potencial diaria del periodo 06/07 (Septiembre-Julio)

| Días | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 5,1 | 5,1 | 5,7 | 4,6 | 3 | 5,2 | 6,8 | 4,2 | 4,2 | 3,3 | 3 |
| 2 | 5,1 | 5,1 | 4,3 | 5 | 3,4 | 7 | 5,3 | 4,2 | 3,9 | 5,1 | 3,9 |
| 3 | 5,1 | 5,1 | 5,8 | 4,4 | 4,7 | 6,8 | 5,3 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 4,5 |
| 4 | 5,1 | 5,1 | 5,6 | 4,3 | 4,4 | 7,4 | 5,8 | 4,2 | 4,2 | 3,8 | 4,2 |
| 5 | 5,1 | 5,1 | 5,1 | 5,1 | 4,7 | 6,8 | 3,5 | 4,2 | 3 | 3,3 | 3,8 |
| 6 | 5,1 | 5,1 | 5,6 | 4 | 3,7 | 7,9 | 2,7 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 4,1 |
| 7 | 5,1 | 5,1 | 4,4 | 6,7 | 4,2 | 6,2 | 3 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 3 |
| 8 | 5,1 | 5,1 | 4,6 | 6,8 | 4,7 | 5,1 | 3,9 | 4,2 | 4,2 | 3,7 | 3,2 |
| 9 | 5,1 | 5,1 | 4,9 | 6,4 | 4,3 | 4,1 | 3,7 | 4,2 | 3,6 | 3,6 | 3,2 |
| 10 | 5,1 | 5,4 | 4,4 | 5,9 | 2,4 | 3,6 | 4 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 4,1 |
| 11 | 5,1 | 5,1 | 4,3 | 5,6 | 1,8 | 4,1 | 3,4 | 4,2 | 4,2 | 3,6 | 3,6 |
| 12 | 5,1 | 5,8 | 4,4 | 6,7 | 2,8 | 4,5 | 4 | 4,2 | 3 | 4,2 | 3,3 |
| 13 | 5,1 | 6 | 5,4 | 6,6 | 3 | 4,3 | 4,1 | 4,2 | 4,2 | 3,6 | 3 |
| 14 | 5,1 | 5 | 4,4 | 5,2 | 2,1 | 4,6 | 4,1 | 4,2 | 3,5 | 4,2 | 4,2 |
| 15 | 5,1 | 4,7 | 5,1 | 6 | 3,7 | 4 | 2,5 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 3 |
| 16 | 5,1 | 4,8 | 6,2 | 5,3 | 4,1 | 4,4 | 4,6 | 4,2 | 3,5 | 3 | 3,6 |
| 17 | 5,1 | 5,6 | 6 | 5,2 | 6,3 | 4,2 | 3,8 | 4,2 | 4,2 | 3,6 | 3,9 |
| 18 | 5,1 | 4,7 | 5,2 | 5,1 | 5,7 | 4,4 | 4 | 4,2 | 3,8 | 4,2 | 4,1 |
| 19 | 5,1 | 4,3 | 4,1 | 4,7 | 5,7 | 4,1 | 3,8 | 4,2 | 4,2 | 4,5 | 3,8 |
| 20 | 5,1 | 4,4 | 5,3 | 6,7 | 7,4 | 4 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | 3,8 | 3 |
| 21 | 5,1 | 4,2 | 4,3 | 5,5 | 5,5 | 4,2 | 5,3 | 4,2 | 3,3 | 3,2 | 4,3 |
| 22 | 5,1 | 4,5 | 4,1 | 5,5 | 7,3 | 4,3 | 5,1 | 4,2 | 4,2 | 5,1 | 3,4 |
| 23 | 5,1 | 6,9 | 4,9 | 5,5 | 4,5 | 4,3 | 4 | 4,2 | 4,5 | 4,2 | 4,5 |
| 24 | 5,1 | 4,8 | 5 | 5,5 | 5,3 | 3,8 | 4,2 | 4,2 | 4,3 | 3,6 | 3,9 |
| 25 | 5,1 | 4,5 | 3,9 | 5,5 | 5,8 | 4,1 | 3,8 | 4,2 | 4,2 | 3,8 | 3,5 |
| 26 | 5,1 | 4,3 | 4 | 5,5 | 5,8 | 5,1 | 6 | 4,2 | 3,2 | 3 | 3,2 |
| 27 | 5,1 | 5,9 | 5,3 | 5,5 | 5,5 | 4,9 | 4,1 | 4,2 | 3,8 | 3,9 | 2,9 |
| 28 | 5,1 | 5 | 5,4 | 5,5 | 6 | 5,2 | 4,1 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 3,2 |
| 29 | 5,1 | 5,1 | 5,7 | 5,5 | 5,7 | - | 3,9 | 4,2 | 2,8 | 3 | 3,6 |
| 30 | 5,1 | 6,7 | 4,5 | 5,5 | 6 | - | 3,5 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 3 |
| 31 | - | 5,4 | - | 5,5 | 5,3 | - | 3,2 | - | 3,6 | - | 3,2 |

