



Autores y editores:
García M., Miranda R. y
Fajardo H.

**MANUAL DE MANEJO DE LA
FERTILIDAD DE SUELO BAJO
RIEGO DEFICITARIO PARA EL
CULTIVO DE LA QUINUA EN EL
ALTIPLANO BOLIVIANO**

**Publicación financiada y apoyada por UNESCO-CAZALAC-LAC
y por el Proyecto SUMAMAD
bajo el apoyo técnico del equipo del Proyecto QUINUAGUA
de la UMSA, La Paz, Bolivia**

Autores y Editores:
Magalí García Cárdenas
Roberto Miranda Casas
Héctor Fajardo Durán

**MANUAL DE MANEJO DE LA
FERTILIDAD
DE SUELO BAJO RIEGO DEFICITARIO
PARA EL CULTIVO DE LA QUINUA
EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO**



Índice general

INTRODUCCION	1
SUMMARY	4
Capítulo 1 IMPORTANCIA DEL SUELO	7
1.1. Funciones que brinda el suelo.....	7
1.2. Formación del suelo	8
1.2.1. Clima.....	8
1.2.2. Material parental y relieve	9
1.2.3. Organismos.....	9
1.3. Organización del suelo	9
1.4. Propiedades físicas de los suelos	10
1.4.1. Textura	11
1.4.2. Estructura	12
1.4.3. Profundidad.....	14
1.5. Contenido de agua en el suelo	14
1.6. Propiedades coloidales	16
1.7. Acidez del suelo.....	17
1.8. Interacciones físico químico biológicas que influyen en la descomposición de la materia orgánica aportada	19
Capítulo 2 CLIMATOLOGÍA ACTUAL Y PREVISTA DEL ALTIPLANO BOLIVIANO Y MANEJO DE AGUA PARA EL CULTIVO DE LA QUINUA	22
2.1. Introducción	22
2.2. Climatología del Altiplano Boliviano	23
2.2.1. Relación entre la Evapotranspiración y la precipitación	24
2.3. Productividad de uso de agua de la quinua	28
2.4. Respuesta fenológica del cultivo de la quinua al estrés hídrico típico del altiplano en la agricultura a secano	29
2.5. Evapotranspiración máxima y coeficientes de cultivo de la quinua	30
2.6. Riego deficitario de la quinua.....	31
2.7. Calendario de riego	29
2.8. Cambio climático y producción de quinua en el Altiplano Boliviano.....	30
2.8.1. Análisis de tendencias históricas mensuales.....	31
2.8.2. Variaciones esperadas en las temperaturas y la precipitación mensual en las zonas de estudio hasta 2050	31
2.8.3. Extremos climáticos de mayor importancia para el cultivo de la quinua en la zona	33

2.8.3.1.	Riesgo de heladas	34
2.8.3.2.	Ciclo de cultivo	35
2.8.3.3.	Temperaturas máximas extremas.....	35
2.8.3.4.	Riesgo de sequía.....	36
2.8.3.5.	Periodo de retorno de las Temperaturas y Precipitaciones extremas.....	36
2.8.3.6.	Proyecciones de humedad del suelo.....	37
2.8.4.	Impactos en el sistema productivo de la quinua	37
Capítulo 3 FACTORES BIOFÍSICOS QUE DETERMINAN LA PRODUCTIVIDAD DE LA QUINUA EN EL ALTIPLANO ALTO ANDINO.....		40
3.1.	Principales área de cultivo de quinua	41
3.2.	Factores ambientales y biofísicos	42
3.2.1.	Condiciones climáticas del Altiplano.....	42
3.2.2.	Altitud.....	42
3.2.3.	Suelos	43
3.3.	Humedad del suelo	47
3.4.	Sistemas de manejo de suelo y abonos orgánicos.....	48
Capítulo 4 MANEJO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO PARA EL CULTIVO DE QUINUA.....		51
4.1.	Respuesta del cultivo de la quinua al abonamiento	52
4.2.	Relación aprovechamiento de Nitrógeno y humedad del suelo.....	53
4.3.	Etapas para diseñar un sistema de recomendación de abonamiento.....	54
4.3.1.	Análisis de suelos.....	54
4.3.2.	Muestreo de suelos.....	55
4.3.2.1.	Selección del área a ser muestreada.....	55
4.3.2.2.	Época de muestreo.....	56
4.3.2.3.	Número de muestras simples y profundidad de muestreo	56
4.3.2.4.	Material necesario para el muestreo	57
4.3.3.	Análisis de laboratorio.....	57
4.3.4.	Interpretación de los resultados de laboratorio	58
4.4.	Relaciones catiónicas	60
4.5.	Contenido de nitrógeno en el suelo	60
4.6.	Contenido de Fósforo.....	60
4.7.	Contenido de potasio	61
4.8.	Relación C/N y la mineralización del nitrógeno	61
4.9.	Calculo de nitrógeno, fósforo y potasio disponible en el suelo	61
4.10.	Épocas de aplicación	64

4.11.	Forma de aplicación	65
Capítulo 5 CALIBRACION DE UN MODELO DE CRECIMIENTO PARA MODELAR LA RESPUESTA A LA FERTILIDAD Y EL APOORTE DE AGUA DEL CULTIVO DE LA QUINUA		
5.1.	El enfoque cualitativo de Aquacrop	67
5.2.	Necesidad de calibrar el modelo.....	70
5.3.	Uso y calibración del modelo AquaCrop para fertilidad limitada	70
5.3.1.	Menú principal	71
5.3.1.1.	Clima	72
5.3.1.2.	Cultivo.....	73
5.3.1.3.	Suelo	74
5.3.1.4.	Condiciones iniciales	76
5.3.2.	Calibración del modelo Aquacrop cuando la fertilidad del suelo es limitante	77
5.3.3.	Corrida del modelo calibrado par diferentes condiciones de fertilidad y humedad del suelo	79
5.3.3.1.	Niveles de fertilidad	79
5.3.3.2.	Riego.....	80
5.3.4.	Simulación	82
Capítulo 6 FACTORES DE DEGRADACION DE SUELO DEL SISTEMA QUINUERO		
6.1.	Factores que influyen en la degradación de los suelos.....	86
6.1.1.	Factores Naturales	87
6.2.1.	Factores antrópicos	87
6.2.	Causas de la degradación física del suelo	88
Capítulo 7 PRACTICAS DE MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR EL SISTEMA PRODUCTIVO DE LA QUINUA		
7.1.	Prácticas agronómicas.....	92
7.2.	Elección del cultivo de acuerdo a la aptitud de uso del suelo	93
7.2.1.	Barbechado	93
7.2.2.	Coberturas vegetales y abonos verdes	94
7.2.3.	Adición de estiércol.....	97
7.2.4.	Sistemas de labranza	97
CONCLUSIONES		100
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....		101
Anexos		108

Índice de figuras

Figura No. 1.1 a) Formación del perfil del suelo a partir de los Factores y Procesos formadores; b) perfil de suelo con tres horizontes.....	10
Figura No. 1.2. Triangulo para la estimación de la clase textural del suelo.....	11
Figura No. 1.3. Diferentes tipos de estructura de suelos minerales y su ocurrencia en el perfil. Los diseños ilustran sus características esenciales y las fotos indican como aparecen en el campo.	13
Figura No. 1.4. Disponibilidad de agua entre la Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente.....	15
Figura No. 1.5. Esquema del sistema coloidal del suelo, fase liquida y absorción por la raíz	17
Figura No. 1.6. Disponibilidad de nutrientes y comportamiento del fósforo en función al pH.....	18
Figura No. 1.7. Disponibilidad de elementos de acuerdo a la variación del pH del suelo. En la parte superior se presenta los rangos de pH.....	19
Figura No. 2.1. Descripción esquemática de los patrones de circulación del aire en un corte latitudinal típico del Altiplano boliviano. a) Episodios de lluvia, b) Episodios secos. Las flechas grandes sin color indican la dirección predominante de la circulación troposférica. Las flechas sólidas describen la circulación del aire húmedo de componente Este. Las flechas punteadas describen la circulación del aire seco de componente Oeste. Las flechas verticales muestran la elevada presión sobre el Pacífico. (Extraído de Garreaud, <i>et al.</i> , 2003).....	24
Figura No. 2.2. Izquierda: Evapotranspiración de Referencia media (ET _o) en mm/día en Febrero que es un mes de elevada actividad agrícola en el Altiplano Boliviano. Derecha: Precipitación media anual (mm) para la zona (Geerts <i>et al.</i> , 2006)	25
Figura No. 2.3. Izquierda: Precipitación esperada en años secos y Derecha: en años húmedos en el altiplano Boliviano en (mm/año) determinada por el método de L-momentos (Canedo, 2013).....	26
Figura No. 2.4. Probabilidad de un día con lluvia para cada día del año en cuatro puntos geográficos situados en el Altiplano Boliviano representativos de zonas productoras de quinua.....	27
Figura No. 2.5. Representación geográfica de la duración de la época de lluvias en el Altiplano Boliviano en años a) normales y b) secos (Geerts <i>et al.</i> , 2006)	28
Figura No. 2.6. Regresiones entre tiempo a la antesis (en días y GDD) y Transpiración acumulada (Ta/ET _o) a 60 DDS. Los círculos corresponden a tratamientos en 2005-2006 (establecimiento de la correlación), y los triángulos para los tratamientos 2006-2007 usados para validación.	29
Figura No. 2.7. Regresión lineal entre ET _{a pre} /ET _{a post} y EUA para experimentos de campo (barras verticales muestran 1 desv.est. (Geerts <i>et al.</i> 2008a).....	32
Figura No. 2.8. Rendimientos esperados (barras) y eficiencia de uso de agua (puntos) para varias estrategias de manejo en el Altiplano Central Boliviano (Geerts <i>et al.</i> 2008b).	32

Figura No. 2.9. Función de Producción de Agua del Cultivo para quinua en parcelas experimentales (círculos negros) y bajo varias estrategias de riego deficitario, simuladas en el Altiplano Norte (círculos sin relleno), Central (cruz) y Sud (asteriscos) con indicación (línea sólida) de la curva logística (Geerts et al., 2009).....	29
Figura No. 2.10. Gráfico práctico para la aplicación de riego deficitario de quinua en el Altiplano Boliviano si se enfrentan condiciones húmedas, normales o secas durante las etapas vegetativas. Los números indican los intervalos necesarios entre aplicaciones de riego de 20 mm en surcos cortos y suelos francos. El riego debe ser aplicado solo durante los periodos de color azul. La ocurrencia de estos periodos se indica en Días Después de la Siembra (DDS). El calendario es válido para una siembra de alrededor de mediados de Octubre. Las láminas y las frecuencias pueden variar en función al tipo de suelo (Adaptado de Geerts et al., 2010, en base a trabajos de campo de los autores).....	30
Figura No. 2.11 Diferencias en el promedio de registros de la Temperatura Mínima (arr. izq.) Máxima (arr. der.) y Precipitación antes y después de 1983 para el Altiplano Boliviano. (Valdivia et al. 2010).32	32
Figura No. 2.12. Valores promedio mensuales proyectados de Tmin (arriba), Tmax (centro) y PP (abajo) para las estaciones estudiadas. Diamantes representan a los promedios de la población histórica, Cuadrados a 2020-2030 y Triángulos a 2045-2055.....	33
Figura No. 2.13. Tmin diaria promedio (líneas negras) con el rango de una desviación estándar de la población para a) y b) periodo histórico; c) y d) 2020-2030 y e) y f) 2045-2055 en las estaciones de (izquierda) Patacamaya y (derecha) Río Mulatos.	34
Figura No. 2.14.-a) Duración del ciclo de cultivo y b) Tmax extrema anual en el periodo histórico (azul) y 2020-2030 (rosa) y 2045-2055 (rojo) en Río mulatos (R.M.) y Patacamaya (PAT). Los boxplots muestran la variabilidad con los valores máximos y mínimos.....	35
Figura No. 2.15. Periodo de retorno de a) Tmax y b) PP extremas para las estaciones estudiadas. En círculos azules el registro histórico, en cuadrados rojos el registro 2045-2055.....	37
Figura No. 3.1. Localización del Altiplano Boliviano.....	41
Figura No. 4.1. Etapas para el diseño de recomendaciones de abonamiento.....	55
Figura No. 4.2. Delimitación de áreas de muestreo de suelo en función al paisaje y otros atributos como relieve, pendiente, uso del suelo, etc. (Manual de adubação e de calagem, 2004)......	56
Figura No. 4.3. Diferentes materiales para realizar un muestreo de suelos. (1). Barreno de rosca; (2) barreno calador; (3) barreno holandés; (4) barreno cilíndrico; (5) pala de corte.....	57
Figura No. 5.1. Cobertura verde de cultivo (CC) afectada por la fertilidad de suelo por un desarrollo más lento y un desarrollo menos denso del dosel y una reducción de la cobertura de cultivo durante el periodo de cultivo	69
Figura No. 5.2. Efecto del estrés de fertilidad de suelo reduce la Productividad de agua (WP*) a lo largo de la estación de cultivo debido a que más cuanto más biomasa (B) se produce, la cantidad de nutrientes disponibles en el suelo se reduce por el incremento de consumo por una planta desarrollándose en relación a la Transpiración acumulada (ΣTr)	69

Figura No. 6.1. a) Parcelas de quinua desprovistas de toda cobertura vegetal b) salinización del suelo como factor de degradación.	85
Figura No. 6.2. Factores naturales y antrópicos que influyen en la degradación de los suelos, según Lal y Steward (1992), citado en Orsag (2000).....	87
Figura No. 6.3. a) Uso de implementos agrícolas para habilitar cultivos de quinua y b) suelo descubierto luego de la cosecha de la quinua en el Altiplano sur de Bolivia.	88
Figura No. 7.1. Área productiva, producción y rendimiento de quinua en Bolivia (Jacobsen, 2012)...	92
Figura No. 7.2. a) Cobertura vegetal natural conformada por tola (<i>Parestrephya lepidophylla</i>) y b) En las cercanías al salar de Uyuni, se desarrollan especies como el <i>Distichilis humilis</i> (chiji blanco) y <i>Suaeda foliosa</i> (kauchi), que son plantas halofitas. En estas zonas los suelos son salinos sódicos y es muy difícil hacer agricultura, aunque variedades de quinua real son capaces de soportar estos altos contenidos de sales.	95

Índice de tablas

Tabla 1.1. Influencia de las fracciones de arena, limo y arcilla en algunas propiedades y comportamiento del suelo.....	11
Tabla 1.2. Valores de la humedad a Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente relacionados con la textura del suelo, según (Raes 2001)	15
Tabla 2.1. Etapas de desarrollo y características del cultivo para una variedad típica de quinua (Garcia et al, 2003, Geerts 2009). Valores desarrollados bajo las guías publicadas por FAO y calibradas para la ecuación de ETo de la FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998)	30
Tabla 2.2. Probabilidad de ocurrencia (%) de un tipo de año hidrológico en los periodos Octubre-Diciembre (O-D) y Enero a Marzo (E-M) en el registro histórico y en 2045-2055	36
Tabla 3.1. Textura de suelos para dos sitios diferentes: laderas de colinas y planicie Aluvial, correspondientes a la Comunidad de Irpani, ubicada en el Altiplano sud de Bolivia.	44
Tabla 3.2. Diferentes formas de nitrógeno en función de su estado de oxidación.	45
Tabla 3.3. Características químicas de suelos en el área intersalar de Uyuni.....	46
Tabla 3.4. Balance de Nitrógeno total y disponible suelo - planta (kg/ha), para la cosecha de toda la planta (exceptuando el sistema radicular), bajo la incorporación de diferentes niveles de estiércol en un campo del Altiplano Central Oeste Boliviano para la producción de 1800 Kg/Ha de grano de quinua (Mamani, 2011).....	47
Tabla 4.1. Profundidad efectiva de suelo en cm	58
Tabla 4.2. Valores de la densidad aparente, textura y porosidad.	58
Tabla 4.3. Interpretación de los contenidos de Materia orgánica (Walkey y Black), Nitrógeno total (Kjeldahl), Fosforo disponible (Olsen modificado) y Potasio (Peech)	58
Tabla 4.4. Rangos para la interpretación de la reacción del suelo (pH), por el método del potenciómetro	59
Tabla 4.5. Rangos para la interpretación de la conductividad eléctrica (mmhos cm ⁻¹ o mS cm ⁻¹)	59
Tabla 4.6. Rangos para la interpretación de la presencia de carbonatos en porcentaje. Método del Gasómetro; Saturación de Bases (%) por sumatoria de cationes intercambiables.	59
Tabla 4.7. Rangos para la interpretación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC en cmol (+) kg ⁻¹ de suelo). Método del Acetato de Amonio.	60
Tabla 4.8. Aporte de nutrientes por un suelo de la estación experimental de Patacamaya.	62
Tabla 4.9. Aporte de NPK por el suelo presentado en la Tabla 4.8.....	62
Tabla 4.10. Aporte de nutrientes por el estiércol, bajo la aplicación de 12 toneladas de estiércol húmedo por Ha	63

Tabla 4.11. Aporte de NPK por el estiércol presentado en la Tabla 4.10.....	63
Tabla 4.12. Oferta de nutrientes por el suelo y el estiércol cuando se aplica 12 ton de este insumo por hectárea en el suelo del ejemplo.	64
Tabla 5.2. Comparación entre los valores simulados y los reales.....	84
Tabla 7.1. Contenido de nutrientes en el estiércol de ganado ovino y camélido en el Altiplano Boliviano.....	97

INTRODUCCION

La quinua es, económica y socialmente, uno de los cultivos más importantes de la zona andina. Siendo originaria de los Andes Sudamericanos, se desarrolla ampliamente bajo las condiciones del Altiplano Boliviano. Aunque su diversidad genética la distribuye a lo largo de ecosistemas de diferentes altitudes en la zona andina, su cultivo comercial se restringe a las zonas altiplánicas de Bolivia y Perú, bajo condiciones eco-sistémicas específicas de mucha fragilidad de suelos, de extremos climáticos y poca tecnología en insumos añadidos. Ante estas condiciones, los rendimientos obtenidos de las parcelas de quinua son generalmente marginales no llegando a obtenerse en condiciones de agricultor, valores mayores a los 700 Kg/ha.

Entre los pilares para una producción agropecuaria sostenible se encuentran el manejo de suelo tanto orientado a la conservación como al manejo de la fertilidad, los cuales al integrarse a un adecuado manejo del agua, podrían garantizar una mejor producción. Este problema es mucho mayor en el caso específico de la quinua, que generalmente es cultivada bajo condiciones de poco aporte de fertilizantes y de agua, reduciendo sus posibilidades de expresar su extraordinaria eficiencia de uso de agua y de nutrientes.

El problema de manejo de suelos para el cultivo de quinua, no se restringe solo a la poca aplicación de fertilización para el cultivo sino también a las prácticas de conservación de suelos. La aplicación de técnicas de preparación de tierras y de labranza inadecuadas para llevar adelante el cultivo de la quinua, producen procesos erosivos de magnitud, pues se exponen a la agresividad del clima del altiplano. Este manejo combinado con poca aplicación de fertilizantes y el reducido concepto de la aplicación de riego, se constituyen en parte de los factores que mayor influencia podría tener para los reducidos rendimientos permanentemente reportados para el cultivo con consecuentes fuertes descensos en la productividad general de la zona y deterioro del medioambiente.

Los recursos naturales y el medio ambiente de las áreas productoras de quinua podrían mejorarse apreciablemente y a corto plazo con el empleo acertado de prácticas de labranza y prácticas auxiliares de manejo de la fertilidad de los suelos combinado con la aplicación de riego eficiente y oportuno. Lamentablemente poca investigación se encuentra disponible sobre sistemas de labranza, fertilización, riego y prácticas de manejo y conservación de suelos orientados a optimizar el uso de los limitados recursos del altiplano. Por ello, la aplicación de

estos conceptos se ha visto limitada por la falta de guías técnicas y profesionales sobre tecnologías conservacionistas de manejo de suelos. Esta falta de investigación y difusión también afecta al poco desarrollo de políticas y estrategias adecuadas para apoyar un desarrollo rural y agrícola sostenible a largo plazo en las zonas productoras de quinua.

El presente manual tiene el objetivo de cubrir parcialmente al menos, las sentidas necesidades de contar con guías técnicas de manejo del complejo suelo-agua para el cultivo de quinua que incluya el concepto de sostenibilidad de inicio a final. Específicamente, se espera que los usuarios se familiaricen con los conceptos generales de la condición de los suelos; la caracterización de los problemas de degradación del suelo y el agua bajo las condiciones actuales y previstas del clima en el altiplano; el conocimiento de las necesidades de los suelos donde se cultiva quinua en relación a su fertilidad propia o aportada, las pautas para la elaboración de una estrategia eficaz de aplicación de agua y fertilizantes en los momentos claves para su mejor uso y finalmente las guías para el uso del modelo Aquacrop (liberado por la FAO en 2005) que ha sido calibrado para el cultivo de la quinua, para que el usuario pueda testear estrategias de diferentes modelos de aplicación de agua y fertilizantes con el fin de optimizar este manejo. También se presentan sugerencias que promuevan acciones de conservación de suelos que reduzcan los intensos problemas de erosión que rodean al sistema productivo quinuario.

ESTRUCTURA Y CONTENIDO

El presente manual se estructura en temas agrupados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Conceptos generales del manejo del suelo y el agua con una descripción de las propiedades, procesos y funciones del suelo. En este capítulo se presentan en forma genérica algunos conceptos de las propiedades físicas y químicas del suelo con cierta especificidad al cultivo de la quinua.

Capítulo 2. Climatología actual y prevista del altiplano boliviano y manejo de agua para el cultivo de la quinua, en el que se presenta los factores que influyen para que el Altiplano presente ciertas características agroclimáticas típicas que de alguna manera han determinado el comportamiento hídrico y fisiológico de la quinua. También se presentan resultados de trabajos de proyección a 2050 de las posibles condiciones termopluviométricas tanto medias como extremas que (de acuerdo a los resultados de algunos modelos) enfrentará el cultivo para su producción en el futuro en la zona altiplánica. Finalmente se incluye el análisis de la respuesta de la quinua al manejo de agua con sugerencias técnicas para la aplicación de riego deficitario.

Capítulo 3. Presenta una descripción sucinta de los factores biofísicos que determinan la productividad de quinua en general y en el Altiplano boliviano presentando el entorno de los análisis del complejo riego deficitario-nutrientes postulados en este manual.

Capítulo 4. Describe el manejo de la fertilidad del suelo para sostener una producción a largo plazo del cultivo de la quinua, enfocándose a las necesidades de incorporación de abonos especialmente en forma de estiércol, aunque los valores de necesidad de nutrientes pueden

aplicarse también al cálculo de fertilizantes minerales. También se presenta ejemplos de cálculo para la aplicación adecuada de estiércol.

Capítulo 5. Presenta los detalles para el manejo del Modelo de Crecimiento Aquacrop liberado por la FAO y su calibración para manejo de fertilidad de suelo, el cual integra la influencia del nivel nutricional del suelo y la cantidad de agua disponible en el suelo para la producción de quinua y en el que se puede incluir la posibilidad de trabajar con riego deficitario. Los detalles presentados en este capítulo pueden también ser utilizados en otros cultivos, aunque los ejemplos específicos son para la quinua. Además se presenta un protocolo de uso de Aquacrop para correr el modelo con condiciones variables tanto de fertilidad de suelos como de agua en el suelo. También se describe la metodología para calibrar localmente el Aquacrop para fertilidad del suelo, en caso de que el usuario cuente con los datos necesarios para hacerlo.

Capítulo 6. Presenta una descripción resumida y concreta de cuáles son los factores que más provocan la degradación de los suelos en los que se produce quinua.

Capítulo 7. Sugiere prácticas de manejo y conservación de suelos que puedan apoyar al cultivo de la quinua en la zona del Altiplano, especialmente Sud.

Los autores esperan que el presente manual se constituya en una guía que apoye en la toma de decisiones integradas para la producción de quinua en forma sostenible y así esta se constituya en un apoyo sólido y permanente a la mejora del nivel y calidad de vida de los agricultores del altiplano boliviano.

SUMMARY

Quinoa is, economically and socially, one of the most important crops in the Andean region. Being native to the South American Andes, it widely grows under the conditions of the Bolivian Altiplano. Although the genetic diversity is distributed along different altitudes and ecosystems in the Andean area, its commercial cultivation is restricted to the specific ecosystemic highland areas of Bolivia and Peru, under conditions of great fragility of soils, climate extremes and little added technology inputs. Under these conditions, the yields obtained from plots of quinoa are generally reaching marginal conditions obtained in farmer values not larger greater than 700 Kg/ha.

Among the pillars for sustainable agricultural production, soil management is of extreme importance, both as management of fertility and conservation, which when integrated to a proper water management could ensure better and sustainable production. This problem is much greater in the specific case of quinoa, which is generally grown under low input of fertilizer and water, reducing its ability to express the extremely efficient use of water and nutrients typical of the crop.

The problem of soil management for growing quinoa, is not restricted only to the limited application of fertilizer for growing but also to the reduced soil conservation practices. The application of techniques of land preparation and tillage inadequate to carry out the cultivation of quinoa, produce erosion of magnitude, thus exposing soils to the aggressive highlands climate. This, combined with low fertilizer application and the inexistent concept of (reduced) irrigation application, constitute part of the factors that may have greatest influence for permanently reduced yields and strong consistent declines in the overall productivity of the area and environmental degradation.

Natural resources management in quinoa - growing areas could significantly improve by the employment of tillage practices and auxiliary management action to improve soil fertility combined with the implementation of efficient and timely irrigation. Unfortunately little research is available on tillage systems, fertilization, irrigation and management practices and soil conservation, aimed at optimizing the use of limited resources of the highlands. Therefore, the application of these concepts has been limited by the lack of technical and professional conservation technologies on soil management guides. This lack of research and

diffusion also affects the poor development of appropriate policies to support a sustainable agricultural and rural development on the long term producing areas quinoa strategies.

This manual aims to cover at least partially the felt needs to have management technical guides for soil - water management for growing quinoa that includes the concept of sustainability from start to finish. Specifically, it is expected that users will receive information with the general concepts of the soil condition, the characterization of the problems of soil degradation and water under current and projected climate conditions in the highlands, the knowledge of the needs of nutrients (especially Nitrogen) of soils where quinoa grows, in relation to their own or externally provided fertility. The reader would also receive guidelines for developing an effective strategy for implementing water and fertilizers at key moments for the best use by quinoa and ultimately a manual for the use of the crop development model AquaCrop (released by FAO in 2005) that has been calibrated for quinoa, so that the user can test different strategies of water and fertilizer application in order to optimize this operation. Suggestions that promote soil conservation actions that reduce severe erosion problems surrounding quinoa production system are also presented.

STRUCTURE AND CONTENT

This manual is divided into themes grouped as follows:

Chapter 1. General concepts of soil science with a description of the soil properties, processes and functions. This chapter presents some concepts of the physical and chemical properties of soil with some specificity to the cultivation of quinoa in generic form.

Chapter 2. Current and projected climate characteristics of the Bolivian Altiplano and water management for growing quinoa, wherein the factors that influence the Altiplano to present its typical agro-climatic features, are presented. It is also presented a possible 2050 thermopluviometric scenario for both mean and extreme conditions that (according to the results of some models) might face the future production in the highland area. Finally, the analysis of the response of quinoa to water management with technical tips for applying deficit irrigation is included.

Chapter 3. It presents a brief description of the biophysical factors that determine the overall productivity of quinoa in the Bolivian Altiplano and the environment for deficit irrigation and nutrient management postulated in this manual.

Chapter 4. Describe the management of soil fertility to sustain a long-term production of quinoa cultivation, focusing on the needs of incorporation of fertilizers especially in the form of organic fertilization, although the values of nutrient needs can also be applied to the calculation of mineral fertilizers needs. Calculation examples for the proper application of manure is also presented.

Chapter 5. Presents the details for handling the Growth Model AquaCrop released by FAO and its calibration for soil fertility management specifically for quinoa, which integrates the influence of nutritional level of the soil and the amount of water available in the soil for the production of quinoa and which may include the possibility of working with deficit irrigation.

The details presented in this chapter can also be used in other crops, although specific examples are for quinoa. It also includes a protocol to run the model with variables under both soil fertility and water variations in the soil. It also describes the methodology to calibrate the AquaCrop locally for soil fertility.

Chapter 6. Presents a summary and detailed description of the factors that cause degradation in areas where quinoa is grown.

Chapter 7. Suggests management practices and soil conservation techniques that can support the cultivation of quinoa in the Altiplano, especially in the South.

The authors hope that this manual should become a guide in decision support for integrated quinoa production sustainability and will constitute a strong support to improve the quality of life of farmers of the Bolivian Altiplano.

Capítulo 1

IMPORTANCIA DEL SUELO

Para hablar del manejo del suelo, es importante primero definirlo, conocer su formación y las cualidades que puede presentar en función del ambiente en el que se forme. El suelo es un cuerpo natural compuesto por una fase sólida, líquida y gaseosa, el mismo que ocupa un espacio en la superficie de la tierra y se diferencia del material de origen por presentar horizontes formados por adición, pérdida y transformación de la materia orgánica y otros compuestos minerales. Asimismo este sistema es capaz de soportar el desarrollo de sistemas radiculares de especies vegetales, los cuales producen biomasa, gracias a la acción de la fotosíntesis y los nutrientes que el suelo es capaz de ceder a las plantas.

El suelo es un medio poroso, estructurado y biológicamente activo que se desarrolla en la corteza de la superficie terrestre. El suelo puede ser imaginado como la piel que recubre el planeta tierra y como ella debe ser saludable para soportar los procesos productivos que se requieren. Actualmente en Bolivia, se tienen problemas referidos a la disminución de los rendimientos de los cultivos como la quinua, papa y otros, los cuales se deben en gran parte, al deterioro de las condiciones físicas y químicas del suelo donde se producen, tales como la pérdida de la estabilidad estructural, baja capacidad de retener humedad y la disminución de la actividad microbiana que determina la mineralización de los nutrientes del suelo.

1.1. Funciones que brinda el suelo

El suelo brinda diversos servicios al ambiente y ser humano. Ambientalmente participa en la formación de biomasa, a través de la entrada de carbono y nutrientes a la biosfera por medio de las plantas. Asimismo el suelo se constituye en un filtro ante la polución que pudiera entrar a él, gracias a sus propiedades químicas (Capacidad de intercambio de iones por ejemplo) y en muchos casos evita en forma natural la contaminación de aguas subterráneas.

Las características químicas (Capacidad de Intercambiar Cationes, contenido de materia orgánica, etc.), hacen que el suelo resista a cambios bruscos de su entorno como el pH,

protegiendo a los microorganismos tanto vegetales como animales de bruscas alteraciones externas. Asimismo en el suelo ocurren procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales producen transformaciones de los productos que ingresan a él transformándolas en sustancias útiles de diferentes características; por ejemplo la mineralización de la materia orgánica (actividad desarrollada por los microorganismos del suelo en determinadas condiciones de temperatura, humedad, etc.) produce compuestos orgánicos (ácidos húmicos, fúlvicos) e inorgánicos como nitratos, fosfatos, óxidos, etc., que son más accesibles a las plantas.

La calidad del suelo está definida como la capacidad de funcionar como un sistema natural o manejado que sustentea largo plazo la productividad de las plantas y de animales, mantenga o aumente la calidad del aire y del agua y promueva la salud de los animales y el ser humano. En otras palabras, es la capacidad de un suelo de ejercer a largo plazo y sosteniblemente sus funciones como un medio para el crecimiento de las plantas, regular el flujo de nutrientes en el ambiente, almacenar y promover el reciclaje de elementos en la biosfera y servir como amortiguador ambiental para atenuar la degradación de compuestos perjudiciales al ambiente (Larson y Pierce, 1994).

1.2. Formación del suelo

El suelo se forma por la acción combinada de factores como el clima, material parental, organismos, relieve y tiempo, los cuales modifican la composición y estructura de la roca madre para su transformación en suelo.

1.2.1. Clima

El clima tiene una acción directa sobre la humedad y la temperatura del suelo y una acción indirecta a partir de la vegetación que crece sobre el suelo.

La lluvia es uno de los factores climáticos más importantes que influyen sobre la formación del suelo, pero también lo afectan a través del proceso de erosión hídrica. El contenido de agua en el suelo condiciona, por ejemplo, la traslocación de sustancias y en climas de temperaturas extremas como el altiplano, el cambio de estado físico del agua constituye un elemento de fuerte meteorización. Dado que en las zonas productoras de quinua, la agricultura es principalmente a secano, la lluvia es determinante para que la planta pueda utilizar los nutrientes del suelo. Sin embargo, debido a la poca cobertura vegetal de los suelos altiplánicos, también se puede constituir en un factor de pérdida de él a través de la erosión.

La temperatura del aire tiene una fuerte influencia en la meteorización de los minerales primarios y es integrada al sistema gracias al aporte energético de la radiación solar. Las tasas de reacción generalmente aumentan con el incremento térmico. La temperatura también influye en la actividad microbiana, la humificación, la frecuencia y magnitud de algunas reacciones químicas y el crecimiento vegetal. Los suelos de climas fríos como los del Altiplano son generalmente menos desarrollados que sus pares de climas calientes. Es entonces claro, que las temperaturas altiplánicas no favorecen una fuerte actividad formativa del suelo, por lo que éste en general es pobre y muy superficial.

Adicionalmente, el viento y la humedad local también presenta influencias sobre la formación y movimiento del suelo aunque su influencia es menor que en los anteriores casos.

1.2.2. Material parental y relieve

El material parental o roca madre, constituye un elemento pasivo en la formación del suelo y es sobre el cual actúan otros factores que lo transforman. Este factor representa el estado inicial del sistema y obviamente determina fuertemente la composición final del suelo. Para establecer relaciones entre la formación del suelo y el material de los que procede, se debe tomar en cuenta el tipo de roca a partir del cual se formó (por ej., Roca Ígnea o volcánica, Roca Metamórfica, Roca Sedimentaria).

Asimismo existe una relación entre los distintos tipos de suelos y ciertas posiciones del paisaje, que resultan diferentes de unas áreas geográficas a otras, determinando por ejemplo, áreas de acumulación y otras de deslave de partículas de suelo produciendo diferentes tipos de suelo. Este factor es utilizado en la fotointerpretación del relieve de acuerdo a la geomorfología con fines de clasificación y caracterización.

1.2.3. Organismos

La acción de los macro y microorganismos del suelo también es importante en su evolución, así las lombrices, arácnidos, etc., que trituran la vegetación y excretan ciertos compuestos como CO₂ son participantes activos de la estructuración del suelo. Como parte de los factores bióticos también se halla la vegetación la cual si se halla en estado natural puede proporcionar información acerca de las condiciones del medio (suelo y clima) pues se desarrolla en respuesta al medio que la rodea. La dependencia de la vegetación frente al pH del suelo es muy notoria, siendo que en suelos altiplánicos, (generalmente básicos) se desarrollan principalmente especies halófitas como cauchi, khotas (*Suaeda foliosa*, *Antobrium triandrum*) que son especies de suelos salinos, y la thola (*Parestrephya lepidophyla*) que se desarrolla generalmente en suelos de textura gruesa. Siendo que la fertilidad de estos suelos es reducida y que las condiciones meteorológicas pueden llegar a extremos frecuentes, la vegetación típica del altiplano es rala y de porte bajo, con características típicas de zonas áridas.

Finalmente la dimensión temporal de los suelos se manifiesta de distinta manera según cuál sea su característica considerada. Hay variaciones a lo largo del día (temperatura, contenido de CO₂, etc.), y a lo largo del año (salinidad, régimen de humedad, etc.) las que también afectan a la cantidad de organismos que alberga.

1.3. Organización del suelo

En la interacción de los factores mencionados, se presentan los procesos físicos, químicos y biológicos en forma conjunta, tales como dilataciones y contracciones de los minerales que componen la roca, como producto de los cambios bruscos de temperatura integrada con la actividad de los organismos que alberga, procesos típicos de zonas áridas y semiáridas como las altiplánicas.

Dependiendo de la intensidad de los procesos antes mencionados (físicos, químicos, biológicos) y predominio de algún factor (roca, clima, relieve, organismos, tiempo) el suelo se organiza gradualmente en diferentes capas, llamadas horizontes, las cuales tienen una morfología definida. La descripción morfológica es empleada para la identificación de suelos (génesis, levantamiento y clasificación), para la evaluación de la capacidad del uso de la tierra, también para determinar la habilidad del suelo en soportar el desarrollo de las plantas y obras civiles, para valorar el movimiento del agua y de los nutrientes en el perfil y para evaluar la respuesta del suelo al manejo y su resistencia a la degradación por procesos erosivos. Las características morfológicas asociadas a las propiedades químicas y físicas permiten también predecir la vocación del uso del suelo. Los horizontes así formados presentan parámetros definidos como la textura, estructura, consistencia, porosidad, color, capacidad de retener humedad, capacidad de intercambiar iones, pH, contenido de arcilla, etc. De estas características, muchas veces, la textura y la estructura determinan el comportamiento de otras condiciones físicas y químicas tales como la permeabilidad, aireación, temperatura, pH, Capacidad de Intercambio Catiónico, etc.

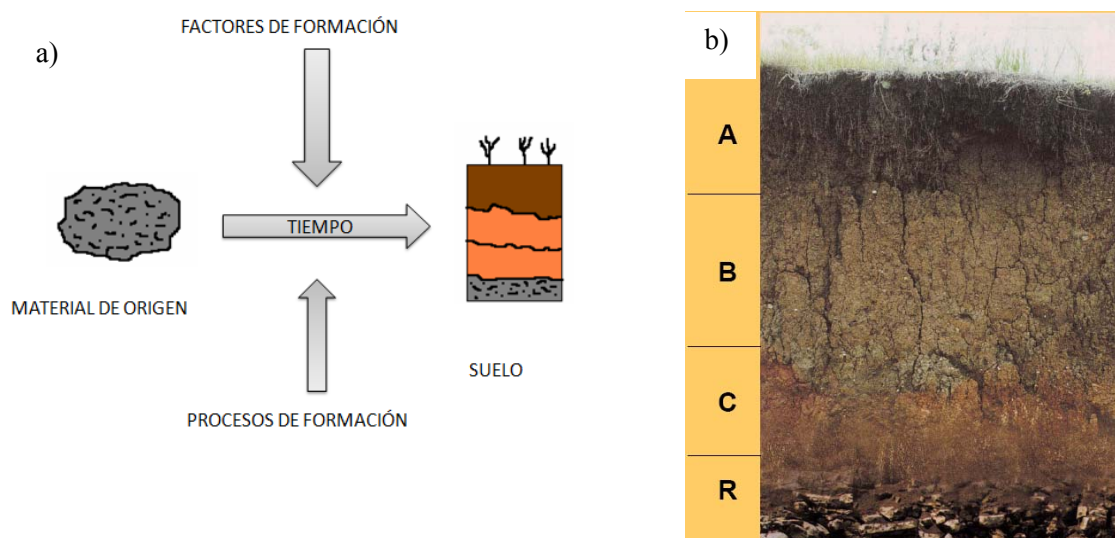


Figura No. 0.1 a) Formación del perfil del suelo a partir de los Factores y Procesos formadores; b) perfil de suelo con tres horizontes

1.4. Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades de los suelos se refieren básicamente en la manifestación de su granulometría y el ordenamiento de las partículas primarias como la arena, limo y arcillas que influyen a otras de sus cualidades tales como el calor, permeabilidad, etc. y al contenido de agua y nutrientes. Estas propiedades están descritas en forma detallada en textos específicos de edafología, por lo que solo se hace referencia a las propiedades físicas básicas que determinan la producción de quinua como la textura, estructura, humedad y fertilidad de los suelos.

preferencia con un elevado contenido de nutrientes y materia orgánica que provean los elementos necesarios para la producción de la proteína de alta calidad que es característica de este grano.

1.4.2. Estructura

Otra propiedad básica del suelo es la estructura, la misma se refiere al agrupamiento de las partículas minerales (arena, limo y arcilla) y materia orgánica, en agregados o unidades estructurales. Su determinación en campo se realiza observado el tipo (forma), grado (manifestación de fuerzas de cohesión y adhesividad) y clase (tamaño de los agregados) en el perfil del suelo.

La estructura y la porosidad del suelo influyen sobre el abastecimiento de agua y de aire a las raíces, y esto lo hace sobre la disponibilidad de nutrientes que requieren estar disueltos en la fase líquida del suelo. También influyen sobre la penetración y desarrollo de las raíces y el desarrollo de la microfauna del suelo. Por tanto una estructura de buena calidad significa una buena calidad de espacio de poros, con buena continuidad y estabilidad de los poros y una buena distribución de su medida, incluyendo tanto macroporos como microporos y permitirá una adecuada actividad productiva.

Esferoidal Característica de horizontes A o superficiales. Sujeto a rápidos cambios		
Laminar Común en Horizontes profundos (E).		
Bloques angulares.		
Bloques subangulares.		

Columnar Horizonte B subsuperficial. Puede ocurrir en suelos de clima arido o semiarido		
Prismático. Horizonte B. suelos sódicos.		

Figura No. 0.3. Diferentes tipos de estructura de suelos minerales y su ocurrencia en el perfil. Los diseños ilustran sus características esenciales y las fotos indican como aparecen en el campo.

La estructura informa sobre la resistencia a la compactación, susceptibilidad de aireación, porosidad del suelo, infiltración del agua, permeabilidad del suelo, crecimiento de las raíces, etc. Por ejemplo un suelo con estructura granular, es más poroso y permite mayor infiltración de agua y permeabilidad al agua y aire, comparado con un suelo con estructura laminar, prismática o columnar.

En sistemas agrícolas, los suelos son sometidos a sucesivas presiones por el movimiento de los implementos agrícolas para la preparación del suelo, lo que tiende a compactarlos. La resistencia del suelo en mantener la forma actual o adquirida define la estabilidad estructural. El aumento de la cobertura vegetal del suelo, actividad microbiológica, materia orgánica y la menor exposición de la materia orgánica a la descomposición por los microorganismos aumentan la estabilidad estructural, la cual tiene relación directa con la habilidad de un suelo de resistir la erosión. La interacción de la actividad de los microorganismos con la presencia de materia orgánica en el suelo, más las condiciones ambientales (temperatura, aireación, humedad), determinan la fuerte dinámica de la estructura en el tiempo.

La recuperación de la estabilidad estructural es por lo menos dos veces más rápida en suelos arenosos que en suelos arcillosos. Asimismo la estabilidad estructural está inversamente asociada a la frecuencia e intensidad de remoción del suelo. Por ello, la siembramanual de cultivos como la quinua, practicada tradicionalmente en laderas de colinas del altiplano Sud, conserva la estructura del suelo. En comparación, el sistema de preparación de suelos en planicies más típica del Altiplano Central y Norte y últimamente en las planicies del Sud, que es realizado con implementos agrícolas que ocasionan fuertes presiones sobre el suelo, rompen su estructura original y ocasionan compactación, lo que se traduce en un aumento de la densidad y de la resistencia del suelo. Ello produce la reducción de la porosidad del suelo (principalmente macroporosidad o porosidad de aireación), afectando procesos como la conductividad hidráulica, permeabilidad, infiltración y drenaje del agua y otras características que requieren del espacio poroso. Estas alteraciones físicas, provocadas por la compactación, afectan el flujo o la concentración del agua, oxígeno, dióxido de carbono, nutrientes y temperatura, que pueden limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como causar

problemas ambientales. La actividad biológica y la materia orgánica mitigan los efectos negativos de la compactación en el primer horizonte del suelo pero no a mayores profundidades.

1.4.3. Profundidad

La profundidad del suelo puede variar de unos pocos centímetros a varios metros. No siempre en relación, las raíces de las plantas usan el suelo a profundidades que van de unos pocos centímetros a más de un metro o incluso en algunos casos esas raíces pueden llegar a varios metros en función a las características intrínsecas de cada cultivo.

A pesar de la capacidad de las raíces de muchas plantas de penetrar horizontes duros y profundos, en general para cultivos promedio, la reducida profundidad del suelo es un factor limitante para el desarrollo de sus raíces y la disponibilidad de humedad y nutrientes, afectando además la infiltración y las opciones de labranza. Cuanto más superficial es un suelo, más limitados son los tipos de uso que puede tener y más limitado será también el desarrollo de los cultivos. Los suelos superficiales tienen menor volumen disponible para la retención de humedad y nutrientes y también pueden impedir o dificultar la labranza; adicionalmente pueden ser susceptibles a la erosión porque la infiltración del agua está restringida por el sustrato rocoso. El altiplano boliviano, no cuenta con suelos profundos, debido a las reducidas temperaturas ambientales que permiten lentos procesos de descomposición y meteorización. Por ello, el manejo del suelo debe realizarse en forma cuidadosa para evitar la pérdida de la reducida capa arable de sus suelos.

1.5. Contenido de agua en el suelo

El agua es un recurso vital para la biosfera y para la humanidad y aunque parezca abundante, solo una pequeña fracción (2.5%) es consumible para los seres humanos. Además hay una fuerte competencia por el uso del agua por parte de la agricultura, industria y la sociedad. La cantidad de agua que ingresa al suelo depende de la precipitación y cuando se puede del riego pero también del tipo de suelo. La salida está en función de la escorrentía, percolación, evaporación y transpiración. El movimiento del agua en el suelo ocurre debido a la diferencia de potenciales, ocurriendo de mayor potencial (suelo húmedo) a menor potencial (suelo seco). Las raíces de las plantas tienen un potencial más bajo que el suelo seco y por tanto el agua se mueve del suelo hacia el interior del sistema radicular. El movimiento del agua está asociado también a la presencia de arcillas, materia orgánica y de iones.

De los factores de producción, el agua junto con los nutrientes son los más incidentes en el proceso de crecimiento de las plantas (asumiendo que las plagas y enfermedades de los cultivos se hallan controlados). Durante el periodo vegetativo, específicamente en la quinua, tanto la falta como el exceso de agua en periodos sensibles, a lo largo del ciclo de cultivo, podrían disminuir drásticamente el rendimiento.

Dependiendo del tipo de suelo, el agua disponible para las plantas se encuentra entre la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente (Figura 1.4). La disponibilidad del agua para las plantas no está ligada solo a la capacidad de almacenamiento del suelo, sino

también a la capacidad de las plantas de extraer el agua bajo los diferentes contenidos de humedad en el suelo. La quinua ha demostrado tener una amplia capacidad de extraer agua del suelo incluso hasta contenidos cercanos al Punto de Marchitez Permanente.

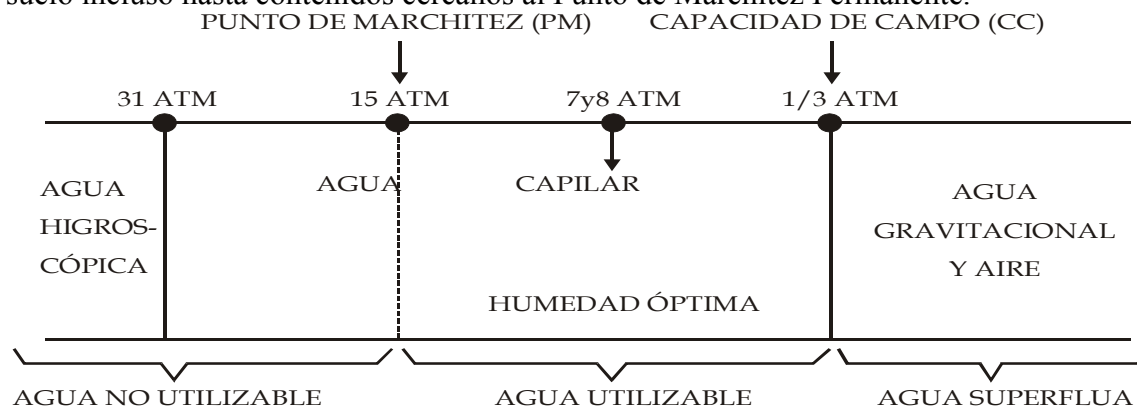


Figura No. 04. Disponibilidad de agua entre la Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente.