Fuente: Proyecto Quinagua

Anexo 9. Humedad inicial del suelo de parcelas en descanso y parcelas de quinua a diferentes profundidades

| Parcela | Código | Fecha Inicio | Humedad del suelo (Vol %) a cuatro profundidades (cm) | | | |
|----------|--------|-----------------|---|-------|-------|-------|
| | | | 10 | 30 | 60 | 90 |
| Descanso | MB1 | 01/12/2006 | 0,52 | 6,28 | 8,18 | 6,64 |
| | MB2 | 01/12/2006 | 3,55 | 5,67 | 10,24 | 5,85 |
| | MB3 | 01/12/2006 | 3,33 | 9,64 | 9,19 | 9,46 |
| | MB4 | 01/12/2006 | 2,16 | 4,97 | 8,38 | 6,67 |
| | MB5 | 01/12/2006 | 1,30 | 6,59 | 8,72 | 10,39 |
| | MB6 | 01/12/2006 | 1,45 | 7,59 | 12,82 | 9,69 |
| | MB7 | 22/01/2007 | 7,64 | 12,40 | 8,25 | 7,77 |
| Quinua | MA1 | 01/12/2006 | 1,55 | 5,50 | 7,80 | 6,44 |
| | MA2 | 01/12/2006 | 1,37 | 4,72 | 5,60 | 6,26 |
| | MA3 | 01/12/2006 | 3,14 | 5,35 | 8,86 | 9,59 |
| | MA4 | 01/12/2006 | 1,45 | 4,57 | 6,56 | 8,78 |
| | MA5 | 01/12/2006 | 0,80 | 7,87 | 9,30 | 8,32 |
| | MA6 | 01/12/2006 | 1,44 | 6,08 | 8,04 | 10,53 |
| | MA7 | 14/12/2006 | 1,10 | 4,23 | 9,13 | 6,05 |
| | MA8 | 14/12/2006 | 1,02 | 3,77 | 10,52 | 8,06 |
| | MA9 | 22/01/2007 | 13,09 | 10,12 | 8,32 | 7,49 |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 10. Datos para realizar la simulación del contenido de agua en el suelo

| Cultivo | Código | Profundidad cm | SAT Vol% | FC Vol% | WP Vol% | tau | Ksat |
|-----------------|---------------|---------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------|-------------|
| Descanso | MB1 | 30 | 42,3 | 17,2 | 4,4 | 1,0 | 1500,0 |
| | | 60 | 43,2 | 22,5 | 5,1 | 1,0 | 1500,0 |
| | MB2 | 30 | 48,1 | 25,8 | 7,2 | 1,0 | 1500,0 |
| | | 60 | 52,3 | 32,6 | 16,6 | 1,0 | 1500,0 |
| | MB3 | 30 | 56,8 | 19,7 | 7,5 | 1,0 | 1500,0 |
| | | 60 | 44,0 | 15,7 | 5,7 | 1,0 | 1500,0 |
| | MB4 | 30 | 40,4 | 19,3 | 6,5 | 1,0 | 1500,0 |
| | | 60 | 43,7 | 19,5 | 6,0 | 1,0 | 1500,0 |
| | MB5 | 30 | 42,2 | 19,9 | 3,9 | 1,0 | 1500,0 |
| | | 60 | 38,0 | 17,1 | 4,2 | 1,0 | 1500,0 |
| | MB6 | 30 | 37,4 | 16,4 | 5,8 | 1,0 | 1500,0 |
| | | 60 | 38,8 | 18,4 | 6,4 | 1,0 | 1500,0 |
| | MB7 | 30 | 42,3 | 20,8 | 5,3 | 1,0 | 1500,0 |
| | | 60 | 40,6 | 20,7 | 6,7 | 1,0 | 1500,0 |
| Quinua | MA1 | 30 | 47,9 | 13,7 | 4,4 | 1,0 | 1500,0 |
| | | 60 | 39,0 | 13,1 | 4,9 | 1,0 | 1500,0 |
| | MA2 | 30 | 38,8 | 21,2 | 4,1 | 0,95 | 800,0 |
| | | 60 | 41,3 | 22,8 | 4,2 | 0,95 | 800,0 |
| | MA3 | 30 | 50,2 | 21,4 | 6,2 | 0,95 | 800,0 |
| | | 60 | 39,2 | 15,0 | 4,2 | 0,95 | 800,0 |
| | MA4 | 30 | 40,4 | 22,3 | 4,5 | 1,0 | 800,0 |
| | | 60 | 43,7 | 22,5 | 4,0 | 1,0 | 800,0 |
| | MA5 | 30 | 38,4 | 20,0 | 5,3 | 1,0 | 1500,0 |
| | | 60 | 38,0 | 19,1 | 4,2 | 1,0 | 1500,0 |
| | MA6 | 30 | 39,3 | 18,7 | 4,9 | 0,95 | 800,0 |
| | | 60 | 37,2 | 19,6 | 3,9 | 0,95 | 800,0 |
| | MA7 | 30 | 40,4 | 19,5 | 4,0 | 0,95 | 800,0 |
| | | 60 | 41,0 | 22,6 | 5,8 | 0,95 | 800,0 |
| | MA8 | 30 | 42,0 | 22,0 | 3,8 | 1,0 | 800,0 |
| | | 60 | 42,9 | 21,6 | 4,1 | 1,0 | 800,0 |
| | MA9 | 30 | 47,9 | 22,8 | 4,6 | 0,95 | 800,0 |
| | | 60 | 49,4 | 25,1 | 5,3 | 0,95 | 800,0 |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 11. Registro del nivel freático del pozo 1 con ayuda de una bincha