Cuando el agua circula en el suelo, se vuelve una solución que contiene a los elementos en ella presente. Esta solución es altamente dinámica, pues varía en cantidad y en concentración de acuerdo con la precipitación, evaporación y utilización por las plantas.

Tabla 0.2. Valores de la humedad a Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente relacionados con la textura del suelo, según (Raes 2001)

Clase textural	Capacidad de Campo [m^3/m^3]		Punto de Marchitez [m^3/m^3]	
	Media	Rango	Media	Rango
Suelos Arenosos: Suelos de Textura Gruesa				
Arenoso	0.13	0.09 – 0.16	0.06	0.04 – 0.09
Areno Francoso	0.16	0.13 – 0.18	0.08	0.04 – 0.12
Suelos Francos: suelos de textura moderadamente gruesos				
Franco Arenoso	0.22	0.17 – 0.28	0.1	0.05 – 0.15
Suelos Francos: suelos de textura media				
Franco	0.31	0.25 – 0.38	0.15	0.10 – 0.20
Franco limoso	0.33	0.23 – 0.42	0.13	0.06 – 0.20
Limoso	0.33	0.28 – 0.37	0.09	0.06 – 0.12
Suelos Francos: suelos de textura moderadamente finos				
Franco arcillo arenoso	0.32	0.25 – 0.37	0.2	0.16 – 0.24
Franco arcilloso	0.39	0.35 – 0.43	0.23	0.20 – 0.26
Franco arcillo limoso.	0.44	0.40 – 0.48	0.23	0.20 – 0.26
Suelos arcillosos: suelos de textura fina				
Arcillo arenoso	0.39	0.34 – 0.45	0.27	0.24 – 0.34
Arcillo limoso	0.5	0.44 – 0.55	0.32	0.27 – 0.37
Arcilloso	0.54	0.40 – 0.58	0.39	0.27 – 0.42

Para determinar exactamente el tiempo de aprovechamiento óptimo del agua, es indispensable conocer algunas características importantes del suelo, tales como: textura, porosidad, pendiente, velocidad de infiltración, etc. y también la del cultivo a manejar, es decir, la cantidad de agua que demanda el cultivo para crecer adecuadamente y desarrollar su rendimiento potencial (Uso consuntivo).

1.6. Propiedades coloidales

El suelo, como un sistema trifásico (sólido, líquido y gaseoso), con diferentes constituyentes en la fase sólida, presenta una serie de propiedades químicas propias. La partícula donde se desenvuelven los fenómenos físicos y químicos del suelo, corresponden a la fracción de arcilla, ya que se trata de un coloide (partícula con un diámetro menor a 2 micras y con carga eléctrica). Esta fracción coloidal es bastante heterogénea y está constituida por partículas de diferentes especies minerales (aluminosilicatos y óxidos) y orgánicas (humus). En los coloides minerales se tiene dos tipos de carga: las permanentes (formadas por una sustitución isomórfica en la formación del mineral) y las variables que se localizan en los vértices de minerales quebrados y las cuales pueden estar cargadas positivamente, negativamente o ser neutras, dependiendo del pH del medio. Por tanto, en función de la presencia de cargas eléctricas, el suelo es un verdadero almacén de iones y moléculas.

La retención de iones (cationes y aniones) en el suelo se debe a la presencia de grupos funcionales y sus cargas eléctricas. Esta atracción es denominada Capacidad de Intercambio de Cationes (CIC) o Capacidad de Intercambio de Aniones (CIA) y sus unidades se expresan en $\text{cmol}(+) \text{ kg de suelo}^{-1}$ o como $\text{meq}/100 \text{ gr de suelo}$ (Figura 1.5).

La absorción e intercambio de iones es el proceso reversible por el cual los iones de la solución del suelo son absorbidos por las partículas coloidales, desplazando otros iones de la fase coloidal (sólida). Este fenómeno de absorción, es sin duda, el evento físico químico de mayor importancia en el suelo. Gracias a la absorción, los nutrientes pueden permanecer en el suelo en forma disponible para las plantas, pero al mismo tiempo, esa retención es suficientemente fuerte para impedir que sean arrastrados por las aguas que se infiltran en el suelo. Por tanto las cargas eléctricas presentes en los coloides del suelo son responsables por la absorción de iones. Los cationes de la fase líquida (solución del suelo) están en equilibrio con los cationes absorbidos por los coloides. La extracción de los cationes de la fase líquida por parte de las raíces de las plantas o lavado del suelo, provocara una reposición a partir de la liberación de cationes de la fase sólida, intentando alcanzar nuevamente a un equilibrio.

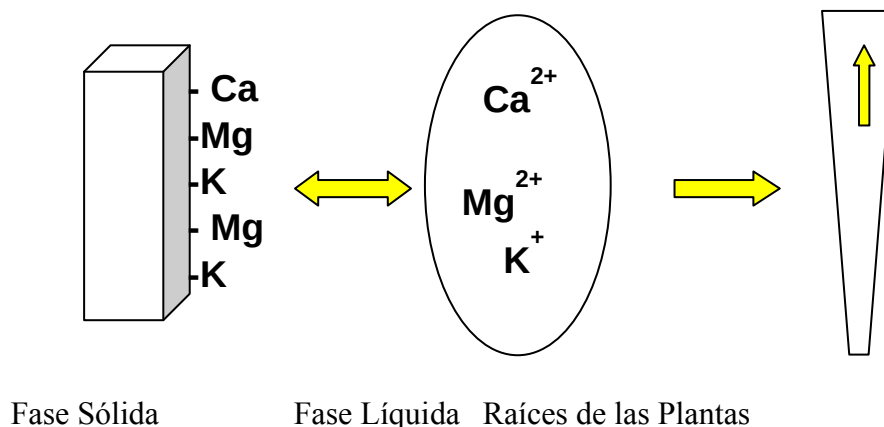


Figura No. 0.5. Esquema del sistema coloidal del suelo, fase líquida y absorción por la raíz

La disponibilidad de nutrientes en forma de cationes es fundamental para el desarrollo de los cultivos. Su contenido en el suelo depende del material y el proceso de formación—el contenido original del suelo—, del abastecimiento y naturaleza de los fertilizantes, de la intensidad de la lixiviación y la erosión, de la absorción por parte de los cultivos y de la CIC del suelo. Aunque la deficiencia de nutrientes en muchos casos puede ser corregida, los suelos con mejor disponibilidad natural de nutrientes requerirán menores inversiones y, por lo tanto, muestran una aptitud natural para dar mejores rendimientos. El conocimiento de la necesidad de aplicar o no grandes cantidades de nutrientes en forma de fertilizantes, comparado con la disponibilidad de recursos, es un factor determinante para la recomendación del uso del suelo.

Además de evaluar los contenidos y proporciones de cationes intercambiables (Ca^{++} , Mg^{++} , K^{+} y Na^{+}) también es necesario conocer el contenido de nitrógeno del suelo —en general aportado a través de la materia orgánica—, el contenido de fósforo disponible, el contenido de micronutrientes esenciales y el valor de la CIC del suelo. Esto último se debe a que el suelo no puede retener más nutrientes que los que determina su CIC, por lo que el exceso será lavado y perdido y representará una pérdida en la inversión efectuada en fertilizantes.

1.7. Acidez del suelo

Los suelos, según su ubicación, desarrollo y forma de uso, presentan una reacción, que puede ser: ácida, neutra o alcalina. Los suelos ácidos son comunes, en las regiones de precipitación pluviométrica alta (Zonas bajas con precipitaciones por encima de los 1200 mm anuales), donde los elementos como el calcio, magnesio, potasio y sodio, dependiendo de su solubilidad, son lavados a horizontes más profundos. Contrariamente, en regiones áridas y semi áridas (Zonas altoandinas de Puna) es donde predominan el ascenso de los elementos alcalinos junto con el agua capilar resultando en la alcalinización y salinización de los suelos. Estos suelos son típicos de muchas de las zonas de producción de quinua, a excepción de los suelos arenosos del sur, donde la porosidad permite un rápido lavado de las sales acumuladas.

La reacción del suelo está relacionada con su fertilidad, pues factores tales como la estructura, solubilidad y movimiento de los minerales, disponibilidad de nutrientes, actividad de los

microorganismos, absorción de iones por las plantas, etc., están relacionadas con la reacción o pH dominante en el mismo.

Su principal efecto es indirecto, ya que la acción de los iones H^+ es la que rige para los cambios en la disponibilidad de nutrientes. Los suelos con carbonato de calcio característicos de zonas semiáridas y áridas, tienen pH del orden de 7.5 a 8.5. Estos valores se presentan en suelos donde el material es calcáreo o dolomítico o donde ha habido una acumulación de sodio intercambiable, naturalmente o por riego. Tales suelos tienen altas concentraciones de iones OH^- asociados con altos contenidos de bicarbonatos y carbonatos; los suelos sódicos tienen una baja estructura y estabilidad a causa del alto contenido de sodio intercambiable y muchos de ellos tienen la capa superior o el subsuelo densos.

Las condiciones alcalinas del suelo causan varios problemas nutricionales a las plantas como la clorosis, por la incapacidad de las plantas de absorber suficiente hierro o manganeso, esto debido a su poca disponibilidad. También pueden ocurrir deficiencias de cobre, zinc y fósforo a causa de su baja solubilidad. Si el suelo tiene un alto contenido de CO_3Ca puede ocurrir una deficiencia de potasio porque este puede ser rápidamente lixiviado. También puede haber deficiencia de nitrógeno debido al generalmente bajo contenido de materia orgánica (Rowell, 1994).

Las sales afectan los cultivos a causa de los iones tóxicos, los cuales por un desbalance de los nutrientes inducen deficiencias y por un aumento de la presión osmótica de la solución del suelo causan una falta de humedad. La estructura y la permeabilidad del suelo pueden ser dañadas por el alto contenido de sodio intercambiable que queda en el suelo cuando las sales son lavadas, salvo que se tomen medidas preventivas o remedios, tales como la aplicación de yeso.

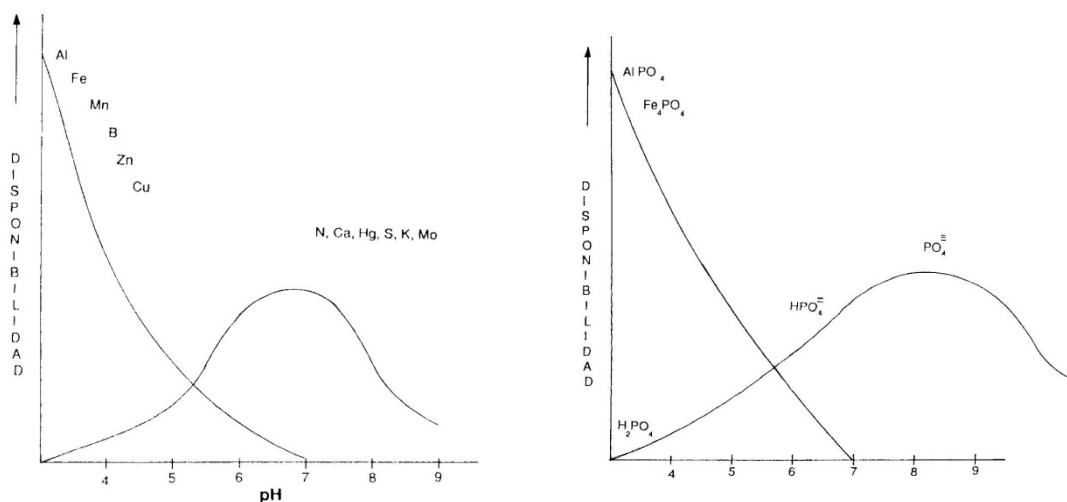
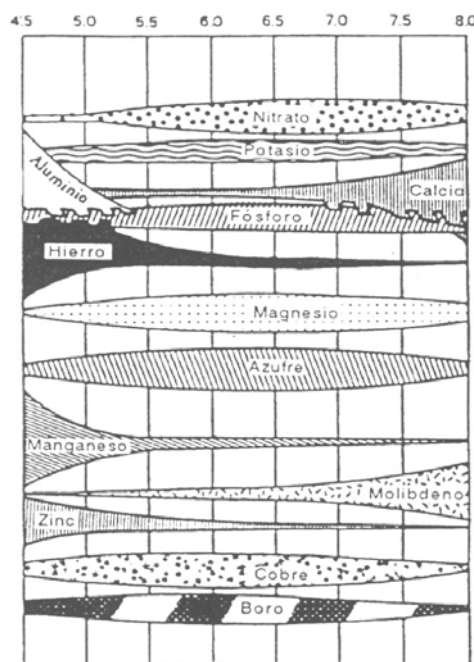


Figura No. 0.6. Disponibilidad de nutrientes y comportamiento del fósforo en función al pH

La acidez y la basicidad del suelo afectan diversas propiedades del suelo y al crecimiento de las plantas. Las propiedades físicas afectadas son: Dispersión-floculación de los coloides,

estructura, porosidad y aireación, conductividad hidráulica, régimen de humedad y temperatura.



Suelos minerales

Figura No. 0.7. Disponibilidad de elementos de acuerdo a la variación del pH del suelo. En la parte superior se presenta los rangos de pH.

Las propiedades químicas afectadas son: meteorización química, movilidad de elementos tóxicos (Al, Mn, Mo, P y metales pesados), disponibilidad de nutrientes como el Ca, Mg, K, Na (Figura 1.7), descomposición de la materia orgánica y la adsorción de aniones (Fosfatos, sulfatos, cloruros, nitratos).

Las propiedades biológicas principalmente afectadas son la relación de bacterias y hongos, población bacteriana y la humificación. Fijación de nitrógeno, movilidad de absorción de nutrientes.

1.8. Interacciones físico químico biológicas que influyen en la descomposición de la materia orgánica aportada

Para entender la dinámica de los nutrientes en el suelo, es fundamental que se entienda su naturaleza física y química y cómo ésta influye sobre los microorganismos del suelo.

La materia orgánica del suelo está compuesta por todos los materiales orgánicos muertos, de origen animal o vegetal, junto con los productos orgánicos producidos en su transformación. Una pequeña fracción de la materia orgánica incluye materiales ligeramente transformados y productos que han sido completamente transformados, de color oscuro y de alto peso molecular, llamados compuestos húmicos.

Después que se han añadido residuos orgánicos frescos al suelo hay un rápido aumento en la población de organismos debido a la abundancia de material fácilmente descompuesto, incluyendo azúcares y proteínas. Estos elementos son transformados en energía, CO_2 y H_2O y en compuestos sintetizados por los organismos. A medida que la cantidad de materia orgánica de fácil descomposición disminuye, el número de organismos también disminuye. Los sucesores de estos organismos atacan los restos, formados por compuestos más resistentes de celulosa y lignina y también compuestos sintéticos, reduciendo su proporción gradualmente a medida que aumenta el humus. La velocidad de transformación de los residuos orgánicos frescos depende de la naturaleza de la materia orgánica inicial y de las condiciones ambientales del suelo.

Desde un punto de vista ambiental, la temperatura, la presión osmótica, la tensión superficial, la viscosidad, la radiación, las sustancias promotoras del crecimiento, el potencial oxido reductor del suelo, la cantidad y calidad de arcilla presente, etc., afectarán para que cada especie de microorganismos presente una condición óptima para su desarrollo y ello determinará la disponibilidad de muchos nutrientes en el suelo.

Por ejemplo, después de la aplicación de materiales leñosos u otros residuos orgánicos que tienen un alto contenido de carbono y un bajo contenido de nitrógeno –o sea una relación C/N alta- los organismos consumen el nitrógeno disponible en el suelo, inmovilizándolo. Como resultado, durante algún tiempo habrá poco nitrógeno disponible para las plantas. Con la descomposición gradual de la materia orgánica, la población de organismos se reduce y el nitrógeno vuelve a estar disponible para las plantas. Por ello, para evitar la competencia por el nitrógeno entre los organismos y las plantas, es conveniente esperar que los residuos orgánicos alcancen un estado avanzado de descomposición antes de la siembra de un nuevo cultivo.

El contenido de nutrientes de la materia orgánica es importante para las plantas. Por medio de la actividad de la flora y la fauna presentes en el suelo esos nutrientes son transformados en sustancias inorgánicas y pasan a estar disponibles para las plantas. A medida que los rendimientos aumentan, el uso correcto de fertilizantes minerales y las masas de las raíces aumentan el contenido de materia orgánica del suelo en razón de la mayor cantidad de residuos que se incorporan.

La materia orgánica favorece la formación de una estructura estable de agregados en el suelo por medio de la estrecha asociación de las arcillas con la materia orgánica. Esta asociación incrementa la capacidad de retención de agua ya que puede absorber de tres a cinco veces más que su propio peso, lo cual es especialmente importante en el caso de los suelos arenosos. La materia orgánica incrementa la retención de nutrientes disponibles para las plantas debido a su mayor capacidad de intercambio de cationes.

La labranza afecta las características físicas del suelo y puede incrementar la porosidad y la aireación, pero también puede afectar negativamente la fauna del suelo debido al disturbio que causan los implementos agrícolas en el mismo. Los sistemas de labranza mínima o de labranza manual contribuyen a salvaguardar la fauna y la estructura de poros creadas por ellos. A causa de que esos sistemas tienden a mantener más estables los regímenes de temperatura y humedad del suelo, también protegen la población microbiana durante los

períodos de altas temperaturas o sequías prolongadas. Dejando los residuos de los cultivos en la superficie del suelo y usando una cobertura vegetativa perenne con un sistema radical denso, se favorecerá un mejor desarrollo de la fauna del suelo y de la biomasa microbiana.

La fertilización, tanto orgánica como mineral, tiende a estimular los organismos del suelo y el uso de pesticidas puede disminuir sensiblemente su número. Finalmente, el monocultivo también afecta a las poblaciones microbianas ya sea porque proporciona continuamente el mismo tipo de material orgánico o por la acumulación de sustancias tóxicas exudadas por las raíces, reduciendo así la diversidad de las especies y rompiendo su equilibrio.

Capítulo 2

CLIMATOLOGÍA ACTUAL Y PREVISTA DEL ALTIPLANO BOLIVIANO Y MANEJO DE AGUA PARA EL CULTIVO DE LA QUINUA

2.1. Introducción

Los estudios fisiológicos y la experiencia productiva demuestran que en general, la quinua es un cultivo interesante para la producción en condiciones de sequía, heladas y condiciones marginales de manejo y suelos (García et al., 2003) razón por la que en la mayor parte de los manuales productivos y en su manejo agronómico general tanto a nivel técnico como de agricultores, el manejo de agua y riego no es considerado como prioritario o no se lo realiza del todo. A pesar de ser una especie de planta C3, la quinua es muy eficiente en el uso del agua cuando esta se recibe en periodos estratégicos, pero puede no serlo si la falta de agua ocurre en periodos sensibles. Aunque varios mecanismos de resistencia a la sequía están presentes en la quinua (Jensen et al., 2000; Jacobsen et al., 2003), en general se reportan bajos rendimientos en gran parte por falta de agua y nutrientes (Bilbao et al., 2006). Bosque et al., (2000) indican que la resistencia a la sequía a menudo se traduce en bajos rendimientos, debido a que el cultivo debe sacrificar productividad por rusticidad y resistencia a factores adversos. Adicionalmente, cuando la falta de agua se produce en estados fenológicos sensibles como emergencia y floración y grano lechoso, el rendimiento es drásticamente reducido (García et al., 2003; Geerts et al., 2008a).

Por ello, la última década se han llevado adelante investigaciones sobre las implicaciones de la adición de agua al cultivo en la producción de quinua tanto a nivel máximo experimental como en forma de alternativas de aplicación de agua que sean consistentes con el medio ambiente en el que se desarrolla especialmente del Altiplano Boliviano. Es así que en el presente capítulo se presenta los resultados de trabajos orientados a evaluar los requerimientos

de agua del cultivo, la influencia y relación con la demanda evaporativa y la climatología del ambiente en el que se desarrolla y las implicaciones de la aplicación de riego completo y en periodos seleccionados. Los resultados han permitido desarrollar guías e indicaciones sobre conceptos asumidos para el cultivo.

2.2. Climatología del Altiplano Boliviano

Gran parte del territorio boliviano se origina fisiográficamente como consecuencia de la formación de la Cordillera de Los Andes. Esta se constituye en una formidable barrera para la circulación atmosférica actuando como obstáculo para la circulación entre las áreas amazónicas de baja altitud al este y las características zonas de baja precipitación del Pacífico al Oeste. En la parte central de esta cordillera, se extiende la planicie que da lugar al Altiplano que abarca alrededor de 200.000 Km² y cuya altitud se encuentra en un 75 % por encima de los 3.600 m. Esto último juega un importante papel en su temperatura pues sus valores son claramente inferiores a lo que se esperaría por su latitud y sus extremos térmicos son mayores pues la menor columna atmosférica no amortigua la recepción de radiación solar ni ayuda en la retención energética en la superficie. Por ello, la zona enfrenta un fuerte riesgo de heladas en invierno y no está exenta de él en verano y su recepción de radiación de longitud de onda muy corta es elevada.

Con respecto a la lluvia, la circulación atmosférica zonal determina en gran parte su distribución temporal y espacial. El continente Sudamericano y dentro de él, el altiplano, se encuentran bajo la influencia de tres sistemas semi-permanentes de presión alta (baja precipitación) y uno de presión baja (precipitaciones elevadas). Los sistemas de presión alta son los anticiclones del Atlántico, del Pacífico Sur y del Caribe, los cuales casi rodean el continente. El sistema de baja presión corresponde a la Zona de Convergencia Inter -Tropical (ZCIT), la cual se encuentra en movimiento entre los 15° Norte y 15° Sur siguiendo el movimiento aparente del sol o el verano de cada hemisferio. Durante el invierno del hemisferio sud (mayo a septiembre), la ZCIT, se retira hacia el hemisferio norte y los anticiclones penetran más hacia el continente, debilitando la influencia de los vientos alisios de componente este (Figura 2.1), dando lugar a la época seca en la mayor parte de Bolivia y Perú.

En el caso específico del altiplano, especialmente en invierno, es principalmente el Anticiclón del Pacífico con sus vientos secos provenientes del Oeste, el que previene a la zona de recibir precipitación (Garreaud, 2003). Durante el verano (octubre a marzo), el fuerte calentamiento terrestre genera una diferencia térmica que favorece el movimiento hacia el hemisferio Sud de la ZCIT (precipitación abundante) hasta los 15° de latitud Sud y este desplazamiento arrastra a lo largo aire húmedo y caliente desde la zona amazónica y/o atlántica (Marengo, *et al.* 2004) debilitando la presencia del seco Anticiclón del Pacífico. Los movimientos convectivos combinados con la humedad continental recibida dan lugar a la formación de una gran acumulación nubosa y el inicio de la época lluviosa (Garreaud, 2003), la que sin embargo, cae con frecuencia en episodios cortos e intensos.

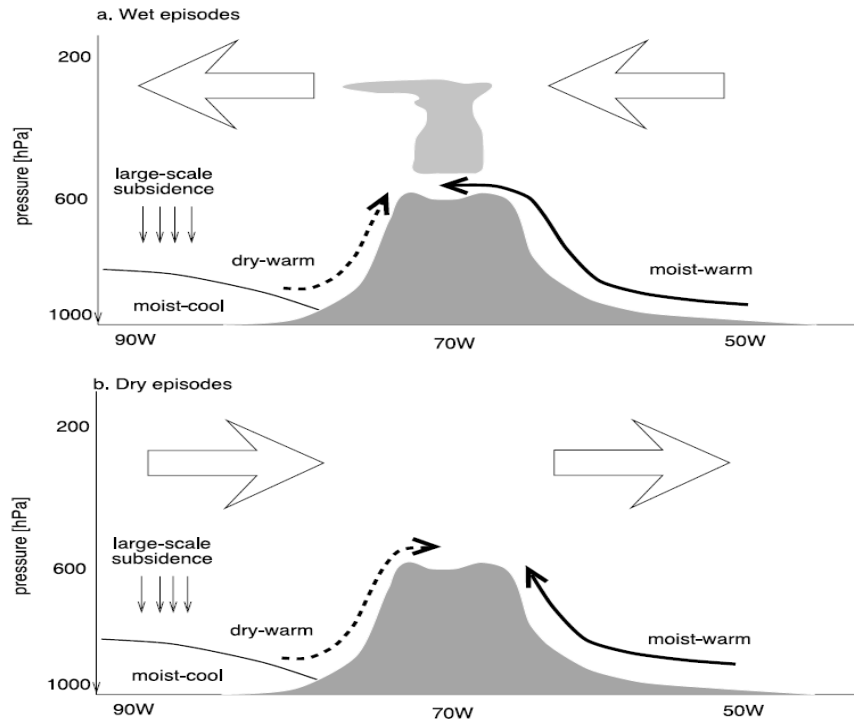


Figura No. 0.1. Descripción esquemática de los patrones de circulación del aire en un corte latitudinal típico del Altiplano boliviano. a) Episodios de lluvia, b) Episodios secos. Las flechas grandes sin color indican la dirección predominante de la circulación troposférica. Las flechas sólidas describen la circulación del aire húmedo de componente Este. Las flechas punteadas describen la circulación del aire seco de componente Oeste. Las flechas verticales muestran la elevada presión sobre el Pacífico. (Extraído de Garreaud, *et al.*, 2003).

2.2.1. Relación entre la Evapotranspiración y la precipitación

Una variable agroclimática de gran interés es la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) que representa la demanda evaporativa y las características climáticas de la atmósfera. Geerts *et al.*, (2006) describieron la ocurrencia de la ET_o para el altiplano. Para ello calcularon la ET_o con la ecuación de la FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) que fue validada para el altiplano por García *et al.* (2003) con procedimientos para datos faltantes. Con resultados obtenidos de 41 estaciones climáticas los autores en un entorno SIG zonificaron los valores de ET_o y la Precipitación promedio para el Altiplano (Figura 2.2).

Durante la época de cultivo, la atmósfera en el altiplano presenta una fuerte demanda de agua, llegando a valores cercanos a los 6 mm/día en el altiplano sud, con un total acumulado máximo de 1000 mm desde Octubre a Abril lo que ocurre debido a la gran recepción de radiación solar por la latitud tropical. En contraste la precipitación presenta valores menores que la ET_o con rangos entre 150 y 500 mm/año demostrando entonces una fuerte dificultad para el desarrollo de los cultivos (Geerts *et al.*, 2006).

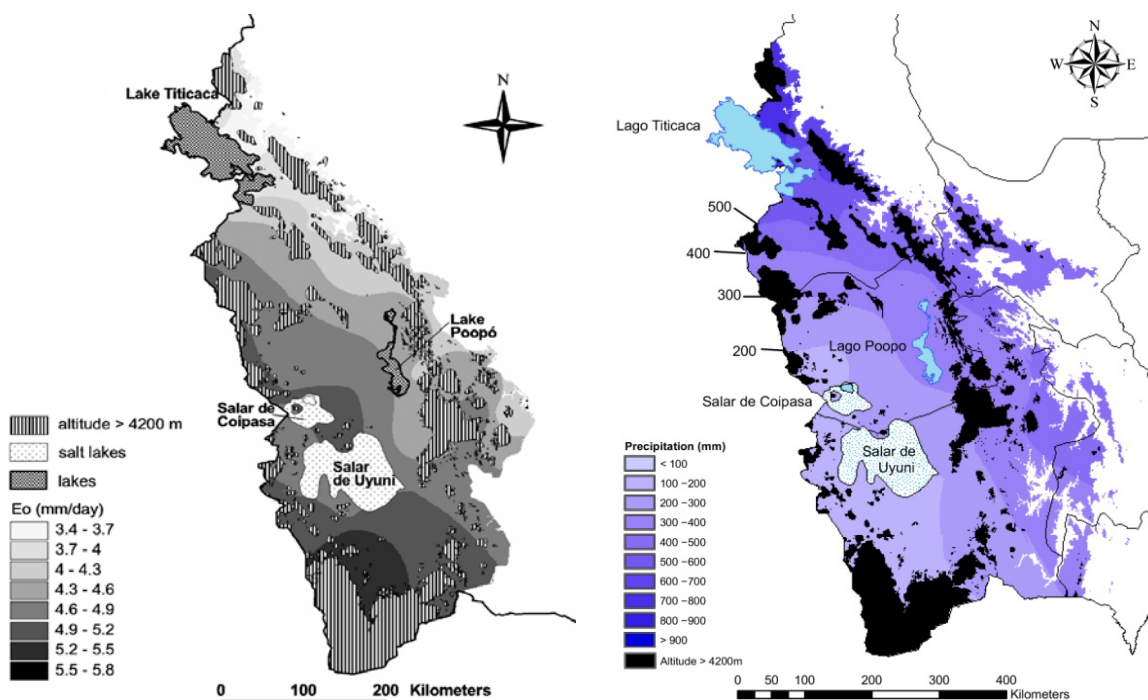


Figura No. 0.2. Izquierda: Evapotranspiración de Referencia media (E_o) en mm/día en Febrero que es un mes de elevada actividad agrícola en el Altiplano Boliviano. Derecha: Precipitación media anual (mm) para la zona (Geerts et al., 20006)

Los valores de precipitación presentados en la Figura 2.2., muestran el valor promedio de precipitación, el cual sin embargo, incluye mucha variabilidad interanual. Por ello Canedo, (2013) llevó adelante una zonificación probabilística de la cantidad de precipitación probable en diferentes tipos de años para la zona del Altiplano aplicando el método de L-Momentos (Figura 2.3). Sus resultados muestran que incluso bajo años muy húmedos, la zona del Altiplano central y Sud no reciben precipitación suficiente para cubrir los requerimientos de agua del cultivo, aunque la cantidad de precipitación que se recibe podría permitir un adecuado desarrollo del cultivo si este recibe la necesaria fertilización. Considerando ello, la probabilidad de que el cultivo de la quinua enfrente fracasos por falta de agua es muy elevada y podría explicar en gran parte, la razón para los bajos rendimientos en la mayor parte de los años.

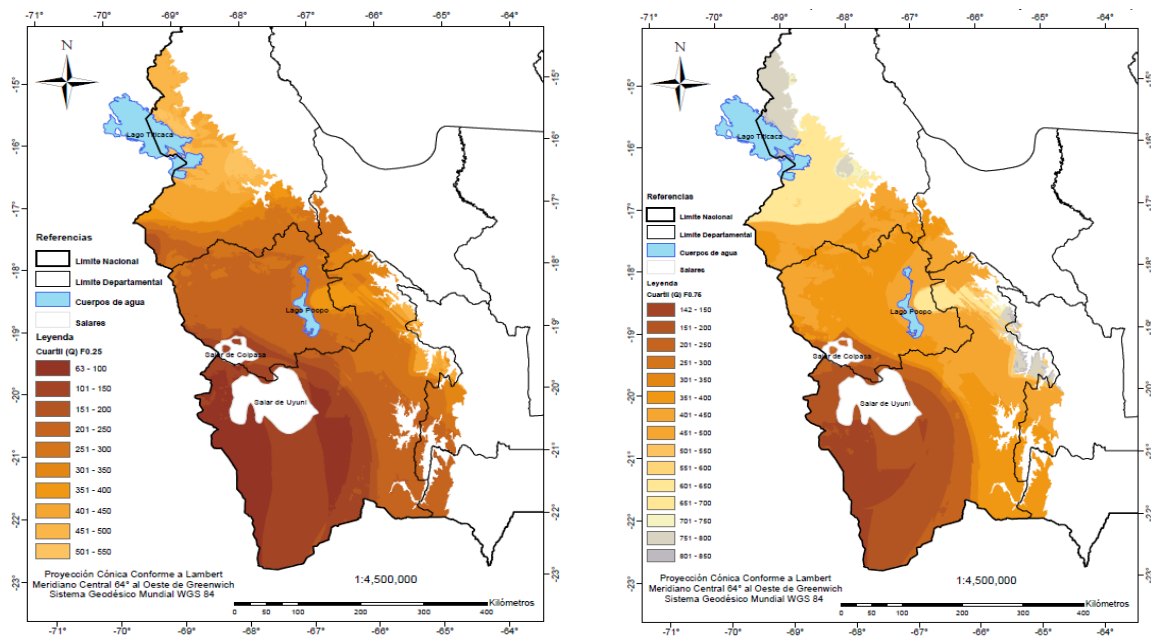


Figura No. 0.3. Izquierda: Precipitación esperada en años secos y Derecha: en años húmedos en el altiplano Boliviano en (mm/año) determinada por el método de L-momentos (Canedo, 2013)

En forma adicional, incluso si el año en general se presenta húmedo o con suficiente precipitación, la distribución de la precipitación también es importante para el uso del cultivo. Por ello también se estudió este parámetro en estaciones distribuidas de Norte a Sud en el Altiplano. En cuatro estaciones meteorológicas ubicadas en zonas productoras de quinua, se determinó la probabilidad de recibir lluvia a lo largo del año hidrológico en un día, considerando un día lluvioso a aquel en que caiga por lo menos 1 mm de precipitación (Figura 2.4).

La distribución de la precipitación a lo largo del año hidrológico en los observatorios presentados, muestra especialmente en el Sud, tendencias a falsos inicios de la época de lluvias con probabilidades bajas de recibir suficiente precipitación durante el periodo de establecimiento del cultivo (Octubre a Noviembre, día 282 a 322) siendo mayor el riesgo cuanto más al Sud se encuentre el punto. Adicionalmente a pesar de encontrarse en plena época de lluvias, durante el mes de Febrero se aprecia un periodo con claras reducciones en la probabilidad de precipitación, lo que también podría provocar un estrés en los cultivos en este periodo cuando estos se encuentran en general en época de producción de la materia cosechable (en el caso específico de la quinua, la formación de grano).

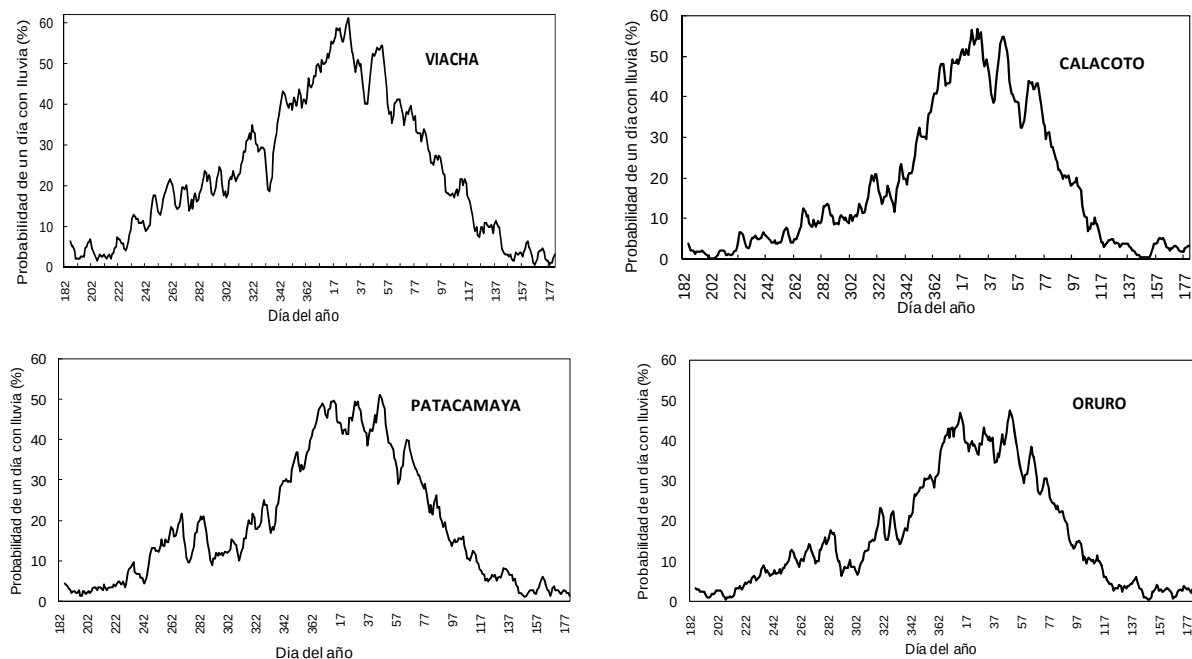


Figura No. 0.4. Probabilidad de un día con lluvia para cada día del año en cuatro puntos geográficos situados en el Altiplano Boliviano representativos de zonas productoras de quinua

La anterior descripción muestra una fuerte restricción agroclimática para los cultivos en el altiplano. Las bajas temperaturas extienden el ciclo de la mayor parte de los cultivos hasta 150 a 170 días, pero la duración promedio de la época de lluvias de entre 60 y 160 días (en función al tipo de años) (Geerts et al., 2009) no provee lluvia con la adecuada oportunidad (Figura 2.5). Adicionalmente el riesgo de veranillos (dry-spells) es elevado durante el periodo de máxima producción (Febrero) cuando los cultivos se encuentran en periodo de formación de producto cosechable. Por ello, desde un punto de vista pluviométrico, el riesgo de pérdida o reducción de los rendimientos es elevado en la zona, si no se considera acciones de riego especialmente al inicio del cultivo.

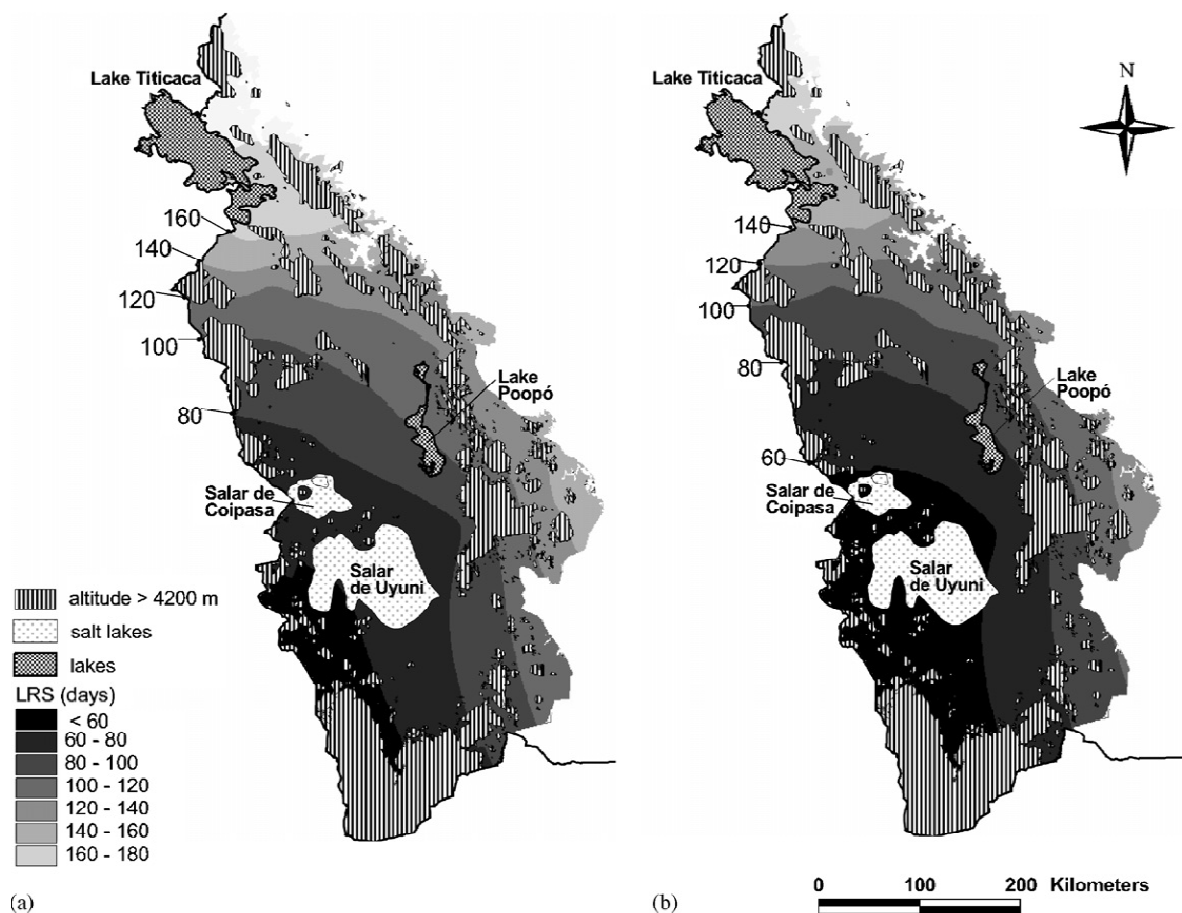


Figura No. 0.5. Representación geográfica de la duración de la época de lluvias en el Altiplano Boliviano en años a) normales y b) secos (Geerts et al., 2006)

2.3. Productividad de uso de agua de la quinua

El aprovechamiento del agua por parte de los cultivos se conoce como productividad del agua (WP) ($\text{g/m}^2 \cdot \text{mm}$). Steduto et al., (2009a), usaron esta relación y la estandarizaron para eliminar la influencia del clima de manera que sus valores puedan ser extrapolables denominándola Productividad de agua estandarizada (WP*) (g/m^2) lo cual es válido para cualquier cultivo y cuyos valores pueden ser utilizados en diversos ambientes climáticos sin calibración previa.

Como en el caso de casi todos los cultivos C3, la productividad normalizada de agua en la biomasa (WP*) de quinua es baja, con valores típicos de entre 9.5 a 10.5 g/m^2 (Geerts et al., 2009). Bajo condiciones de fertilidad pobre o muy pobre y durante los periodos críticos de sensibilidad a la falta de agua, este valor puede reducirse aún más, lo que es en general el causante de los bajos rendimientos en campo a causa de la combinación de condiciones reinantes de baja fertilidad y poco aporte de agua en las que en general se cultiva (Geerts et al., 2009).

2.4. Respuesta fenológica del cultivo de la quinua al estrés hídrico típico del altiplano en la agricultura a secano

García (2003) y Geerts et al., (2008b) realizaron extensivas investigaciones sobre la influencia del estrés hídrico en la fenología del cultivo de la quinua estudiando entre otros indicadores a la Suma de la Transpiración Diaria Real, estandarizada por la Evapotranspiración de Referencia ($\Sigma(Ta/ET_o)$) siguiendo lo expuesto por Steduto et al. (2009b). Los resultados en general muestran que las correlaciones entre los indicadores de estrés hídrico estudiados y el desarrollo fenológico son significativas (Figura 2.6) tanto desde el punto de vista de la duración de ciclo productivo en Días Calendario como para el periodo de acumulación térmica o Grados Día (GDD). Esto hace que las correlaciones obtenidas sean útiles para modelos que simulen desarrollo fenológico con estos valores (días calendario o GDD). También se evaluaron las correlaciones entre los indicadores de estrés hídrico y el Tiempo a la Madurez (TM). Los resultados mostraron que si el déficit hídrico ocurre después de la antesis (post-antesis) el valor de TM se reduce. Opuestamente el déficit hídrico ocurrido antes de la antesis más bien claramente alarga el ciclo de cultivo casi independientemente del nivel de fertilidad del suelo.

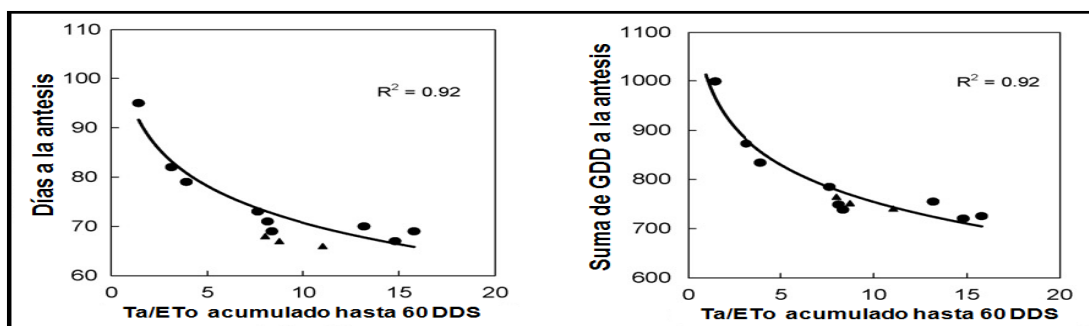


Figura No. 0.6. Regresiones entre tiempo a la antesis (en días y GDD) y Transpiración acumulada (Ta/ET_o) a 60 DDS. Los círculos corresponden a tratamientos en 2005-2006 (establecimiento de la correlación), y los triángulos para los tratamientos 2006-2007 usados para validación.

El claro efecto debido al estrés hídrico durante la pre antesis demostrado por los autores (desarrollo desacelerado pronunciado), así como el efecto del mismo durante la post antesis (leve aceleración de la madurez fisiológica) podría, por un lado ser observado como un mecanismo de adaptación de la planta para evitar los efectos de la sequía durante la floración (debido a la postergación de la antesis; para sequía antes de la floración) y la etapa de llenado de grano (por aceleración; para sequía después de la floración). Este tipo de reacción fenológica de la quinua se ha observado para otros cultivos en los que el período de floración está fuertemente relacionado con su crecimiento (Gross, 1981; Hirose y Kachi, 1982). Esto revela que el efecto del estrés hídrico sobre el desarrollo fenológico de la quinua es indirecto vía crecimiento. Entonces, como el estrés hídrico en las primeras fases del cultivos retarda el crecimiento, esto explicaría el retraso de la floración en zonas o años áridos (Geerts et al., 2006) con el que el cultivo esperaría utilizar cualquier lluvia tardía que ocurriese.

Si bien la comparación de quinua con otros cultivos es complicada debido a la particular combinación de radiación elevada, ocurrencia de heladas y aridez del altiplano boliviano, la respuesta fenológica de la quinua a las condiciones de sequía muestra alguna similitud con cereales que se desarrollan en los trópicos cálidos semiáridos. Donatelli et al. (1992) reporta para el sorgo un incremento en el tiempo térmico relativo derivado a partir de un umbral de estrés de 55% de transpiración relativa. Abrech y Carberry (1993) también informan un retraso en la floración para el maíz bajo condiciones de estrés hídrico, pero solamente por 4 días. El comportamiento de otros cultivos indica que el retraso en la floración en respuesta al estrés hídrico en pre anthesis observado para la quinua no es excepcional en su existencia sí no más bien en su magnitud (fuerte relación logarítmica).

2.5. Evapotranspiración máxima y coeficientes de cultivo de la quinua

La máxima Evapotranspiración de quinua con una duración de cultivo promedio de entre 150 a 170 días tiene un valor de alrededor de 650 mm/ciclo en condiciones óptimas de desarrollo para la condiciones de la demanda evaporativa promedio de la atmósfera en el Altiplano Boliviano (Garcia et al., 2003). Sin embargo estos valores pueden variar fuertemente en función del medio ambiente en que se desarrolle el cultivo, fundamentalmente respondiendo a la demanda evaporativa de la zona.