Fuente: Proyecto Quinagua

Anexo 12. Vertiente M3, conducida hasta este punto por una tubería, fuente de agua tanto para el hombre como para los animales



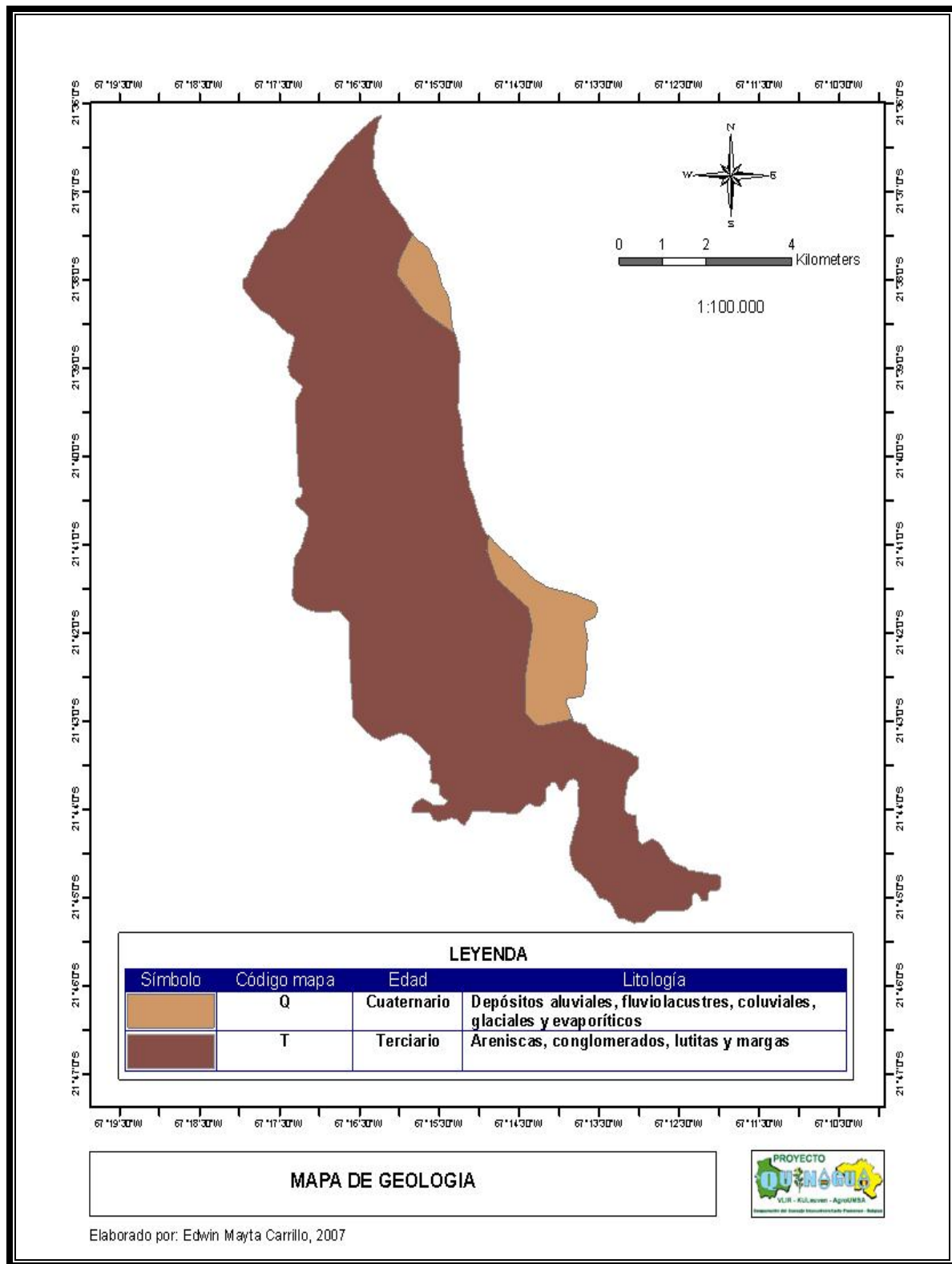
Fuente: Proyecto Quinagua

Anexo 13. Parámetros para determinar el factor de escorrentía (C)

| Cobertura vegetal | Velocidad de infiltración | Pendiente de terreno | | | | |
|---------------------------|---------------------------|----------------------|--------|-------|------|------|
| | | > 60% | 60-15% | 15-5% | 5-2% | < 2% |
| Sin vegetación | Baja | 0.80 | 0.75 | 0.70 | 0.65 | 0.60 |
| | Moderada | 0.70 | 0.65 | 0.60 | 0.55 | 0.50 |
| | Alta | 0.50 | 0.45 | 0.40 | 0.35 | 0.30 |
| Cultivos | Baja | 0.70 | 0.65 | 0.60 | 0.55 | 0.50 |
| | Moderada | 0.60 | 0.55 | 0.50 | 0.45 | 0.40 |
| | Alta | 0.40 | 0.35 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |
| Pasto, vegetación ligera | Baja | 0.65 | 0.60 | 0.55 | 0.50 | 0.45 |
| | Moderada | 0.55 | 0.50 | 0.45 | 0.40 | 0.35 |
| | Alta | 0.35 | 0.30 | 0.25 | 0.20 | 0.15 |
| Matorral | Baja | 0.60 | 0.55 | 0.50 | 0.45 | 0.40 |
| | Moderada | 0.50 | 0.45 | 0.40 | 0.35 | 0.30 |
| | Alta | 0.30 | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.10 |
| Bosques, densa vegetación | Baja | 0.55 | 0.50 | 0.45 | 0.40 | 0.35 |
| | Moderada | 0.45 | 0.40 | 0.35 | 0.30 | 0.25 |
| | Alta | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.05 |