Tabla 0.1. Etapas de desarrollo y características del cultivo para una variedad típica de quinua (Garcia et al, 2003, Geerts 2009). Valores desarrollados bajo las guías publicadas por FAO y calibradas para la ecuación de ETo de la FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998)

Periodo vegetativo	Duración (días)	Kc (-)	Profundidad radicular efectiva (m)	Reducción permitida de contenido de agua (% ADT*)
Inicial	15	0.14→0.52	0.1	60
Desarrollo del cultivo	50	0.52→1.0	0.1→0.6	60
Desarrollo máximo	50	1.0	0.6	60
Estado final	45	1.0→0.6	0.6	60

* ADT se refiere al agua disponible total en el suelo, asumida como la diferencia entre Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente.

El producto de la ETo por los Coeficientes de Cultivo (Kc) mostrados en la Tabla 1, se constituye en los requerimientos de agua del cultivo de la quinua. Es importante mencionar que los Kc's presentados en la Tabla 1, fueron determinados en relación a la ETo calculada con la Ecuación de la FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998), por lo que su aplicación y validez se condicionan al cálculo de la ETo con la mencionada ecuación.

La información presentada en la Tabla 2.1, fue obtenida en base a varios estudios de campo (Garcia et al., 2003, Geerts et al., 2009) y se refiere al requerimiento de agua del cultivo en caso en que éste se desarrolle óptimamente sin limitaciones de agua ni nutrientes.

2.6. Riego deficitario de la quinua

Los datos mostrados de Evapotranspiración Máxima del cultivo de la quinua se refieren al caso en que el cultivo de la quinua se desarrolla bajo condiciones óptimas, sin limitaciones de agua ni nutrientes, pero fundamentalmente asumiendo una provisión continua de agua durante todo el ciclo vegetativo. Sin embargo este enfoque de aplicación de agua en este cultivo, no refleja la realidad agroclimática en la que se desarrolla en el Altiplano Boliviano. La descripción agroclimática presentada anteriormente muestra que el cultivo de la quinua tiene una elevada probabilidad de no contar con la suficiente cantidad de agua para establecerse (germinación) y podría sufrir de falta de agua durante su máximo desarrollo definido por la floración y llenado de grano. Este podría entonces ser uno de los factores por los cuales los rendimientos de quinua en la zona son generalmente marginales en comparación a la producción de otros granos. Desafortunadamente el riego permanente no es una opción en la zona, pues ésta enfrenta un permanente déficit de agua y las fuentes disponibles son escasas.

Ante ello, la aplicación de agua solamente durante etapas críticas de crecimiento, podría incrementar y estabilizar los rendimientos en años de déficits severos de lluvia (Garcia et al., 2003). Esta práctica se conoce como Riego Deficitario (RD) (English, 1990; Pereira et al., 2002), y se orienta a obtener la máxima eficiencia de uso de agua y a estabilizar los rendimientos más que a obtener rendimientos máximos (Zhang and Oweis, 1999; Oweis and Hachum, 2003).

Garcia (2003) y Geerts et al. (2006) llevaron adelante varias investigaciones sobre la aplicación de RD en quinua demostrando que es una opción valiosa para la estabilización de rendimientos en varias zonas del Altiplano Boliviano, donde falsos inicios de la época de lluvias y los periodos secos dentro del ciclo vegetativo son frecuentes y afectan al cultivo. Así, se ha encontrado que el riego deficitario (RD) fue altamente beneficioso en diversas ubicaciones experimentales. Al presente el RD ya se practica para la reintroducción de la quinua en regiones áridas de Chile y en algunas zonas de Bolivia.

De los resultados de los experimentos y estudios en campos de agricultores realizados sobre el tema, se derivó una estrategia interesante de RD que consiste en la mitigación de la sequía durante el establecimiento de la planta y durante la etapa reproductiva (floración y llenado temprano de grano). De todas las fases fenológicas estudiadas, la fase de grano lechoso se mostró como la más sensible a la falta de agua, seguida por la etapa de floración y la de emergencia. El estrés hídrico después de la emergencia hasta el estado de 6 hojas verdaderas y de la etapa de 6 hojas verdaderas hasta 12 hojas verdaderas no causó menores rendimientos y resultó en iguales o mayores Eficiencias de Uso de Agua que con Riego Completo (RC). La estrategia de RD fue probada en campo siguiendo prácticas agrícolas locales y comparando con RC y con secano. Con relación a esto último, se determinó el efecto negativo de la falta continua de agua, la cual reduce fuertemente los rendimientos en forma desproporcionada al déficit de agua, y al mismo tiempo que se demostró que el riego completo tampoco es compensado proporcionalmente por el rendimiento obtenido. Por tanto, se demostró que la cualitativa resistencia de la quinua a la sequía no debe ser sobreexplotada si se desea lograr las máximas eficiencias de uso de agua por parte del cultivo.

Más específicamente los investigadores demostraron, a través de varios años de experimentos llevados en varias zonas, que cuanto mayor sea la proporción entre la Evapotranspiración antes de la antesis y la misma después de la antesis ($ET_{a\text{pre}}/ET_{a\text{post}}$) menor será la Eficiencia de Uso de Agua (EUA). Esto sugiere que la mejor estrategia para optimizar el uso de agua por parte del cultivo de la quinua es la de aplicar RD con estrés hídrico en las etapas vegetativas de establecimiento de la planta, floración y llenado temprano de grano resultando en los valores mayores de Eficiencia de Uso de Agua (EUA) y elevados rendimientos y evitar el aporte adicional de agua desde la emergencia hasta la pre-floración.

La Figura 2.7 presenta un ejemplo de la regresión lineal entre la relación $ET_{a\text{pre}}/ET_{a\text{post}}$ y la EUA para los tratamientos aplicados. Se observa una regresión lineal negativa significativa. De los resultados de campo, observaciones previas y observaciones de campo, se derivaron valores indicativos de los requerimientos netos de riego, rendimientos esperados y EUA para varias condiciones de manejo, aplicaciones de riego y varios tipos de condiciones meteorológicas. Con la ayuda de RD, los rendimientos de quinua pueden ser estabilizados entre 1.2 y 2 Mg/ha aplicando alrededor del 35 % de las necesidades de riego completo (Figura 2.8), aunque este valor variaría en función del tipo de año en que se cultive la quinua.

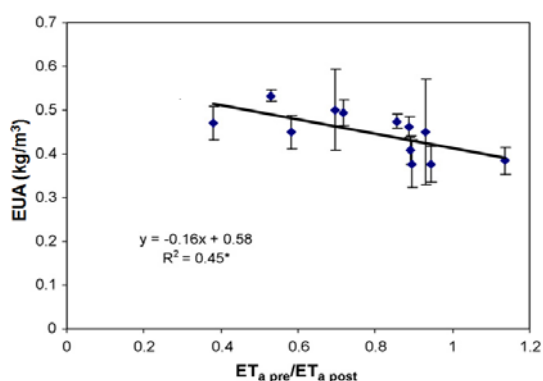
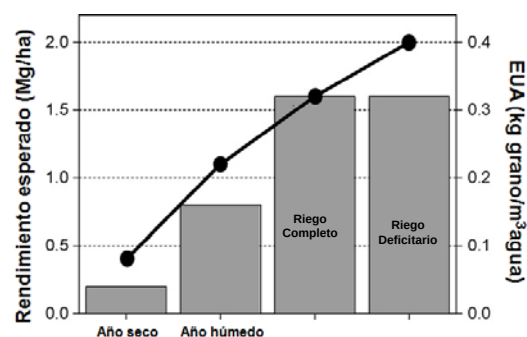


Figura No. 0.7. Regresión lineal entre $ET_{a\text{pre}}/ET_{a\text{post}}$ y EUA para experimentos de campo (barras verticales muestran 1 desv.est. (Geerts et al. 2008a)



Manejo	Secano (cond.de agricultor)		Riego completo	Riego deficitario
PP (mm)	250	450	360	360
Rnet media (mm)	--	--	260	88

Figura No. 0.8. Rendimientos esperados (barras) y eficiencia de uso de agua (puntos) para varias estrategias de manejo en el Altiplano Central Boliviano (Geerts et al. 2008b).

En base a los resultados obtenidos, se calibró el modelo de crecimiento y de uso de agua AquaCrop (Steduto et al., 2009b) para la quinua (Geerts et al. 2009). Los rendimientos simulados para cada uno de los 25-30 años de información climática disponible, en varias localidades del Altiplano Boliviano y para varias condiciones de disponibilidad de agua en la

región altiplánica boliviana se presentan en la Figura 2.10. Se observa claramente que la función de Producción de Agua del Cultivo (PAC) para quinua es logística.

La Figura 2.9 resume todos los resultados de la simulación. Esta función es una relación básica para la evaluación rápida de la respuesta de los rendimientos de quinua al estrés hídrico. De acuerdo a English (1990) y a English y Raja (1996), la función PAC derivada puede generar a su vez, funciones de beneficios económicos bajo diferentes ETa de ciclos de cultivo. Si se combina con una función de costos validada, la cantidad de riego óptimo a ser aplicada bajo diferentes condiciones económicas puede ser derivada. Sin embargo, la función debe ser usada con cuidado, debido a que de acuerdo a la distribución de agua en el ciclo y a si esta fue aplicada durante las etapas sensibles o no, los rendimientos de quinua pueden variar hasta en tres veces para valores similares de ETa en el ciclo (por ej. una ETa de ciclo de 300 mm puede resultar en rendimientos de entre 0.5 a 1.5 Mg/ha de grano en función a cuándo se aplicó o recibió el agua).

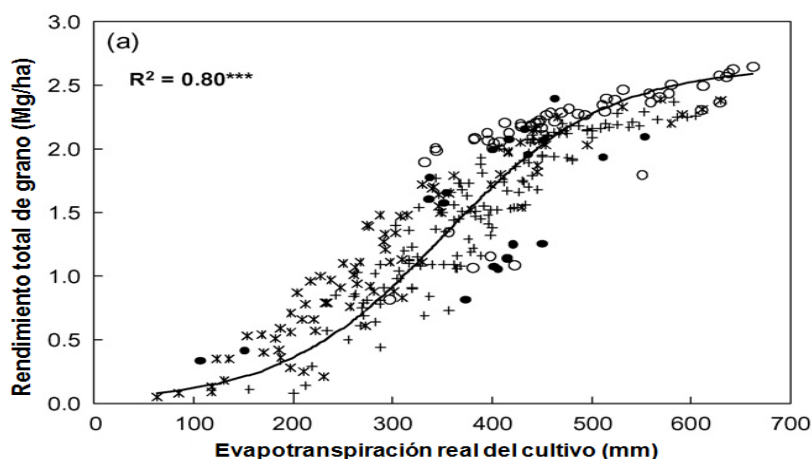


Figura No. 0.9. Función de Producción de Agua del Cultivo para quinua en parcelas experimentales (círculos negros) y bajo varias estrategias de riego deficitario, simuladas en el Altiplano Norte (círculos sin relleno), Central (cruz) y Sud (asteriscos) con indicación (línea sólida) de la curva logística (Geerts et al., 2009).

2.7. Calendario de riego

De los párrafos anteriores, se deduce la necesidad de contar con guías claras para llevar adelante un riego que optimice la Eficiencia de Uso de Agua de la quinua, orientadas a obtener los mejores rendimientos con la menor cantidad de agua aplicada. Conceptualmente el riego deficitario (RD) puede ayudar a la agricultura a incrementar la productividad del agua de los cultivos (Figura 2.10).

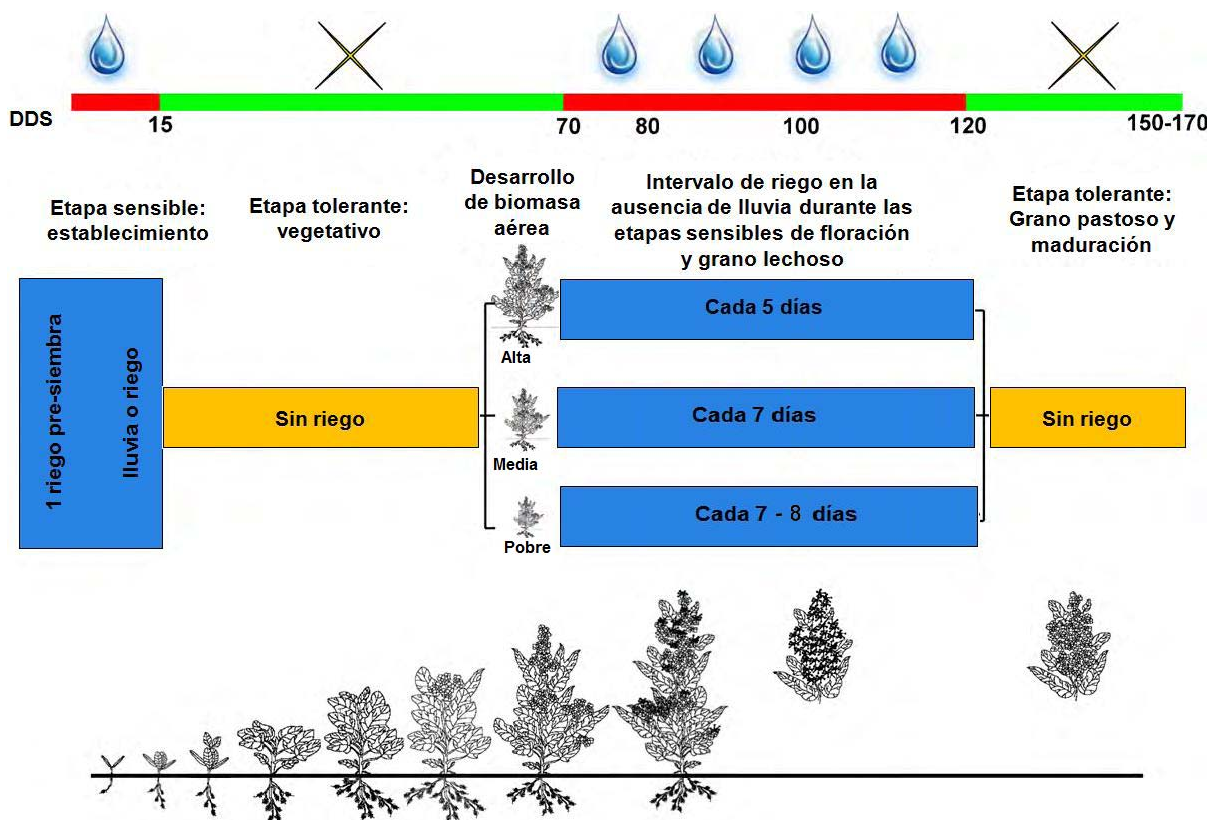


Figura No. 0.10. Gráfico práctico para la aplicación de riego deficitario de quinua en el Altiplano Boliviano si se enfrentan condiciones húmedas, normales o secas durante las etapas vegetativas. Los números indican los intervalos necesarios entre aplicaciones de riego de 20 mm en surcos cortos y suelos francos. El riego debe ser aplicado solo durante los periodos de color azul. La ocurrencia de estos periodos se indica en Días Después de la Siembra (DDS). El calendario es válido para una siembra de alrededor de mediados de Octubre. Las láminas y las frecuencias pueden variar en función al tipo de suelo (Adaptado de Geerts et al., 2010, en base a trabajos de campo de los autores)

Para elaborar estas directrices, Geerts et al (2010) utilizaron el modelo AquaCrop para simular el desarrollo del cultivo para largas series de datos climáticos históricos. Desde el comienzo de la etapa crítica del crecimiento en adelante, se simulaban condiciones de tiempo seco y se obtuvieron frecuencias óptimas de riego (intervalo de tiempo de una profundidad de aplicaciones para redes fijas) para evitar el estrés hídrico durante las etapas de crecimiento sensible y para garantizar la productividad del agua máximo. Al resumir estos resultados en gráficos de fácil lectura, se convierten en adecuados para políticas, extensión y el uso entre los agricultores (Figura 2.10).

2.8. Cambio climático y producción de quinua en el Altiplano Boliviano

El cambio climático junto a otros cambios sociales, económicos y ambientales provocará cambios en el sistema productivo pues como se describió en párrafos anteriores, este depende fuertemente del sistema climático gobernante en la zona. Por ello en esta sección se analizarán

los cambios y tendencias ya detectados en las temperaturas y la precipitación y los cambios proyectados por los Modelos Atmosféricos de Circulación General y sus posibles implicancias en el ciclo productivo.

2.8.1. Análisis de tendencias históricas mensuales

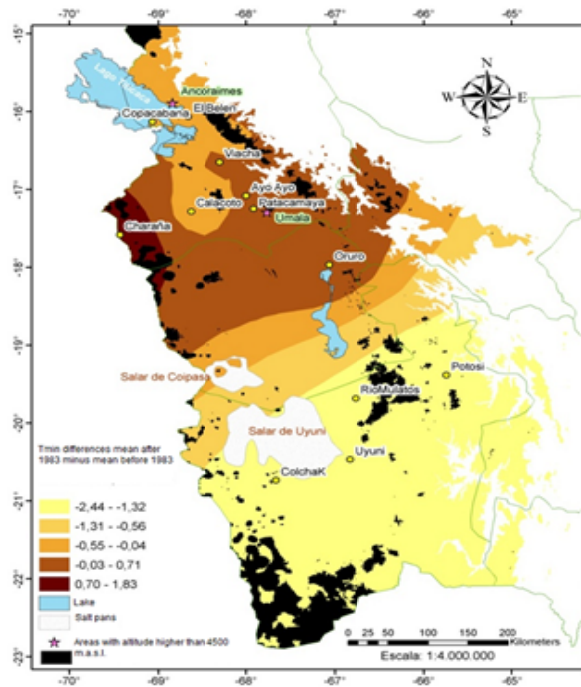
El análisis estadístico de los registros históricos de 14 estaciones meteorológicas en el Altiplano muestra una leve reducción en la precipitación mensual de los meses de inicio de la época de lluvias (Octubre a Diciembre), pero no muestra una tendencia significativa de cambio en la precipitación anual (Valdivia et al., 2010).

La Figura 2.11 presenta el análisis geo-estadístico de la tendencia de cambio de la temperatura y la precipitación. Las temperaturas máximas muestran una tendencia de incremento en todo el territorio altiplánico con mayor tendencia incremental en el Sud. Las temperaturas mínimas también muestran tendencias de incremento en el altiplano Norte y Central especialmente en invierno, pero en el Altiplano Sud se percibe un descenso de estas, lo cual podría estar explicado por el cambio de los sistemas productivos de la zona que, al retirar la cobertura del suelo y no mantener la vegetación natural podrían estar provocando procesos de desertificación local que reduciría el vapor de agua atmosférico y con ello un incremento de la pérdida energética nocturna.

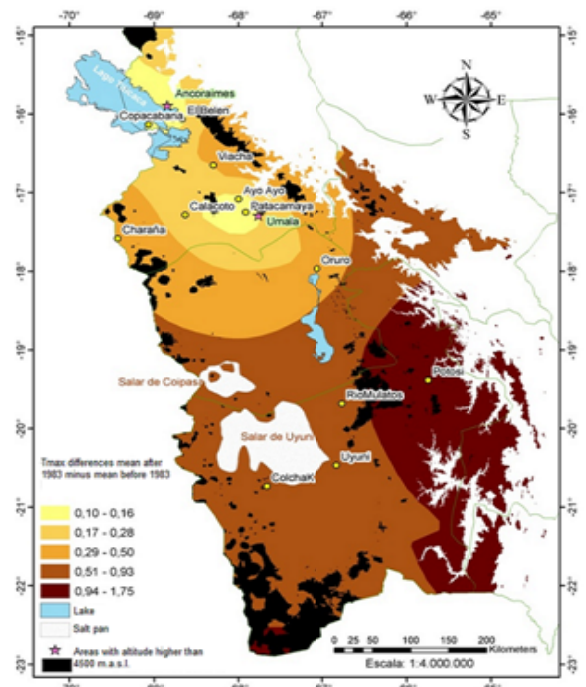
Estos procesos requieren de mayor investigación con el fin de sugerir mejores técnicas de manejo del sistema productivo de la zona, pues la falta de información de largo plazo detallada y con amplia distribución geográfica incrementa la incertidumbre de la información.

2.8.2. Variaciones esperadas en las temperaturas y la precipitación mensual en las zonas de estudio hasta 2050

Con el fin de conocer la posible señal de cambio de las características termopluviométricas de las zonas productivas de quinua, se proyectaron con el modelo LARS-WG bajo el entorno del MCG ECHAM5.0 y el escenario A2, valores termo-pluviométricos puntuales de las estaciones de Patacamaya y Rio Mulatos ubicadas en zonas productivas estratégicas del Altiplano Central y Sud Bolivianos respectivamente. Los valores proyectados de temperatura y precipitación para las estaciones son presentados en la Figura 2.12. Se aprecia que los mayores incrementos térmicos se observarían hacia 2045-2050 con poco cambio hasta 2020-2030. La Tmin se incrementa más en los meses invernales pero esto no reduce la limitación de las extremas temperaturas bajas que enfrentan las zonas con extremos mayores en Rio Mulatos.



1A



1B

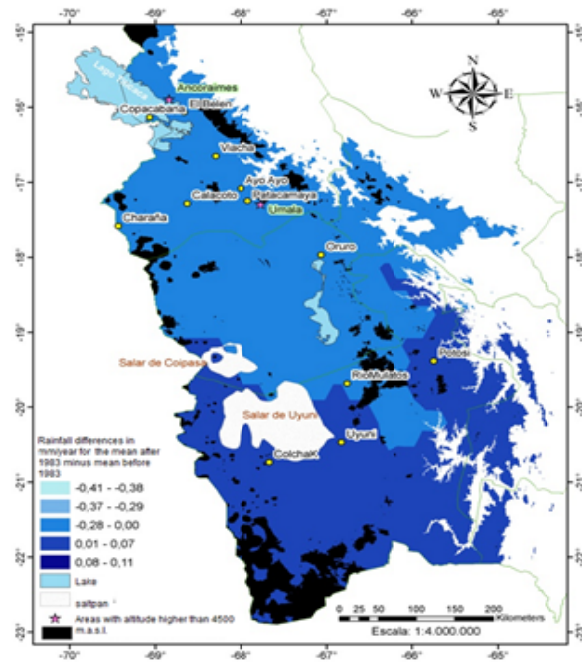


Figura No. 0.11 Diferencias en el promedio de registros de la Temperatura Mínima (arr. izq.) Máxima (arr. der.) y Precipitación antes y después de 1983 para el Altiplano Boliviano. (Valdivia et al. 2010).

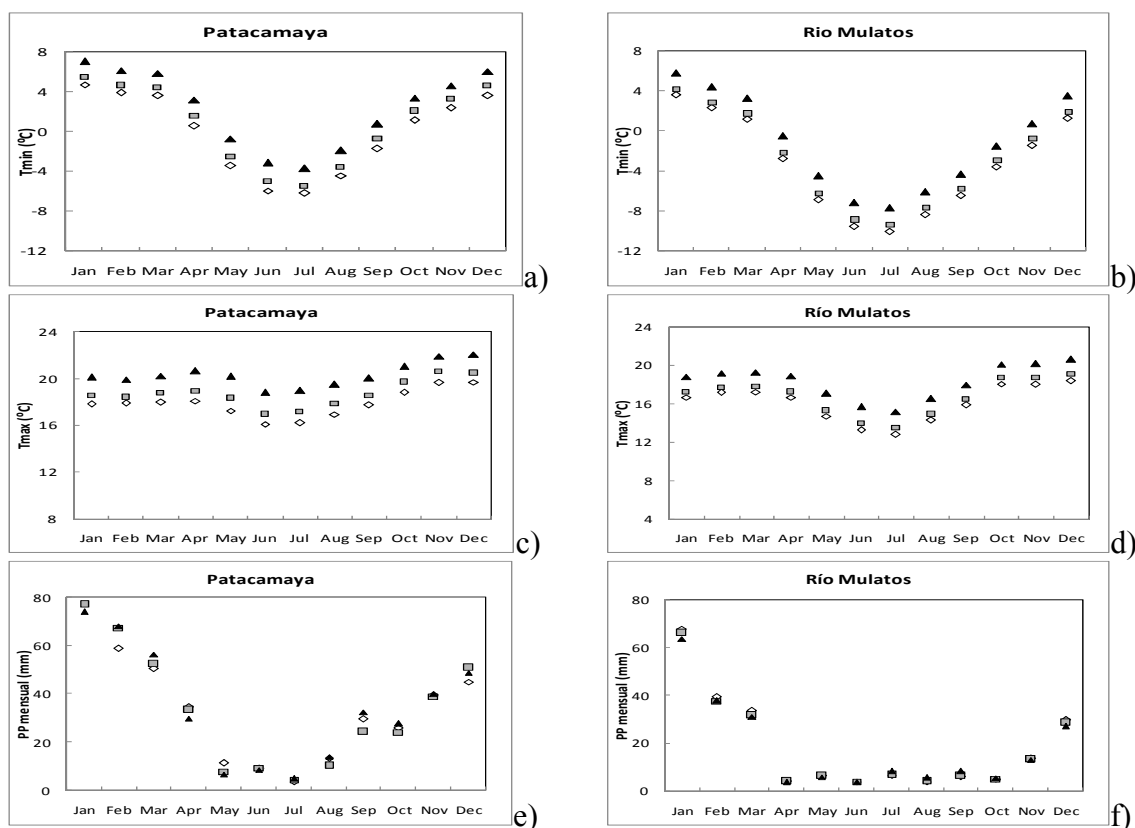


Figura No. 0.12. Valores promedio mensuales proyectados de Tmin (arriba), Tmax (centro) y PP (abajo) para las estaciones estudiadas. Diamantes representan a los promedios de la población histórica, Cuadrados a 2020-2030 y Triángulos a 2045-2055.

El incremento en las Tmax se percibe con mayor intensidad en Patacamaya que en Río Mulatos, probablemente por la mayor sequedad del aire, la cercanía al anticiclón del Pacífico y la altitud que reducen la posibilidad de acumular energía durante el día. La precipitación presenta cambios más heterogéneos, esperándose en Patacamaya cierto incremento en la precipitación en los meses pico de la época de lluvias (Dic.-Mar), con un proceso inverso en los meses invernales que se tornan más secos. En el caso de Río Mulatos, se percibe más bien que los meses pico de la época de lluvias presentan una cierta tendencia a recibir menor precipitación, mientras que los meses invernales no presentan cambios en los promedios. Considerando la fuerte concentración de la precipitación en esta zona, su reducción durante la época pico de lluvias puede resultar en impactos significativos para la época de cultivo de quinoa que al presente ya debe enfrentar permanente estrés hídrico durante su cultivo en la zona.

2.8.3. Extremos climáticos de mayor importancia para el cultivo de la quinoa en la zona

El estudio de los extremos climáticos, en muchos casos tiene mayor importancia que los promedios cuando se analiza el futuro sistema climático de una zona. Esto es especialmente cierto en zonas con variables erráticas y/o elevados riesgos agroclimáticos, como el Altiplano

Boliviano. Por ello, también se analizan los posibles riesgos más importantes en la zona. En el caso de las zonas productivas de quinoa, estos se traducen en heladas, sequía, golpes de calor y eventuales inundaciones.

2.8.3.1. Riesgo de heladas

Las T_{min} diarias inferiores a 0°C, fueron evaluadas para las dos estaciones estudiadas con el fin de identificar la variación en la ventana libre de heladas durante la cual la agricultura podría desarrollarse en el futuro en la zona. La Figura 2.12 a) y b) muestra que el riesgo de heladas no desaparecerá en las zonas, y aunque estas se reducen, no lo hacen todo el año. Por ello se ha evaluado las T_{min} diarias para los periodos históricos, 2020-2030 y 2045-2055 con su variabilidad diaria tanto observada como prevista (Figura 2.13). Se aprecia que en el periodo histórico, en años con elevada presencia de heladas, el periodo libre de heladas llegó a sólo 110 días en Patacamaya y 45 días en Río Mulatos. En promedio este periodo es de 190 días en Patacamaya y de 100 días en Río Mulatos. El incremento térmico esperado bajo el escenario A2, muestra una ampliación del periodo libre de heladas en Patacamaya, llegando hasta 180 días sin heladas en años fríos y 240 días sin heladas en años promedio. Este comportamiento, sin embargo es mucho menos claro en Río Mulatos donde se tendrían hasta 80 días sin heladas en años fríos y 140 días sin heladas en años promedio. De esta manera se aprecia que el calentamiento de la zona posibilitaría, desde un punto de vista de heladas, mejores condiciones agrícolas en Patacamaya pero que este beneficio sería sentido menos claro en Río Mulatos que aún bajo condiciones de cambio climático, enfrentará periódicamente años con elevados riesgos de heladas.

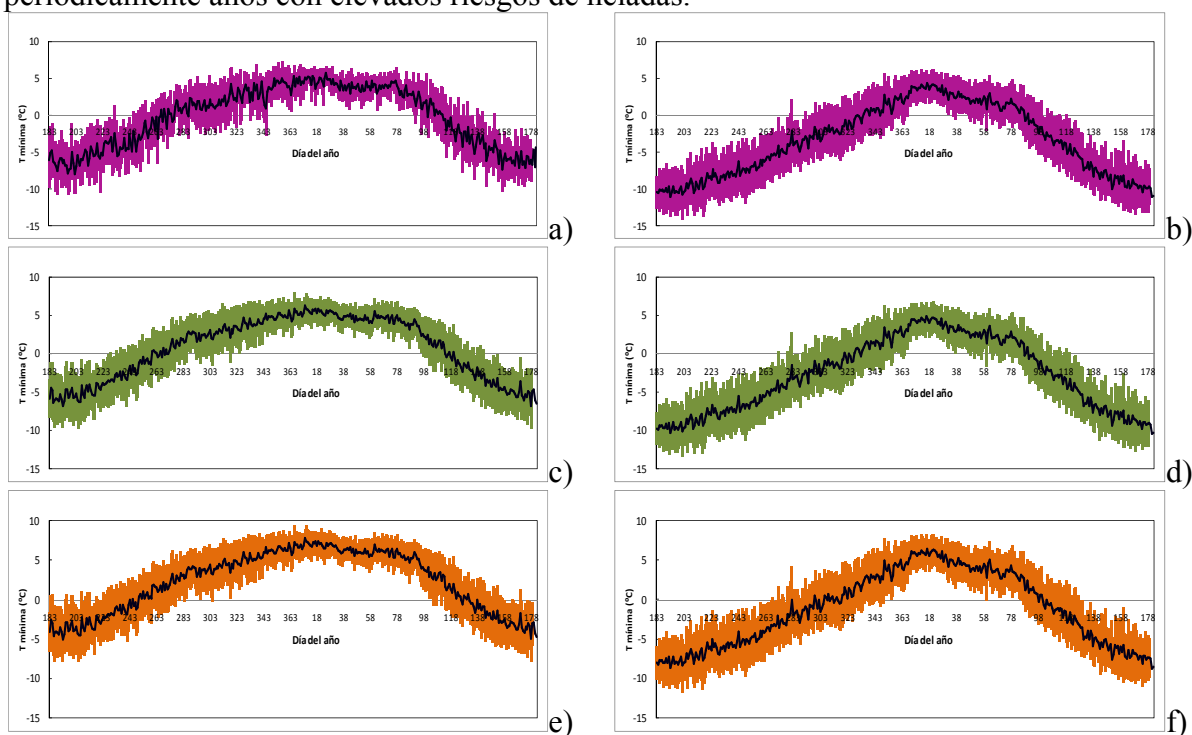


Figura No. 0.13. T_{min} diaria promedio (líneas negras) con el rango de una desviación estándar de la población para a) y b) periodo histórico; c) y d) 2020-2030 y e) y f) 2045-2055 en las estaciones de (izquierda) Patacamaya y (derecha) Río Mulatos.

2.8.3.2. Ciclo de cultivo

La duración del ciclo de cultivo es importante para la planificación de las actividades agrícolas. Por ello se ha desarrollado el término de acumulación de unidades de calor (GDD) que ayuda a definir la duración del ciclo de los cultivos. En estudios realizados en diversas zonas productoras de quinoa del Altiplano se ha definido que el cultivo requiere en promedio 1500 GDD para concluir su ciclo de cultivo. Bajo estos valores se ha determinado la variabilidad del ciclo de cultivo en el periodo histórico y se lo ha proyectado para los datos provistos por el generador climático para 2020-2030 y para 2045-2055 (Figura 2.14 a) asumiendo como fecha de siembra el 1 de Octubre en Río Mulatos y 10 de Octubre en Patacamaya. Los resultados muestran que en el periodo histórico, en el Altiplano Sud, existe una fuerte variabilidad en el ciclo de cultivo debido a la presencia errática de temperaturas mínimas muy bajas. Sin embargo con la elevación térmica, esta variabilidad reduce aunque en todos los casos es mayor que en Patacamaya. En Río Mulatos en 2020-2030 sólo se reducirá la variabilidad del ciclo pero la duración de este sería similar al periodo histórico. Es sólo en 2045-2055 que se percibe una mayor diferenciación en la duración del ciclo. Esto no ocurre en Patacamaya donde el impacto es claro en el futuro cercano y altamente significativo para medio siglo.

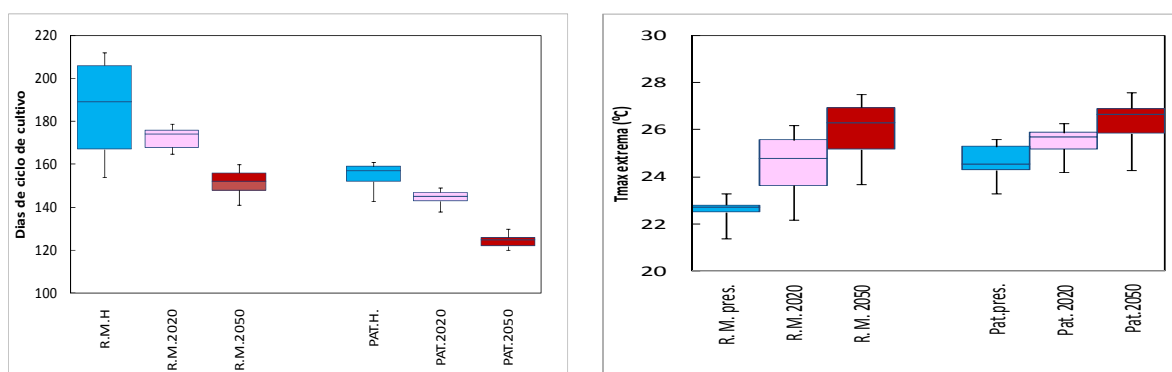


Figura No. 0.14.-a) Duración del ciclo de cultivo y b) Tmax extrema anual en el periodo histórico (azul) y 2020-2030 (rosa) y 2045-2055 (rojo) en Río mulatos (R.M.) y Patacamaya (PAT). Los boxplots muestran la variabilidad con los valores máximos y mínimos.

2.8.3.3. Temperaturas máximas extremas

Los golpes de calor podrían también considerarse como un riesgo para el cultivo de la quinoa, principalmente si ocurren durante la floración y llenado de grano, debido a que las elevadas temperaturas incrementan la demanda evaporativa de la atmósfera y porque reducen la probabilidad de éxito de la floración, disminuyendo el rendimiento. Las temperaturas máximas extremas anuales se perciben con incrementos claros (Figura 2.14 b) tanto en su magnitud como en su dispersión, existiendo el riesgo de que algunos años las temperaturas máximas extremas alcancen rangos que podrían provocar daños en los cultivos. Se percibe que los rangos que en el periodo histórico son menores en Río Mulatos que en Patacamaya, en el futuro serían similares, mostrando que el impacto sobre las temperaturas extremas sería mayor en el Sud que en el altiplano Central, probablemente por la sequedad del ambiente que reduce el efecto amortiguador de la atmósfera a la llegada de radiación extrema que se

acumularía eventualmente por el mayor contenido de Gases de Efecto Invernadero en su atmósfera.

2.8.3.4. Riesgo de sequía

El riesgo de sequía fue evaluado asumiendo como referencia las condiciones históricas de las zonas estudiadas. La Tabla 2.2 muestra que durante el inicio de la época de lluvias se incrementa fuertemente el riesgo de enfrentar años secos en los dos puntos estudiados. En Patacamaya en esta época reduce la probabilidad de años húmedos por lo que los años en general podrían ser más secos que al presente, aunque los años húmedos podrían tener magnitudes un poco más elevadas que al presente, por lo que los promedios serían similares o superiores al presente. En el caso de la precipitación durante el periodo pico de la época de lluvias (Enero a Marzo), en Patacamaya se reduce levemente el riesgo de enfrentar años secos y años húmedos mientras que la lluvia parece tener una mayor probabilidad de tener un comportamiento regular o normal. En cambio en Río Mulatos el riesgo de enfrentar años secos se incrementa así como se reduce el riesgo de enfrentar años húmedos en el futuro.

Tabla 0.2. Probabilidad de ocurrencia (%) de un tipo de año hidrológico en los periodos Octubre-Diciembre (O-D) y Enero a Marzo (E-M) en el registro histórico y en 2045-2055

ESTACION	Tipo de Año	HISTORICO	2050	HISTORICO	2050
		O-D	O-D	E-M	E-M
PATACAMAYA	Seco	21,4	32,1	23,8	21,4
	Normal	48,2	44,6	45,2	51,2
	Húmedo	30,4	23,2	31,0	27,4
RIO MULATOS	Seco	14,3	21,4	25,0	29,1
	Normal	60,7	35,7	50,0	51,7
	Húmedo	25,0	42,9	25,0	19,2

2.8.3.5. Periodo de retorno de las Temperaturas y Precipitaciones extremas

El periodo de retorno muestra la frecuencia con que un evento se presenta en cualquier zona. Se calculó este periodo para las Tmax y PP extremas identificadas durante el periodo histórico y su periodo de retorno bajo las condiciones futuras. La Figura 2.15 a) muestra que las Tmax extremas que tenían alrededor de 10 años de periodo de retorno en el periodo histórico en ambas zonas, en 2045-2055 ocurrirán prácticamente todos los años. Las PP extremas no muestran cambios significativos en sus retornos, percibiéndose en Patacamaya que el periodo de retorno de la PP max extrema (Figura 2.15 b) podría reducir levemente siendo un poco más frecuente la posibilidad de enfrentar PP extremas en esta zona.

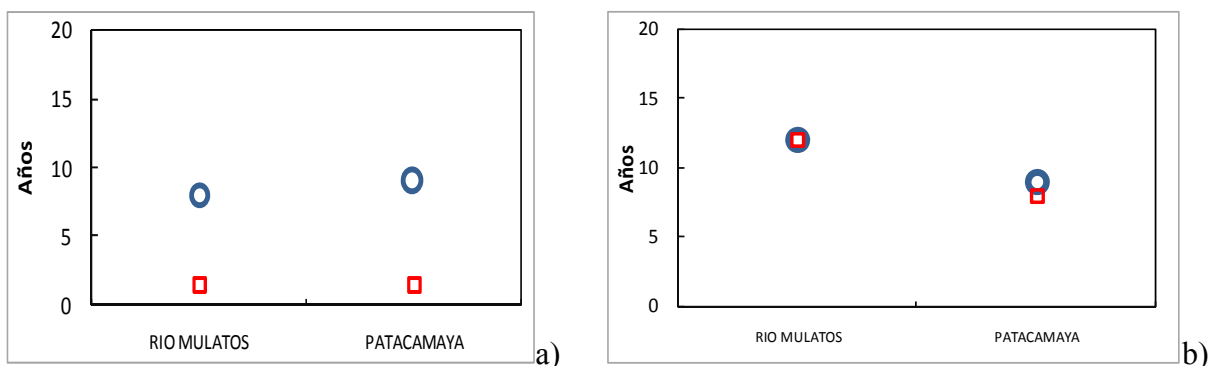


Figura No. 0.15. Periodo de retorno de a) Tmax y b) PP extremas para las estaciones estudiadas. En círculos azules el registro histórico, en cuadrados rojos el registro 2045-2055.

2.8.3.6. Proyecciones de humedad del suelo

Los cambios en la humedad del suelo fueron evaluados para el escenario A2 por Thibeault et al, (2010). Los promedios multi-modelo muestran que la humedad del suelo disminuye en todo el ciclo anual desde el año 2020 - 2049, incluso considerando que algunos modelos proyectan un aumento en el temporada de lluvias, lo cual se mantiene hasta 2070-2099. Existe concordancia entre los modelos que proyectan mayores reducciones de humedad del suelo durante todo el ciclo anual, incluso en el pico de lluvias para fines de siglo.

Las series multi-modelo muestran reducciones de humedad de suelo en primavera (Octubre a Diciembre) en todo el Siglo 21, en consonancia con las proyecciones de menor precipitaciones y temperaturas más altas (Seth et al, 2010; Thibeault. et al., 2010). Se espera también una baja humedad del suelo en verano (Enero a Marzo) a partir de mediados de siglo a pesar de que la precipitación total no parece cambiar. Esto se debería a que se incrementaría la intensidad de precipitación lo que conduciría a mayor escorrentía superficial pues las intensas lluvias excederían la capacidad de infiltración del suelo. Asimismo las mayores tasas de evapotranspiración por mayores temperaturas provocarían rápidos procesos de desecación del suelo.

2.8.4. Impactos en el sistema productivo de la quinua

En general el cultivo de quinua enfrentará mejores condiciones térmicas que al presente en el Altiplano Andino, pero muchos de los riesgos climáticos se mantendrían en la zona tanto para la quinua como para los otros cultivos. Es muy probable que se enfrente una mayor tendencia a los días con mucha insolación especialmente durante el inicio de la época de cultivo (noviembre a diciembre) pues la precipitación tiende a reducir en esa época por lo que habría menor nubosidad y mayor recepción de radiación intensa, lo que incrementaría la sensación de calentamiento pero también podría mantener el riesgo de heladas radiativas durante este periodo. En este punto es importante considerar la posibilidad de aplicar riego (deficitario) para garantizar la germinación pues el riesgo de fracaso del cultivo se incrementará por falta de germinación de las plántulas.

El número de días con heladas disminuiría con alta probabilidad siendo que la zona tendrá una mejor aptitud agrícola pero la agricultura todavía enfrentará amenazas meteorológicas limitantes como esporádicas heladas y sequías prolongadas. En verano nuevos cultivos y nueva vegetación silvestre podría migrar a la zona por las mejores temperaturas, pero esta morirá muy rápidamente durante el invierno por las heladas que todavía serán muy intensas. Sin embargo, estas nuevas especies, podrían también constituirse en malezas durante el ciclo productivo de la quinua y también en hospederos de plagas y enfermedades. Debe considerarse presente el riesgo de problemas fitosanitarios para el cultivo pues las bajas temperaturas del periodo histórico controlaban la presencia de patógenos y vectores, pero las temperaturas ya no serán limitantes especialmente en verano.

Si bien el promedio de las temperaturas máximas muestra un ascenso regular de alrededor de 2 a 3°C, el riesgo de enfrentar días muy calientes se incrementaría fuertemente, lo cual podrá afectar con fuerza a los sistemas productivos de quinua pues el cultivo no se encuentra habituado a temperaturas muy elevadas y este incremento significará mayor demanda de agua que en muchos casos no podrá ser cubierta con el agua de precipitación, pues esta no sufrirá cambios de consideración. Esto significa que en el periodo histórico las zonas sufrían de déficit hídrico y a futuro este déficit será mayor por la mayor demanda y no necesariamente por la menor oferta de agua.

Las precipitaciones extremas podrían ser un poco más comunes porque las precipitaciones convectivas violentas tendrían mayor posibilidad de desarrollarse por la mayor insolación debido a la menor nubosidad. Dada la fisiografía de la zona de cultivo de quinua, no se presentarían avenidas pero sí inundaciones de las planicies. La probabilidad de tener años más secos al inicio de la época de lluvias se incrementa y se contaría con pocos años con lluvia suficiente en esta época por lo que es de suma importancia la aplicación del concepto de riego deficitario para el periodo tal como fue descrito en párrafos anteriores. La amenaza de sequía también existe durante la época de lluvias por lo que no debe descuidarse acciones también para esta época. Por ello, el manejo del sistema productivo del cultivo debería considerar entre sus prioridades el manejo de riego y el control de plagas y enfermedades que podrían incrementarse fuertemente.

Dado que se ha percibido que los extremos de hoy, podrían ser muy similares a las condiciones medias del futuro, se podría trabajar con una comparación espacial y/o temporal de análogos (asumiendo que lo que pasó puede ser semejante a lo que está pasando o pasará). Como ejemplo puede citarse el uso de los índices de vegetación en años hídricos extremos (secos ó húmedos,), ó la probabilidad de ocurrencia de niveles elevados o bajos de rendimiento asociados a las fases extremas de los eventos ENOS (El Niño y La Niña).

En general, en las zonas productivas se percibe una fuerte variabilidad de la posible presencia de los extremos climáticos, por lo que el sistema productivo de la quinua deberá plantear acciones muy flexibles que lo preparen para eventos de señal positiva y negativa simultáneamente especialmente para las precipitaciones. En el caso de la temperatura, esta presenta una señal constante de ascenso que incluso muestra que los extremos históricos se podrían constituir en la población normal del futuro.

En conclusión, la combinación de temperaturas más elevadas, cambios en el momento y la intensidad de la precipitación y las reducciones en la humedad del suelo muy probablemente incrementarán los riesgos relacionados al clima que sufre la agricultura del Altiplano Boliviano en el futuro de la que la quinua es un componente de máxima importancia, lo que podría ser trabajado a través de acciones de adaptación de manejo eficiente del sistema productivo local.

Con la información climática producida en el presente trabajo u otros similares, se pueden aplicar modelos estadísticos y productivos que den luces sobre el impacto más previsible del cambio climático con bajo nivel de incertidumbre. Por ejemplo, las ecuaciones que establecen la relación entre rendimientos y lluvias ocurridas en los períodos críticos, aplicadas con la información climática futura producirán simulaciones de rendimientos que podrían ser cercanos a los rendimientos reales futuros y a la variabilidad que podría esperarse de ellos. También podrían desarrollarse funciones de Intensidad-duración-Frecuencia de las precipitaciones con énfasis a la precisión de los extremos, los cuales combinados con proyecciones y uso de Sistemas de Información Geográfico podrían identificar las áreas más propensas a inundaciones en el futuro bajo las condiciones pluviométricas extremas que podrían ocurrir.

Capítulo 3

FACTORES BIOFÍSICOS QUE DETERMINAN LA PRODUCTIVIDAD DE LA QUINUA EN EL ALTIPLANO ALTO ANDINO

La productividad de los cultivos, es cuantitativa y cualitativamente determinada por la interacción de diversos factores, entre los cuales se destacan los climáticos, técnicos, genotípicos, edáficos y hasta gerenciales. Por tanto la producción de un sistema, es de alta complejidad y dispone de recursos limitados. (Rezende y Araujo, 2007). En el caso de la quinoa, (*Chenopodium quinoa*) este cultivo es la principal fuente de ingreso para los agricultores del altiplano sur boliviano, y es muy importante para agricultores de otras zonas altiplano andinas gracias a sus elevados precios de exportación. Este cultivo presenta una amplia variabilidad genética lo que le permite desenvolverse y producir en situaciones ambientales difíciles como de déficit hídrico, bajas temperaturas, y presencia de suelos salinos. Sin embargo, esta rusticidad se refleja en sus bajos rendimientos que en el Altiplano presentan valores de 500 a 700 kg ha⁻¹. Las razones para estos valores tan reducidos se encuentran en la presencia de plagas y enfermedades, suelos con baja fertilidad, deficiencia de humedad en el suelo y condiciones climáticas extremas. En el altiplano norte, si bien el ecosistema presenta condiciones ambientales más favorables para la producción del cultivo que en el altiplano sur y centro, el minifundio y las mejores condiciones climáticas hacen que su importancia sea desplazada por otros cultivos tales como la papa, cebolla, haba, entre otros.