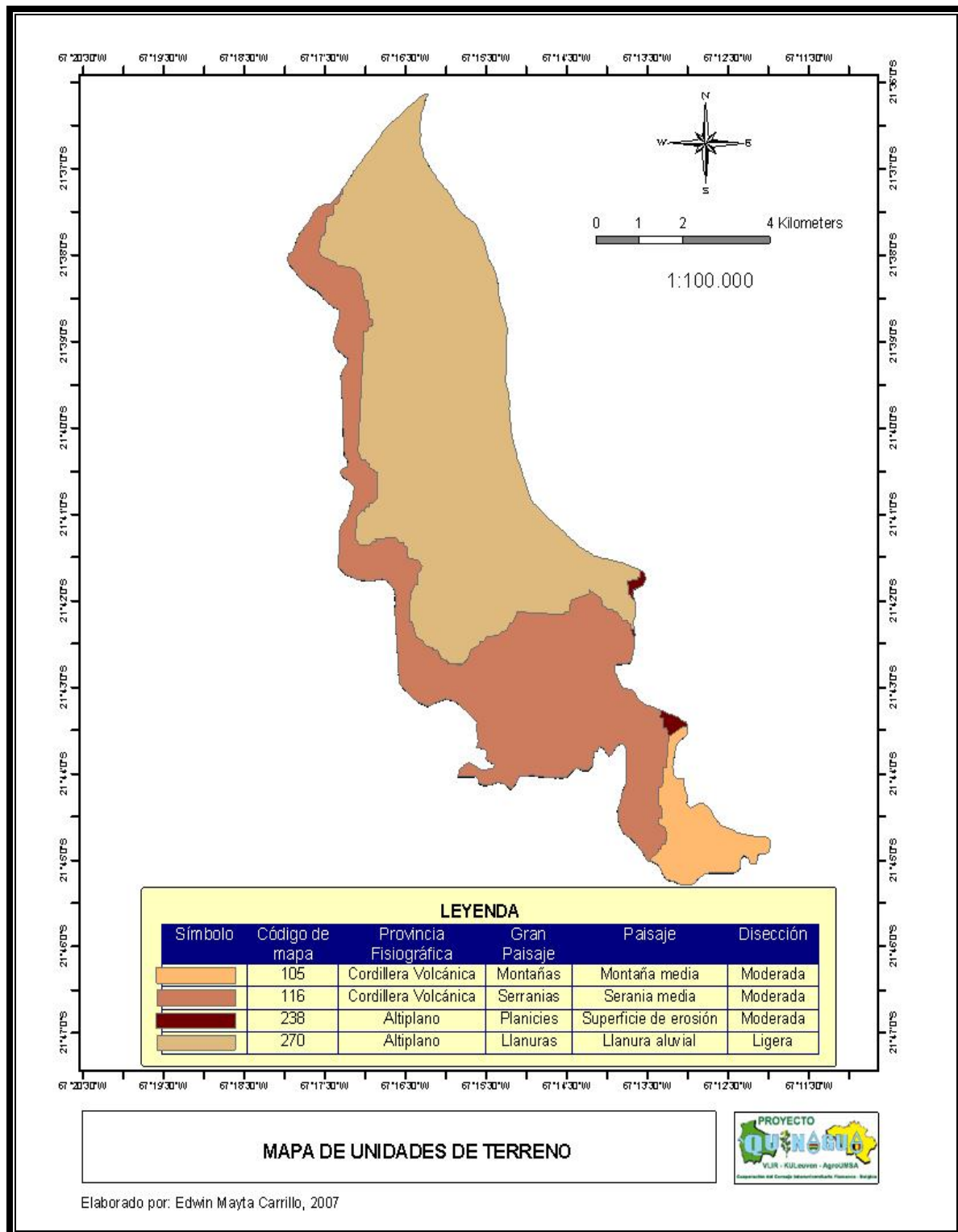
Fuente: SONISIG

Anexo 14. Mapa geológico de la cuenca



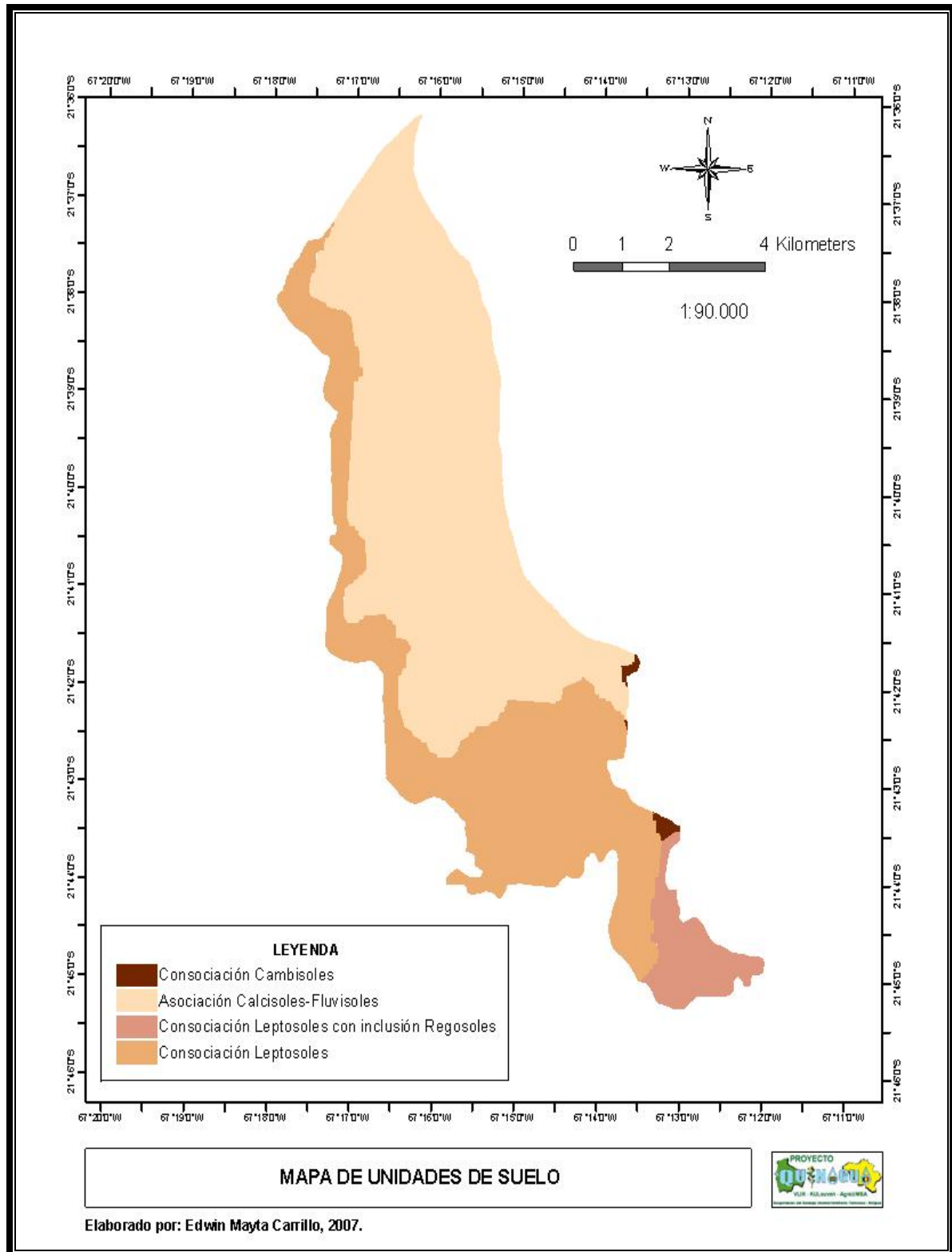
Fuente: Elaboración propia, en base al mapa geológico del departamento de Potosí, ZONISIG (2000).

Anexo 15. Mapa de unidades de terreno de la cuenca



Fuente: Elaboración propia, en base al mapa Unidades de Terreno del departamento de Potosí, ZONISIG (2000).

Anexo 16. Mapa de unidades de suelos de la cuenca



Fuente: Elaboración propia, en base al mapa Unidades de Suelo del departamento de Potosí, ZONISIG (2000).