En el presente capítulo se describirá las condiciones ambientales y físicas que influyen fuertemente al rendimiento del cultivo, con el fin de comprender su dinámica y tratar de optimizarla.

3.1. Principales área de cultivo de quinua

Aunque la quinua es producida en diversas áreas del planeta desde latitudes muy bajas como Colombia y Ecuador hasta ambientes muy temperados como Dinamarca y Argentina, las áreas productivas más importantes del planeta se encuentran en el altiplano alto andino compartido por Perú y Bolivia. De esta zona, el Altiplano Boliviano y más específicamente el altiplano sud, producen cerca al 50 % de la quinua consumida en el planeta, siendo al mismo tiempo el área productiva más frágil. Por esta razón muchas de las especificaciones aquí presentadas, se refieren a suelos altiplánicos, aunque son válidas para ser aplicadas en otras zonas.

El altiplano Boliviano (Figura 3.1), está situado entre las coordenadas 10° 50' a 19° 00' de Latitud Sur y 67° 30' a 69°40' de Longitud Oeste. Tiene una altura de 3800 por encima del nivel del mar y una superficie de 100000 km². Presenta serranías y planicies altas con sedimento fluvial y lagos.

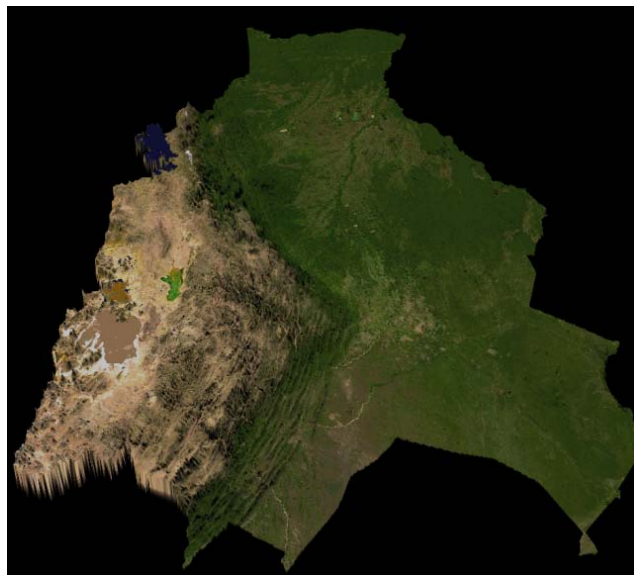


Figura No. 0.1. Localización del Altiplano Boliviano

El Altiplano Boliviano se divide en tres zonas: Altiplano Norte, Centro y Sur y las condiciones ambientales difieren marcadamente entre ellas. En este sentido el Altiplano Norte presenta precipitaciones pluviales que van desde los 700 a 800 mm anuales, descendiendo hacia el sur. En el Altiplano Centro las lluvias se encuentran entre los 300 a 400 mm y en el Altiplano Sur las mismas se encuentran entre 150 a 250 mm.

Pese a que la quinua es un cultivo resistente a diferentes condiciones como climas secos, heladas, salinidad, los factores que determinan la productividad de este cultivo, van desde las condiciones ambientales, condiciones genéticas del cultivo y condiciones de manejo. Seguidamente se describen algunos factores que limitan la productividad del cultivo de la quinua en regiones áridas o semiáridas, como el Altiplano.

3.2. Factores ambientales y biofísicos

3.2.1. Condiciones climáticas del Altiplano

Aunque una extensiva descripción del sistema climático del altiplano se presentó en el Capítulo 2 de este manual, aquí se hará una específica explicación de los factores climáticos que afectan al cultivo.

En forma general el Altiplano donde se desarrolla la quinua, presenta un clima propio de ambientes áridos a semi-áridos, con dos estaciones bien definidas, un periodo lluvioso de diciembre a febrero en el que se concentra hasta un 85% de la precipitación que oscila entre 150 y 300 mm anuales en el Altiplano Sur, 300 a 400 mm en el Altiplano Central hasta 600 a 800 mm en el altiplano Norte. El periodo seco va de abril a octubre (con marzo y noviembre de transición). Las variaciones de temperatura son las características de los climas áridos y semi-áridos. Jornadas con sol calientes durante el día se suceden con noches frías y durante los meses invernales el riesgo de heladas es de casi el 100 %, reduciéndose pero no desapareciendo en el verano. Las heladas se presentan con mayor rigor en las zonas bajas el Altiplano (llanuras aluviales, llanuras fluviolacustres), afectando a las áreas cultivadas. Las heladas se presentan como una de las limitantes recurrentes a tal punto de que paisajes como las llanuras aluviales, actualmente en producción, aparecen como no aptas para el cultivo (FAUTAPO, 2008) desde un punto de vista de limitación agroclimática. Esto reduce fuertemente la productividad de las áreas de expansión de quinua, pues el cultivo se está extendiendo precisamente hacia estas áreas para producir más.

En el Altiplano, el periodo agrícola coincide con las precipitaciones pluviales y el verano austral (octubre – marzo), sin embargo, las sequías suelen ocurrir al inicio y final de las lluvias, debido a una disminución en la amplitud de la estación de lluvias, y el riesgo de enfrentar periodos secos es permanente durante el periodo de lluvias (García, 2006). Los periodos secos intraestacionales, son tan importantes para la producción del cultivo como las diferencias inter-estacionales, especialmente cuando el periodo seco ocurre en etapas críticas del crecimiento, como en la antesis (momento en que se produce la apertura de la yema floral) o durante la emergencia. Según García et al., (2003), la quinua es un cultivo interesante para la producción bajo condiciones de sequía pero se encuentra limitada si la sequía ocurre en periodos de mucha sensibilidad. Bohnert, Nelson y Jensen (1995), mencionan varios mecanismos relacionados al escape a la sequía, tolerancia y evasión así como a la tolerancia y escape a otras alteraciones abióticas como la helada; sin embargo también Geerts, (2008) confirma que cuando la sequía ocurre en etapas fenológicas sensibles, la producción será seriamente reducida.

3.2.2. Altitud

Según Mújica et al. (2001b), la quinua crece y se adapta desde el nivel del mar hasta cerca de los 4000 metros sobre el nivel del mar. Entre éste amplio rango de altitud, se desarrollan diversidad de ecotipos, los cuales han desarrollado adaptaciones morfológicas y fisiológicas particulares al ecosistema en el que viven. La presencia de estas adaptaciones son particulares a las condiciones edafoclimáticas de las eco – regiones del grupo al que pertenecen y pueden

presentar dificultades para adaptarse a otro. En general, sin embargo, la mayor diversidad de ecotipos se encuentra alrededor del Lago Titicaca, y el altiplano alto andino, razón por la que existe la idea generalizada de que se desarrolla mejor a mayor altitud.

3.2.3. Suelos

El Altiplano Boliviano presenta una sucesión de suelos relativamente jóvenes con limitaciones de fertilidad. Aunque vastamente habitado y cultivado, la información detallada acerca de los suelos altiplánicos es limitada. Parte de la información importante acerca de los suelos de esta región incluye las publicaciones por Clapperton (1993) y Blodgett et al. (1997) que indican que durante el período cuaternario, había un vasto Lago elevado predecesor del Titicaca llamado Lago Ballivian que cubría lo que hoy es el Altiplano de los Andes de América del Sur. El hecho de que el altiplano andino fue una vez un fondo del océano hace que esta región haya estado sujeta a la acumulación de sal durante su formación de roca y la salinidad del suelo actual de algunas zonas del Altiplano es función de las altas concentraciones de sales en el material parental del suelo (Aguilera, 2010, Jetté et al., 2001). De acuerdo con Ruthsatz y Fiselín (1984) mencionados por Jetté et al. (2001), las laderas de las montañas de la cordillera andina están protegidas por rocas incompletamente meteorizadas, los pies de valle aún están cubiertos por rocas, y las zonas bajas tienen restos aluviales y pequeñas mesetas. El gradiente de textura del suelo en el altiplano oscila entre arenoso-limoso a arcilla - limo y arcilla pesada, y también hay suelos arenosos derivados de deposición eólica, que al parecer ha contribuido a estabilizar las dunas de arena en el Altiplano formando un complejo de suelos relativamente jóvenes y pobres con un predominio de partículas de arena en la capa superior del suelo (Jetté et al., 2001).

Aunque las temperaturas ambientales del Altiplano determinan fuertemente su reducida proporción orgánica, Herve y Beck (2006) propusieron la hipótesis de que la reducida cantidad de nitrógeno podría ser compensada adecuadamente si se fomentara la actividad microbiana pues esta adquiere un papel importante en acumular nitrógeno y cederlo paulatinamente al suelo, por lo que una sincronización favorecería el uso por parte de los cultivos.

En el caso específico del Altiplano Sud de Bolivia, donde el cultivo de quinua es el más intensivo, este paisaje edáfico es el resultado de procesos volcánicos que originaron serranías, montañas y planicies de la cordilla occidental. Según estudios realizados por FAUTAPO (2007), los suelos de la zona están constituidos por materiales ígneos, pero también se presentan en las partes bajas, procesos fluvio lacustres, los mismos que ocasionaron la formación de terrazas y planicies aluviales. Los suelos de las colinas y serranías, tienen altitudes que llegan hasta los 4200 metros, con presencia de piedras y rocas que dificultan la utilización de maquinaria agrícola, siendo desarrollada la agricultura en forma manual por una gestión para que luego ese suelo se destinara para el pastoreo de llamas y ovejas. Estos suelos son ligeramente ácidos a ligeramente básicos, según el sistema de clasificación de suelos de la Soil Taxonomy, correspondiendo a *Torriorthents* y *Calciorthids*, mientras que los suelos de planicie son clasificados como *Salorthids* e *Psammments* (Fundación AUTAPO, 2008).

Según Mujica et al (2001), la quinua puede desarrollarse en una amplia gama de suelos, desde los arcillosos hasta los arenosos, sin embargo observación en campo y testimonios de los agricultores muestran en el Altiplano Boliviano una preferencia por suelos de textura gruesa (arenosos, franco arenosos o areno francosos) con buen drenaje interno. De hecho, la zona de máxima expansión quinuera que es el altiplano sur, en general presenta suelos de textura gruesa (Miranda, 2012). En la tabla siguiente puede verse la clase textural de dos paisajes (ladera y planicie), en tres condiciones de manejo (parcela con quinua, parcela en descanso o barbecho y una pradera nativa de tola), correspondientes a la comunidad de Irpani típica del Altiplano Sud productor de quinua.

Tabla 0.1. Textura de suelos para dos sitios diferentes: laderas de colinas y planicie Aluvial, correspondientes a la Comunidad de Irpani, ubicada en el Altiplano sud de Bolivia.

Paisaje	Parcela	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural
		%			
Ladera	Cultivo de quinua	62	19	19	Franco arenoso
		59	23	19	Franco arcillo arenoso
		63	20	17	Franco arenoso
	Barbecho	60	21	19	Franco arenoso
		58	21	21	Franco arcillo arenoso
		62	21	17	Franco arenoso
	Pradera de thola	62	21	17	Franco arenoso
		61	21	18	Franco arenoso
		61	21	18	Franco arenoso
	Cultivo de quinua	73	9	18	Franco arenoso
		76	9	15	Franco arenoso
		79	4	17	Franco arenoso
Planicie	Barbecho	79	5	16	Franco arenoso
		79	5	16	Franco arenoso
		79	5	16	Franco arenoso
	Pradera de thola	75	12	13	Franco arenoso
		75	9	16	Franco arenoso
		81	4	15	Franco arenoso

Fuente: Miranda e Inda (2010)

El cultivo de la quinua puede desenvolverse en un amplio rango de pH, desde suelos ácidos hasta muy básicos. En Bolivia, cerca al salar de Uyuni, el cultivo de la quinua puede desarrollarse en suelos que tienen un pH de inclusive 9.

Influencia del Nitrógeno del suelo para el cultivo de quinua

Un aspecto edáfico de importancia, es que la quinua es un cultivo exigente en nitrógeno y calcio pues requiere de estos nutrientes para producir su característico grano con elevado contenido de proteína (14 a 16%) de alta calidad. Por ello, a continuación se describirán las características de la dinámica del nitrógeno en el suelo, pues estas determinan en gran parte la productividad de los suelos cultivados con quinua ya que en general, el contenido de Ca, P y K, no son limitantes de magnitud en suelos altiplánicos.

En general, el nitrógeno es el elemento más dinámico y el más intensamente estudiado por los investigadores (Manejo Biodinámico do Solo, 2008). Esto se debe a los siguientes aspectos:

- a. el nitrógeno es uno de los nutrientes esenciales para todos los organismos de la tierra, ya que es parte de las proteínas, y toda enzima es una proteína;
- b. de todos los nutrientes esenciales, ninguno se presenta en tantas formas diferentes (Tabla 3.2.) y las transformaciones entre esas diferentes formas dependen mayormente de la presencia de microorganismos en el suelo;
- c. el nitrógeno es el nutriente que más frecuentemente limita el crecimiento de las plantas en ecosistemas terrestres, siendo que la capacidad productiva del ecosistema es regulada por la velocidad con la que los micro organismos transforman el nitrógeno en formas de nitrógeno utilizables por las plantas;
- d. algunas formas de nitrógeno son contaminantes y por tanto, las transformaciones microbianas del Nitrógeno en el suelo también pueden causar perjuicios a la salud y a la cualidad del ambiente como aquellos que incrementan las concentraciones de nitratos en las aguas freáticas, además de la emisión a la atmosfera de óxidos de nitrógeno, tales como el óxido nitroso y el óxido nítrico (N_2O , NO) que afectan a la salud de la atmósfera.

Tabla 0.2. Diferentes formas de nitrógeno en función de su estado de oxidación.

Nombre	Formula química	Estado de Oxidación
Nitrato	NO_3	+5
Dióxido de nitrógeno	NO_2	+4
Nitrito	NO_2	+3
Óxido nítrico	NO	+2
Óxido nitroso	N_2O	+1
Nitrógeno elemental	N_2	0
Amoniaco	NH_3	-3
Amonio	NH_4	-4
N orgánico	RNH_3	-3

En zonas áridas y semi-áridas como el Altiplano Boliviano, el contenido de nitrógeno total en el suelo varía de 0.01 a 0.09 % (un ejemplo de suelos del Altiplano Sud se presenta en la Tabla 3.3). De este total, el nitrógeno orgánico se encuentra en un 95 a 98% y el nitrógeno mineral, que es el utilizable por las plantas se halla sólo entre un 2 a 5%. Entonces, el contenido de nitrógeno mineral en el suelo por hectárea sería de alrededor de 25 a 40 kg, asumiendo una profundidad de 10 cm con una densidad aparente de 1.7 gr cm^{-3} . Cabe mencionar que la dinámica de este nutriente en el suelo es altamente dependiente de condiciones ambientales como la humedad, temperatura, textura del suelo, manejo y población de micro organismos.

Tabla 0.3. Características químicas de suelos en el área intersalar de Uyuni.

Rango	pH	MO	C	N	C/N	P	Na	K inter	Ca	Mg
		%				mgkg-1		cmol(+)kg-1		
Media	7.39	2.64	1.53	0.07	29.56	12.51	1.16	0.83	14.22	1.7
Minima	5.9	1.15	0.67	0.02	3.92	3.11	0.06	0.2	1.69	0.43
Maxima	8.4	8.65	5.02	0.22	100	31.07	14.71	2.96	72.6	7

Fuente: Fundación AUTAPO (2008)

En la mayor parte de las zonas productoras de quinua, el manejo de los agricultores es deficiente en el aspecto nutricional del cultivo, especialmente de Nitrógeno, al no realizar un abonamiento orgánico específico para el cultivo. Tapia y Fries (2007) mencionan que, en la práctica, los campesinos inducen que el cultivo de quinua aproveche los nutrientes aplicados al cultivo anterior que es generalmente papa o finalmente que el cultivo empobrezca el suelo en el que está siendo cultivado pues es un cultivo muy demandante de Nitrógeno(Mamani, 2011).

En los cultivos orgánicos se utilizan insumos externos en forma de abonos orgánicos en los que se utilizan entre 3 a 5 Tn/ha de estiércol de ovejas o 5-7Tn/ha de estiércol de llamas o vicuñas (PROINPA, 2004, mencionado por Medrano, 2010). Además la dosis puede variar entre 4 a 10 Tn/ha, según la forma de aplicación, por hoyos, surcos y voleo. Sin embargo, el uso de abono orgánico en la producción de quinua aún es moderado(Medrano, 2010), siendo fuertemente limitado por la poca disponibilidad de estiércol en la zona.

Mamani (2011), hizo un análisis exhaustivo de la extracción y contenido de Nitrógeno en los órganos y grano del cultivo de quinua, en una parcela del altiplano Central con suelos franco arenoso. Sus resultados muestran que para el tipo de suelos con tendencia arenosa con un contenido típico promedio de 0.04 % de N, las dosis de fertilización de alrededor de 15 Tn/ha de estiércol que contenga alrededor de 1.2 % de N total y 0.4 % estimado de Nitrógeno mineralizado (disponible), producirán un promedio de 1800 Kg grano/Ha siendo las dosis que mejor Eficiencia de Uso de Nitrógeno presentan. También Mamani (2011) y Miranda et al., (2013), sugieren que el cultivo de quinua requiere una disponibilidad de alrededor de 20 Kg de N disponible en el suelo por tonelada de grano que desee ser producida. Para obtener estos resultados, los autores realizaron un análisis pormenorizado del balance de Nitrógeno disponible en un suelo franco arenoso del Altiplano Central Oeste de Bolivia (Tabla 3.4.) lo que confirmaron en resultados posteriores.

Los resultados de arriba dan una indicación sobre las mejores dosis de aplicación de estiércol maduro al cultivo de la quinua, que se encuentran alrededor de 15 Tn/ha, las cuales producirán un uso muy eficiente de los nutrientes, especialmente el N que se aporta al suelo. En el caso de no aplicar estiércol, los rendimientos se verán fuertemente afectados reduciéndose hasta solo una tercera parte, pero más importante aún, empobrecerán fuertemente el suelo, dejándolo con muy poca cantidad de nitrógeno disponible para futuros cultivos. En el caso de aplicar un exceso de fertilizante, el cultivo en muchos casos no puede aprovechar adecuadamente la cantidad aplicada, fundamentalmente por limitaciones intrínsecas del ambiente donde se desarrolla (limitaciones térmicas y/o de otros nutrientes), y los rendimientos no justifican la inversión efectuada. En este último caso, el suelo se queda enriquecido con N que podría ser usado en el siguiente ciclo de cultivo, aunque el riesgo de

volatilización directa es muy alto, por lo que esta estrategia de fertilización no es aconsejable para los suelos del altiplano que son relativamente pobres no solo en N pero también en otros nutrientes limitantes.

Tabla 0.4. Balance de Nitrógeno total y disponible suelo - planta (kg/ha), para la cosecha de toda la planta (exceptuando el sistema radicular), bajo la incorporación de diferentes niveles de estiércol en un campo del Altiplano Central Oeste Boliviano para la producción de 1800 Kg/Ha de grano de quinua (Mamani, 2011)

Factores	Nitrógeno total			Nitrógeno disponible		
	Tratamiento: Estiércol Tn/ha					
	0	15	30	0	15	30
Nitrógeno del suelo (kg*ha ⁻¹)						
Suelo*		1088			24,48	
INGRESOS (N kg*ha ⁻¹)						
Estiércol**	0	99,48	198,96	-	33,62	67,25
Semilla***		0,17			0,17	
SALIDAS (N kg*ha ⁻¹)						
Grano	7,88	31,89	23	7,88	31,89	23
Hoja	0,07	0,67	0,43	0,07	0,67	0,43
Tallo	1,01	4,22	4,10	1,01	4,22	4,10
Jipi	1,95	4,29	3,94	1,95	4,29	3,94
BALANCE	1077,26	1146,58	1255,66	13,74	17,20	60,43
Rendimiento (kg*ha ⁻¹)				622	1815	1322

*Densidad aparente 1320 kg/m³; Profundidad de 0,20 m; %N 0,04; Nitrógeno disponible del suelo 2,25%

**%M.S. 54,36; %N 1,22; 0,4% nitrógeno liberado del estiércol (6 meses).

*** %M.S. 92; %N 2,024; Densidad de siembra 9 kg/ha.

3.3. Humedad del suelo

El agua es el constituyente más abundante en los tejidos vegetales vivos. Especies como la lechuga, y zanahoria pueden contener de 85 a 95% de agua, mientras que las maderas presentan generalmente un bajo contenido de agua; las semillas, a su vez, presentan contenidos de agua de 5 a 15% y están entre los órganos vegetales más deshidratados, necesitando absorber una considerable cantidad de agua para el proceso de germinación (Carlesso y Zimmermann, 2005).

La absorción de agua por las raíces constituye un medio para el transporte de minerales disueltos en la solución del suelo, hasta la superficie radicular y la evapotranspiración favorece el desarrollo de diferencias de potenciales para la absorción de nutrientes. Por tanto entre los factores biofísicos, el agua es el principal factor que determina la eficiencia nutricional y consecuentemente la productividad de los cultivos. Se ha reportado que en general los cultivos, en su mayoría son más sensibles a las deficiencias hídricas en el periodo de la semana que precede a la floración (Fageria, 1998, Geerts, 2008).

El agua es absorbida por las raíces a partir de la solución del suelo y transportada pasivamente para la parte aérea a través del flujo de masa en el xilema. Más del 90% de esta agua absorbida es perdida por la planta a través de la transpiración que ocurre en la hojas, principalmente en los estomas. Un suelo bien manejado es aquel en el que ocurre una adecuada infiltración de agua de lluvia y/o de riego, es decir que el suelo tenga la capacidad de permitir el paso del agua, al mismo tiempo de retenerla. El mejorar esa condición física del suelo depende básicamente de la adecuada utilización de maquinaria agrícola, mantenimiento de la cobertura y la adición constante de enmiendas orgánicas.

Se debe diferenciar la cantidad de agua que existe en el suelo, de la disponibilidad de agua para la planta. La cantidad de agua en el suelo puede determinarse a través de diferentes métodos como el gravimétrico, que consiste en sacar muestras de suelos alterados, determinar la masa húmeda y posteriormente su masa seca en estufa luego de haber sido sometida por 48 horas a una temperatura de 100 grados centígrados. Esta humedad es transformada en términos de humedad volumétrica multiplicando el valor de la humedad gravimétrica por la densidad aparente del suelo. Asimismo el contenido de humedad volumétrica puede ser expresado en términos de *lámina de agua* conociendo la profundidad o espesor del suelo y finalmente también puede expresado en términos de *volumen*. Las siguientes expresiones muestran estas relaciones:

$$Hg = \frac{\text{masa de suelo húmedo} - \text{masa de suelo seco}}{\text{masa de suelo seco}} * 100$$

$$Hv = \frac{Hg * Dap}{Dag}$$

$$L = \frac{Hv}{100} \times \text{prof}$$

Dónde: Hg es la humedad gravimétrica (%); Hv es la humedad volumétrica (%); Dap es la densidad aparente (gr/cm³); Dag es la densidad del agua (gr/cm³); L es la lámina de agua en mm, cm o m; prof. es la profundidad del suelo en mm, cm o m.

La disponibilidad del agua para las plantas no está relacionada en forma directa con la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo ni con su contenido. El almacenamiento depende de factores como la porosidad y la profundidad del suelo y no depende de la planta, mientras que la disponibilidad de agua para las plantas depende de factores internos como la capacidad de las plantas de extraer el agua bajo los diferentes contenidos de humedad y niveles de retención. El conocimiento de estos aspectos es importante para el manejo del agua en la agricultura bajo riego. En la agricultura sin riego, el aspecto más importante está asociado a la época de siembra con el periodo de mayor disponibilidad hídrica para los cultivos, además de la utilización de variedades tolerantes o resistentes a cortos periodos de deficiencia hídrica en el suelo, como es el caso de la quinua. Aunque la quinua es un cultivo eficiente en el uso del agua y el rendimiento depende de las condiciones de clima y manejo lo que influye en la distribución y profundidad radicular, su cultivo ha demostrado responder con eficiencia a la aplicación de reducidas pero oportunas aplicaciones de agua como riego (Geerts 2008, Huanca, 2008, Condori, 2007).