Anexo 17. Descripción de los puntos de muestreo de suelo de parcelas de quinua

| Puntos de muestreo | Gran Paisaje | Paisaje | Geología | Suelo | Vegetación circundante | Observaciones |
|--------------------|--------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------|---|---|
| MA1 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Parastrephya spp.</i> y <i>Festuca orthophylla</i> | Siembra por hoyos |
| MA2 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> y <i>Parastrephya spp.</i> | Siembra por hoyos, suelo con piedras pequeñas |
| MA3 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> y <i>Parastrephya spp.</i> | Siembra por hoyos, suelo pedregoso |
| MA4 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Parastrephya spp.</i> y <i>Adesmia spinosissima</i> | Siembra por hoyos, próximo al lecho del río |
| MA5 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> y <i>Parastrephya spp.</i> | Siembra por hoyos, en el lecho del río |
| MA6 | Serranías | Serranía media | Roca sedimentaria del terciario | Consociación Leptosoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Parastrephya spp.</i> y <i>Adesmia spinosissima</i> | Siembra por hoyos, suelo muy pedregoso |
| MA7 | Serranías | Serranía media | Roca sedimentaria del terciario | Consociación Leptosoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Parastrephya spp.</i> y <i>Adesmia spinosissima</i> | Siembra mecanizada, suelo pedregoso |
| MA8 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Parastrephya spp.</i> y <i>Anthobryum triandrum</i> | Siembra en hoyos, presencia de rastros. |
| MA9 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> y <i>Parastrephya spp.</i> | Siembra en hoyos, presencia de graba |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 18. Descripción de los puntos de muestreo de suelo de parcelas en descanso

| Puntos de muestreo | Gran Paisaje | Paisaje | Geología | Unidad de suelo | Vegetación circundante | Observaciones |
|---------------------------|---------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------|---|--|
| MB1 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Pararstrophya spp.</i> y <i>Adesmia spinossisima</i> | Suelo con grabas, cubierto por rastrojos de t'holá |
| MB2 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Pararstrophya spp.</i> | Suelo con rastrojos del cultivo anterior |
| MB3 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Pararstrophya spp.</i> | Suelo con rastrojos del cultivo anterior |
| MB4 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Pararstrophya spp.</i> y <i>Adesmia spinossisima</i> | Suelo roturado, rastrojo del cultivo anterior |
| MB5 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Pararstrophya spp.</i> | Suelo con rastrojos de quinua |
| MB6 | Serranías | Serranía media | Roca sedimentaria del terciario | Consociación Leptosoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Pararstrophya spp.</i> y <i>Adesmia spinossisima</i> | Suelo muy pedregoso, descubierto |
| MB7 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> , <i>Pararstrophya spp.</i> y <i>Adesmia spinossisima</i> | Suelo roturado, descubierto |

Fuente: Elaboración propia

Anexo19. Términos usuales para describir los intervalos de pH en el suelo

| Acidez o alcalinidad | pH del suelo |
|------------------------|---------------|
| Excesivamente ácido | Menor de de 4 |
| Fuertemente ácido | 4-5 |
| Moderadamente ácido | 5-6 |
| Ligeramente ácido | 6-6.5 |
| Neutro | 6.5-7.5 |
| Ligeramente alcalino | 8-9 |
| Fuertemente alcalino | 9-10 |
| Excesivamente alcalino | 10 o mas |

Anexo 20. Límites aproximados de clases de salinidad

| Clases | Conductividad de extracto de saturación (dS/m) |
|---------------------------------|--|
| Clase 0: libre | 0 - 4 |
| Clase 1: ligeramente afectado | 4 - 8 |
| Clase 2: moderadamente afectado | 8 -15 |
| Clase 3: Fuertemente afectado | más de 15 |

Clase 0

Suelos libres de exceso de sales o álcali. Prácticamente ningún cultivo se encuentra inhibido en su crecimiento, o muestra daños provocados por exceso de sales o álcali.

Clase 1

Suelos ligeramente afectados por sales o álcali. El crecimiento de las plantas sensibles está inhibido, pero las plantas tolerantes pueden subsistir.

Clase 2

Suelos moderadamente afectados por sales o álcali. El crecimiento de los cultivos está inhibido y ninguna planta se desarrolla bien.

Clase 3

Suelos fuertemente afectados por sales o álcali. Solamente pocas especies vegetativas pueden sobrevivir.

Anexo 21. Descripción de los puntos de muestreo de agua.

| Puntos de muestreo | Gran Paisaje | Paisaje | Geología | Unidad de suelo | Vegetación circundante | Pendiente | Uso | Observaciones |
|--------------------|--------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|---|-----------|------------------|---|
| RQ | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> <i>Parastrephya spp.</i> | 2-5% | Ganado | Presenta un cauce de 15 m de ancho, 30 cm de profundidad |
| P1 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> <i>Parastrephya spp.</i> | 2-5% | Sin uso | Construida de piedra y barro, 6m de profundidad |
| P2 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> <i>Parastrephya spp.</i> | 2-5% | Humano Ganado | Construida de piedra y barro, 11 m de profundidad |
| M1 | Serranías | Serranía media | Roca sedimentaria del cuaternario | Consociación Leptosoles | <i>Baccharis incarum</i> <i>Parastrephya spp.</i> <i>Anthobryum triandrum</i> | 15-60 % | Ganado | Pequeño bofedal, un área de 30 m ² , situado en el lecho del cauce del río |
| M2 | Serranías | Serranía media | Roca sedimentaria del cuaternario | Consociación Leptosoles | <i>Baccharis incarum</i> <i>Parastrephya spp.</i> <i>Anthobryum triandrum</i> <i>Festuca orthophylla</i> | 15-60% | Ganado | Pequeño humedal de un área de 5 m ² , situado en una cárcava |
| M3 | Llanuras | Llanura aluvial | Roca sedimentaria del terciario | Calcisoles-Fluvisoles | <i>Baccharis incarum</i> <i>Parastrephya spp.</i> <i>Adesmia spinosissima</i> <i>Trichocereus spp.</i> | 2-5% | Humano Ganado | Sus aguas son conducidos por tubería |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 22. Análisis físico químico de agua para riego, febrero de 2007

| Parámetros | RQ | P1 | P2 | M1 | M2 | M3 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| pH | 8,09 | 7,08 | 7,43 | 7,44 | 7,26 | 7,34 |
| C E (mS/cm) | 4,800 | 1,382 | 0,737 | 0,625 | 0,609 | 0,784 |
| Sodio (mg/l) | 428,55 | 109,24 | 34,51 | 25,47 | 28,97 | 37,44 |
| Potasio (mg/l) | 38,72 | 14,12 | 9,14 | 5,13 | 6,63 | 9,39 |
| Calcio (mg/l) | 146,42 | 54,38 | 58,29 | 58,18 | 58,25 | 71,88 |
| Magnesio (mg/l) | 38,26 | 16,19 | 13,68 | 12,10 | 7,85 | 12,55 |
| Cloruros (mg/l) | 38,26 | 16,19 | 13,68 | 12,10 | 7,85 | 12,55 |
| Sulfatos (mg/l) | 49,68 | 4,20 | 81,07 | 104,68 | 90,75 | 44,39 |
| Carbonatos (mg/l) | 1,20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Bicarbonatos (mg/l) | 150,98 | 169,27 | 183,00 | 172,83 | 169,27 | 176,40 |
| Sólidos totales (mg/l) | 3342,54 | 1044,18 | 634,35 | 566,80 | 593,59 | 653,84 |
| Sólidos en suspensión (mg/l) | 24,00 | 9,00 | 1,15 | 1,10 | 13,00 | 4,35 |
| Sólidos disueltos (mg/l) | 3318,54 | 1035,18 | 633,20 | 565,70 | 580,59 | 649,49 |
| Boro (mg/l) | 6,39 | 4,11 | 4,61 | 1,27 | 1,59 | 2,48 |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 23. Análisis físico químico de agua para riego, julio de 2007

| Parámetros | P1 | P2 | RQ |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| pH | 7,49 | 7,66 | 7,88 |
| C E (mS/cm) | 1,924 | 0,783 | 3,270 |
| Sodio (mg/l) | 291,90 | 59,47 | 372,70 |
| Potasio (mg/l) | 20,90 | 10,00 | 29,70 |
| Calcio (mg/l) | 64,57 | 57,99 | 96,15 |
| Magnesio (mg/l) | 18,63 | 12,17 | 28,51 |
| Cloruros (mg/l) | 595,61 | 158,83 | 893,41 |
| Sulfatos (mg/l) | 9,09 | 91,14 | 67,04 |
| Carbonatos (mg/l) | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Bicarbonatos (mg/l) | 207,40 | 156,16 | 212,28 |
| Sólidos totales (mg/l) | 1176,08 | 721,41 | 1855,12 |
| Sólidos en suspensión (mg/l) | 17,00 | 84,00 | 23,00 |
| Sólidos disueltos (mg/l) | 1159,08 | 637,41 | 1832,12 |
| Boro (mg/l) | 5,30 | 4,18 | 7,54 |

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 24. Restricciones de uso del agua para riego

| Problema Potencial | Unidades | Grado de restricción de uso | | |
|---|----------|-----------------------------|-------------------|-----------|
| | | Ninguna | Ligera a Moderada | Severo |
| Salinidad (afecta disponibilidad de agua para el cultivo) | | | | |
| Eca | dS/m | < 0,7 | 0,7 - 3,0 | > 3,0 |
| (o) | | | | |
| TSS | mg/l | < 450 | 450 - 2000 | > 2000 |
| Infiltración (reduce infiltración; evaluar usando a la vez la CEa y RAS) | | | | |
| RAS = 0 - 3 y CEa = | | > 0,7 | 0,7 - 0,2 | < 0,2 |
| = 3 - 6 = | | > 1,2 | 1,2 - 0,3 | < 0,3 |
| = 6 - 12 = | | > 1,9 | 1,9 - 0,5 | < 0,5 |
| = 12 - 20 = | | > 2,9 | 2,9 - 1,3 | < 1,3 |
| = 20 - 40 = | | > 5,0 | 5,0 - 2,9 | < 2,9 |
| Toxicidad de iones específicos (afecta cultivos sensibles) | | | | |
| Sodio (Na) | | | | |
| riego por superficie | RAS | < 3 | 3 - 9 | > 9 |
| riego por aspersión | me/l | < 3 | > 3 | |
| Cloro (Cl) | | | | |
| riego por superficie | me/l | < 4 | 4,0 - 10 | > 10 |
| riego por aspersión | me/l | < 3 | > 3 | |
| Boro (B) | me/l | < 0,7 | 0,7 - 3,0 | > 3,0 |
| Varios (afecta cultivos sensibles) | | | | |
| Nitrógeno (NO ₃ - N) | me/l | < 5 | 5,0 - 30 | > 30 |
| Bicarbonato (HCO ₃) | me/l | < 1,5 | 1,5 - 8,5 | > 8,5 |
| (aspersión foliar únicamente) | | | | |
| pH | | Amplitud Normal; | | 6,5 - 8,4 |

Fuente: Ayers y Wescott, 1985

Anexo 25. Parámetros para determinar la de agua para riego

| Características | Calidad del agua de riego | |
|-------------------------|---------------------------|------------|
| | Buena | Marginal |
| CE (dS/m) | 0 – 1 | 1 - 3 |
| Sólidos disueltos (ppm) | 0 – 500 | 500 - 1500 |

Fuente: Epstein citado por Herbe *et al.*, 2002

Anexo 26. Clasificación de las aguas de riego en función de los grados hidrométricos franceses

| Tipo de agua | Grados franceses |
|--------------------|------------------|
| Muy dulce | < 7 |
| Dulce | 7 -14 |
| Medianamente dulce | 14 - 22 |
| Medianamente dura | 22 - 32 |
| Dura | 32 - 54 |
| Muy dura | > 54 |

Fuente: Ávila *et al.*, s. f.

Anexo 27. Clasificación de las aguas de riego en función al peligro de obturación

| Tipo de obturación | Peligro de obturaciones | | |
|--|-------------------------|---------------|---------|
| | Bajo | Medio | Alto |
| Física Partículas en suspensión (mg/l) | 50 | 50-100 | >100 |
| Química | | | |
| pH | 7 | 7-8 | >8 |
| Hierro (mg/l) | 0.1 | 0.1-1.5 | >1.5 |
| Magnesio (mg/l) | 0.1 | 0.1-1.5 | >1.5 |
| Calcio (mg/l) | 10 | 10-50 | >50 |
| Carbonatos (mg/l) | 100 | 100-200 | >200 |
| Biológica | | | |
| Bacterias/cm ³ | 10.000 | 10.000-50.000 | >50.000 |

Fuente: Ávila *et al.*, s. f.

Anexo 28. Resultados del análisis de calidad de agua en ríos y lagunas del sudoeste de Potosí

| Punto | Ubicación | Punto de muestreo | pH | Sól. Dis. (mg/l) | Plomo (mg/l) |
|--------------|-------------------|---------------------------|-----------|-------------------------|---------------------|
| 1 | Lag. Pasto Grande | Sector oeste | 9.3 | 4.428 | 0.020 |
| 2 | Lag. Cachi | Sector oeste | 10.4 | 72.220 | 1.300 |
| 3 | Sol de Mañana | Torre de perforación | 9.2 | 626 | 0.005 |
| 4 | R. Chunchullerito | Entrada pastizal | 8.0 | 170 | 0.003 |
| 5 | Lag. Challviri | Cerca de vertiente termal | 9.1 | 3.200 | 0.040 |
| 6 | R. Huayllajara | 2,5 km de pista | 8.9 | 332 | 0.003 |
| 7 | Lag. Colorada | Isla de borax | 8.6 | 114.600 | 1.900 |
| 8 | Lag. Colorada | Fuente termal Pozo LC2 | 8.4 | 378 | 0.007 |
| 9 | R. Quetena | 4,5 km de población | 8.0 | 234 | 0.010 |
| 10 | Lag. Chojlla | Sector sur | 9.1 | 13.000 | 3.600 |
| 11 | R. Quetena | Tramo central | 8.6 | 1.436 | 0.012 |
| 12 | R. Grande | Próximo a Uyuni | 8.6 | 1.938 | 0.009 |
| 13 | Lag. Verde | Sector oeste | 8.6 | 2.100 | 0.018 |
| 14 | Lag. Hedionda | Sobre el camino | 8.7 | 66.925 | 1.500 |