3.4. Sistemas de manejo de suelo y abonos orgánicos

Los sistemas de manejo de suelos y sistemas de cultivo influyen acentuadamente en la dinámica de los nutrientes y por tanto en el crecimiento y desarrollo de la planta. Por ejemplo, hasta recientemente, en el Altiplano Sur, la quinua era cultivada en las laderas de las colinas, bajo un sistema de rotación. La demanda internacional del producto, hizo que la superficie cultivada haya sido incrementada, aunque no así los rendimientos que permanecieron entre 600 a 700 kg*ha⁻¹, e incluso para 1992 declinaron hasta 470 kg*ha⁻¹ (Terceros, 1997). La Fundación Altiplano en un estudio de la Cadena Productiva de la quinua reportó que el año 1980 el área cultivada en el Altiplano Sur Boliviano, era de 10850 hectáreas, incrementándose para 20685 hectáreas para el año 2001 (FAUTAPO, 2008) y hasta casi 40.000 Ha en 2013. A partir de la demanda por el grano, la producción se desplazó a las zonas bajas de los sistemas productivos que presentan topografía plana a ligeramente ondulada.

El manejo de suelos en laderas se realiza en forma manual, debido a la presencia de piedras que abundan en la superficie que limitan el uso de implementos agrícolas. La superficie preparada, está en función de la disponibilidad de mano de obra, por tanto el área varía entre 0.4 a 1 ha. Este manejo se parece a lo que en otros países se denomina el plantío directo o siembra directa, sin la remoción del suelo. Para la siembra, se realiza la apertura de hoyos de aproximadamente 10 cm de diámetro y 10 a 15 cm de profundidad y para proteger al cultivo de plagas, el hoyo es cubierto con paja brava (*Festuca dolichophylla*) y/o ramas de thola (*Parestrephya lepidophylla*) las cuales también sirven para proteger la semilla y al suelo de la evaporación directa. Con la finalidad de evitar la competencia por nutrientes del suelo, agua y luz, las plantas nativas como pasto bandera (*Bouteloua simplex*), y otras que crecen en el lugar son removidas y dejadas en el mismo sitio, de tal manera que los nutrientes de estas plantas se queden o reciclen en el mismo sitio. En este sistema de manejo la productividad es mayor en relación a la producción en planicie. Inda (2010) encontró un rendimiento de 1617 kg ha⁻¹ en laderas de la comunidad de Irpani en Salinas de Mendoza y de 970 kg ha⁻¹ en las planicies de la misma comunidad.

En forma diferente, en las zonas bajas o planicies del Altiplano Sur, la preparación del terreno es realizada un año antes, con la remoción de la vegetación nativa, la misma se deja sobre la superficie, para que se vaya descomponiendo. En el mes de febrero – marzo anterior a la siembra, se realiza una nueva remoción y es común la incorporación de estiércol en cantidades de 4 a 6 Tn ha⁻¹ (400 a 600 gr m⁻²), aunque estas cantidades dependen del acceso que tenga el productor al estiércol o de la cantidad de superficie que habilite. Una vez que se cosecha el cultivo, la parcela es abandonada, quedando susceptible a la erosión eólica e inclusive hídrica, ya que las precipitaciones en los meses de enero y/o febrero pueden ser intensas, de hasta 40 mm en un solo evento (Huanca, 2008) y en la época seca, los vientos alcanzan velocidades erosivas que actúan fácilmente en suelos descubiertos.

En el Altiplano Central Norte de Bolivia, el sistema productivo se realiza en forma similar al de planicie, previamente descrito, aunque la diferencia se encuentra en que la vegetación local es más abundante y se regenera más rápidamente con lo que reduce aunque no desaparece el riesgo de erosión.

Bajo el sistema de surcos típico de las planicies, la aplicación de estiércol al suelo se realiza en periodos cercanos a la época de siembra y por acumulación sobre la superficie en diferentes cantidades que luego de una o dos semanas aproximadamente son esparcidas para

ser incorporadas al suelo con un tractor. Tomando en cuenta que la aplicación se hace durante el día cuando las temperaturas llegan hasta 19 grados con el pH del estiércol básico (pH: 7.7), es posible señalar que habrá una fácil volatilización del nitrógeno en forma de NH_3 , disminuyendo la efectividad del estiércol y su contenido total para su posterior uso por parte de la planta. Por otro lado, dado que los suelos son de textura gruesa a franca y la remoción del suelo aumenta la porosidad, entonces se facilitan las condiciones para que el nitrógeno orgánico del estiércol se mineralice con relativa rapidez, en función de la cantidad de agua y microorganismos presentes en el suelo. Por lo anterior, si la aplicación de estiércol es muy cercana a la época de siembra, es posible que la tasa de mineralización o liberación de nutrientes no coincida con los requerimientos de este nutriente por la planta, ya que si hubiera restos de vegetación en el suelo, los microorganismos tendrán abundante carbono para desarrollarse ($\text{C/N} > 80$ en estos materiales), y por tanto tomaran el nitrógeno del suelo, inmovilizándolo en forma temporal.

Por las características mencionadas a lo largo de este capítulo, el manejo del fertilizante, especialmente orgánico en combinación con una estrategia de aplicación de agua complementaria es de extrema importancia en el objetivo común de hacer de la quinua un cultivo sostenible y productivo en el tiempo.

Capítulo 4

MANEJO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO PARA EL CULTIVO DE QUINUA

El manejo del abonamiento es un conjunto de prácticas y acciones planificadas y aplicadas de forma organizada, con la finalidad de disponer eficiente y económicamente del uso de los abonos orgánicos y/o químicos. El manejo de abonos consiste en efectuar un conjunto de decisiones que implica necesariamente la definición de las dosis y de las fuentes de nutrientes a ser utilizadas, así como las épocas y las formas de aplicación de estos insumos al suelo, tratando de obtener la mayor eficiencia técnica y económica en relación a las condiciones del suelo y del cultivo en cada región.

El abonamiento o fertilización es la acción de suministrar nutrientes al suelo, por medio de abonos orgánicos o inorgánicos, con el fin de reponer los elementos del suelo extraídos por los cultivos a la vez de incrementar y mantener la fertilidad del suelo y la disponibilidad de los nutrientes para las plantas a ser sembradas en las zonas para que ellas puedan producir en o cerca de su potencial. Este abonamiento puede ser orgánico e inorgánico. El primero consiste en suministrar nutrientes al medio edáfico por medio de materia orgánica, de origen animal o vegetal, como: estiércol, compost, humus de lombriz, residuos vegetales, etc., mientras que la fertilización inorgánica consiste en suministrar los nutrientes por medio de la aplicación de productos químicos producidos especialmente para este fin.

Los fertilizantes orgánicos tienen las siguientes ventajas:

- Permiten aprovechar residuos orgánicos
- Recuperan la materia orgánica del suelo y permiten la fijación de carbono en el suelo, así como mejora su capacidad de absorber agua pues mejoran su estructura física
- Suelen necesitar menos energía para su elaboración, se producen localmente y en general son disponibles con relativa facilidad

Pero también tienen algunas desventajas:

- Pueden ser fuentes de patógenos si no están adecuadamente tratados.

- Puede no existir una adecuada sincronización entre la liberación de nutrientes y el momento de necesidad de la planta, pues requieren de complejos procesos de mineralización que dependen del ambiente donde se aplican

Los fertilizantes inorgánicos no presentan los problemas previamente mencionados pero presentan las siguientes desventajas si no son usados de forma adecuada:

- Fácilmente provocan contaminación y eutrofización de los acuíferos
- Degradan la vida del suelo y matan microorganismos que ponen nutrientes a disposición de las plantas
- Necesitan más energía para su fabricación y transporte por lo que son costosos
- Generan dependencia del agricultor hacia el suministrador del fertilizante

Actualmente el consumo de fertilizantes orgánicos está aumentando debido a la demanda de alimentos orgánicos y sanos para el consumo humano, y la concienciación en el cuidado del ecosistema y del medio ambiente. En el caso específico del cultivo de quinua, la preferencia general es trabajar con abonamiento orgánico, por lo que el presente manual abordará principalmente este tipo de fertilización. Sin embargo las dosis aquí presentadas pueden fácilmente ser extrapoladas para su trabajo con fertilizantes químicos. El concepto es proponer un programa sólido de manejo de la fertilidad del suelo con el objetivo de mantener e incrementar la producción de la quinua en cantidad y calidad, proponiendo el uso adecuado de la fertilización mineral y/o orgánica tanto en tiempo como en cantidad.

4.1. Respuesta del cultivo de la quinua al abonamiento

Diversos autores señalan que este cultivo se desarrolla adecuadamente en suelos francos con buen drenaje, siendo altamente exigente en nitrógeno y calcio (Miranda, 2012; Mujica 2004). Su requerimiento de fósforo es moderado y poco exigente en potasio, aunque cabe señalar que hasta el momento no se cuenta con investigación detallada sobre los requerimientos nutricionales de este nutriente para una adecuada productividad; adicionalmente los suelos altiplano andinos contienen una relativamente elevada cantidad de potasio por lo que este no se considera en los programas de fertilización.

Trabajos de fertilización de quinua en Oruro, Bolivia, se obtuvieron rendimientos de 2847 kg ha⁻¹ con aplicaciones de abonamiento químico de 120 kg de nitrógeno siendo el rendimiento de 407 kg ha⁻¹, cuando no se aplicó fertilizante alguno. Según Arce (1997), citado en FAUTAPO (2008), para obtener un rendimiento de 2566 kg ha⁻¹, la quinua necesita de 283 kg de nitrógeno, 48 kg ha⁻¹ de fósforo y 598 kg ha⁻¹ de potasio, sin embargo estos números parecen elevados siendo que la mayor parte de los autores coinciden que la dosis adecuada para producir rendimientos de alrededor de 3000 kg ha⁻¹ se encuentran en alrededor de 120 Kg de N por Ha. Shulte et al (2005) encontraron rendimientos de 3500 kg ha⁻¹ cuando aplicaron al suelo una dosis de 120 kg ha⁻¹ de Nitrógeno. Finalmente Miranda (2012), determinó que la quinua extrae del suelo entre 45 a 50 kg de nitrógeno para la producción de aproximadamente 1800 kg de grano. Es decir para producir el grano de elevada calidad proteica que le caracteriza, el cultivo requiere de un buen aporte de Nitrógeno que ronda en promedio los 35 Kg por cada 1000 Kg de grano.

4.2. Relación aprovechamiento de Nitrógeno y humedad del suelo

A pesar de que la aplicación de riego no es rutinaria en el cultivo de la quinua, diversos autores han demostrado recientemente la elevada importancia de aplicarlo en etapas claves y sensibles del cultivo, específicamente la germinación y la floración. Además se demostró que la aplicación de Nitrógeno incrementa su eficiencia si además se cuenta con agua para facilitar su absorción incluso si esta aplicación llega solo a niveles de riego deficitario. Así De Latorre-Herrera (2003) en Chile encontró rendimientos de hasta 5000 kg ha^{-1} , cuando combinaron la fertilización nitrogenada con riego por goteo. Geerts et al., (2008) mostraron que en condiciones del Altiplano Central, la aplicación de diferentes dosis de N, hasta 10 tn/ha , no produjo ninguna diferencia en el rendimiento cuando el cultivo se desarrolló principalmente a secano (solo riego a la siembra). Sin embargo, la aplicación de riego deficitario en dos ocasiones produjo que el rendimiento se duplique bajo las mismas dosis de abono. Por otra parte Suazo (2013) en un experimento en macetas con condiciones controladas obtuvo diferencias significativas ($P>0,05$) para la interacción abono por humedad que demostró que al aplicar un nivel alto de abono (30 Tn ha^{-1}) con reducida cantidad de agua en el suelo (30%CC) la actividad de los microorganismos y de la mineralización de nitrógeno será menor que con un nivel menor de abono (10 Tn ha^{-1}) pero con mayor disponibilidad de agua (50%CC). Estos resultados muestran que la aplicación de abono o fertilizante debe obligatoriamente ser acompañada de una adecuada provisión de agua al suelo que permita la actividad microbiana, la mineralización y la utilización del nitrógeno aplicado. Lo contrario significará, en muchos casos, una pérdida de recursos valiosos ya sea en mano de obra, dinero o uso de abono que no producirá los resultados esperados, perderá N a la atmósfera por volatilización o, en el mejor de los casos, se mantendrá en el suelo para el uso del cultivo de la siguiente gestión agrícola.

El mejor momento de la aplicación de abono orgánico también fue explorado por investigadores en quinua. Cuando se comparó la eficiencia de uso de nitrógeno que fue aplicado como abono orgánico en tres épocas antes de la siembra (Marzo, Junio y Septiembre antes de la siembra de Octubre) se estableció que la mayor productividad del grano de quinua, fue obtenida cuando se aplicó al suelo el estiércol en el mes de julio ($1500 \text{ kg de grano ha}^{-1}$), 4 meses antes de la siembra, mientras que el menor rendimiento se produjo en el tratamiento en el que se aplicó el estiércol en el mes de septiembre, un mes antes de la siembra del cultivo de la quinua (Miranda et al., 2011). Los mismos autores encontraron los mejores rendimientos cuando aplicaron antes de la siembra N que había pasado una etapa de compostaje por lo que el nivel de mineralización de N era muy alto y reemplazó al tiempo de descomposición en campo.

Siguiendo los resultados previos, bajo los mismos niveles de abonamiento, la aplicación de una lámina de alrededor de 60 mm en la etapa de floración y grano lechoso, incrementó el rendimiento en un 45 % con respecto al tratamiento al que no se aplicó riego suplementario confirmando los resultados antes encontrados. Adicionalmente, el rendimiento de quinua respondió adecuadamente a la aplicación de 15 t ha^{-1} de estiércol bajo riego deficitario, llegando a $1500 \text{ kg de grano ha}^{-1}$, no habiendo diferencia con la aplicación de 30 t ha^{-1} de estiércol. Las diferentes condiciones de manejo, no incidieron en el porcentaje de nitrógeno acumulado en el grano que se encontró entre 1.7 a 1.8%. La eficiencia de uso del nitrógeno en

la quinua fue de 50 a 55 kg de grano por cada kg de nitrógeno acumulado en el grano, presentándose diferencias, ante las aplicaciones de abono orgánico dentro de los tratamientos con riego, pues aquellos sin riego mostraron eficiencias más reducidas.

Dados estos datos y antecedentes es posible deducir que para una buena productividad de la quinuarelacionada con la eficiencia del uso del Nitrógeno aportado como abono, se hace necesario contar con una suficiente humedad en el suelo. Esta humedad garantizará que la inversión realizada al aplicar abono orgánico se justifique, haciendo al mismo tiempo que el cultivo se desarrolle adecuadamente en respuesta a la suficiente humedad en el suelo especialmente durante los periodos de siembra, germinación y floración. Esto es crítico considerando la reducida precipitación durante el periodo de siembra y la elevada probabilidad de enfrentar periodos secos en etapas cercanas a la floración tal cual fue mostrado en el Capítulo 2. Adicionalmente bajo las condiciones futuras previstas de la zona, esta probabilidad podría incrementarse, razón que intensifica aún más la necesidad de optimizar el uso de agua combinada con una adecuada provisión de nutrientes, pues en el futuro, la inadecuada provisión de uno de estos factores reducirá fuertemente la eficiencia del otro, provocando un malgasto de recursos escasos.

Por lo mencionado, el manejo de suelos deberá tomar en cuenta el manejo de los fertilizantes y del agua en el suelo, por lo cual es importante planificar la aplicación de riego (deficitario) especialmente en el Altiplano Central y Sur pues son las áreas de máxima producción de quinua y donde la probabilidad de enfrentar periodos sin lluvia durante los periodos más sensibles a la falta de agua por parte de la quinua, son elevadas. Esto debe ir combinado con un adecuado cronograma de aplicación de estiércol en función de sus tasas y tiempos de mineralización. Como se mencionó en Capítulos anteriores y de acuerdo a resultados encontrados por el proyecto QuinAgua y otros (Mamani, 2011; Borda, 2011; Miranda, 2012; Miranda et al., 2013), bajo la climatología actual y prevista del Altiplano Boliviano, la Máxima Eficiencia Técnica de la producción de quinua se alcanza con una dosis incorporada anticipadamente de 15 Tn/Ha de estiércol de oveja y complementadas con agua garantizada en el periodo de la siembra (para garantizar la germinación) y los periodos de floración de las plantas.

4.3. Etapas para diseñar un sistema de recomendación de abonamiento

Con la finalidad de realizar un manejo de la fertilidad del suelo, se hace necesario contar con información referida a la calidad del suelo y las exigencias del cultivo y para ello se deben realizar las siguientes etapas.

4.3.1. Análisis de suelos

El análisis de suelos es una herramienta de gran utilidad para diagnosticar problemas nutricionales y establecer recomendaciones de fertilización. Entre sus ventajas se destaca por ser un método rápido y de bajo costo, que le permite ser utilizado ampliamente por agricultores y empresas. La interpretación de los análisis se basa en estudios de correlación y calibración con la respuesta de las plantas a la aplicación de una cantidad dada del nutriente. El análisis de suelos está basado en la teoría de que existe un “nivel crítico” en relación al

procedimiento analítico utilizado y a la respuesta del cultivo cuando se aplica un determinado nutriente. Cuando el nivel de un nutriente se encuentra debajo o por encima del nivel crítico, el crecimiento de la planta se verá afectado en forma negativa o positivamente según dicha concentración.

Cuando una producción de quinua desea ser llevada adelante, surgen las preguntas de si se necesita abonar y cuanto de abono se debe aplicary en qué época. Por ello, aunque los suelos del Altiplano son generalmente pobres, es importante dar luces sobre la metodología genérica que debe considerarse cuando se planifica un sistema de abonamiento de quinua. En cualquier caso, este abonamiento debe estar integrado al sistema de riego deficitario propuesto en el Capítulo 2 para garantizar el adecuado uso de los nutrientes.

Con el análisis de suelos se pretende determinar el grado de suficiencia o deficiencia de los nutrientes del suelo, así como las condiciones adversas que pueden perjudicar a los cultivos, tales como la salinidad y/o toxicidad de algunos elementos. El análisis de suelo permite determinar el grado de fertilidad del suelo. El grado de potencial productivo de un suelo está determinado por sus características químicas y físicas. El análisis de suelos cumple dos funciones básicas: a) indica los niveles nutricionales en el suelo y por lo tanto es útil para desarrollar un programa de fertilización y b) sirve para monitorear en forma regular los cambios en la fertilidad del suelo que ocurren como consecuencia de la explotación agrícola y los efectos residuales de la aplicación de fertilizantes.

Antes de diseñar un programa de abonamiento de suelos, es necesario realizar una serie de procedimientos, los mismos se detallan a continuación:

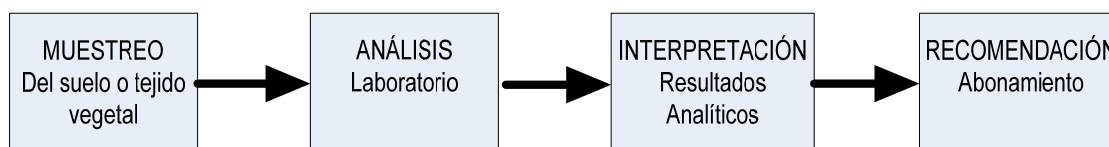


Figura No. 0.1. Etapas para el diseño de recomendaciones de abonamiento

4.3.2. Muestreo de suelos

El muestreo de suelos, es la primera y principal etapa en un programa de evaluación de la fertilidad del suelo, pues en base a las características físicas y químicas del suelo encontradas se definen las dosis de abonamiento orgánico o inorgánico, siempre y cuando se considere que habrá la suficiente cantidad de agua en el suelo que asegure el flujo de los nutrientes hacia la planta. Se debe acordar que el análisis del suelo no corrige errores cometidos en el muestreo por lo que este tiene particular importancia. Para realizar un muestreo adecuado deben seguirse los siguientes pasos:

4.3.2.1. Selección del área a ser muestreada

El área a ser muestreada debe presentar uniformidad considerando las siguientes características del suelo: posición fisiográfica, cobertura vegetal o cultivo, textura, drenaje y

la historia del área. En la colecta de muestras de suelo para análisis químico se trabajan con dos tipos de muestras: la muestra simple, que es la porción de tierra colectada en cada punto del terreno: y, la muestra compuesta, que es una mezcla homogénea de varias muestras simples, de la cual se toman entre 500 y 1000 gramos para enviarlas al laboratorio. La figura 5.1 muestra un ejemplo de delimitación de áreas en función a la forma del paisaje y otros atributos.

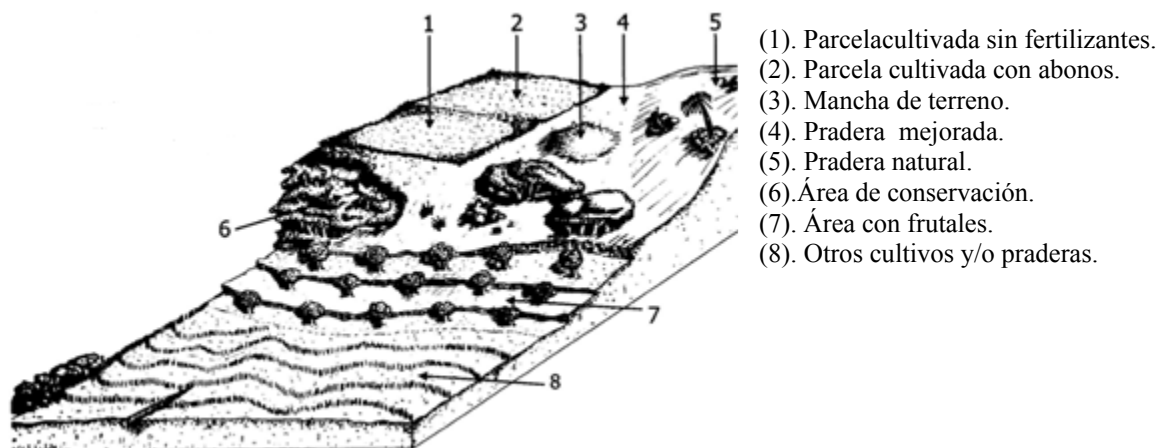


Figura No. 0.2. Delimitación de áreas de muestreo de suelo en función al paisaje y otros atributos como relieve, pendiente, uso del suelo, etc. (Manual de adubação e de calagem, 2004).

4.3.2.2. Época de muestreo

El muestreo puede ser realizado en cualquier época del año, pero se debe considerar el tiempo para que la muestra llegue al laboratorio, el procesamiento analítico y la remisión de los resultados, por lo que como mínimo se aconseja que en general el muestreo sea realizado 90 días antes de la instalación del cultivo siguiente, para dar tiempo a la aplicación de correctivos y/o enmiendas si fueren necesarias. Este indicativo debería ser incluso mayor en el Altiplano donde las bajas temperaturas incrementan el tiempo de mineralización de los nutrientes y por tanto se requiere aplicar el abono, con por lo menos 90 a 120 días de anticipación.

4.3.2.3. Número de muestras simples y profundidad de muestreo

Para representar un área uniforme, se debe colectar como mínimo 20 muestras simples para formar una muestra compuesta de un área no mayor a 10 hectáreas. Si la propiedad es muy grande, se deben muestrear parcelas que representen situaciones homogéneas. Para tomar muestras compuestas de una superficie de 4000 a 10000 m², el número de muestras debe ser entre 6 y 10 muestras simples. Normalmente las muestras deben ser colectadas a una profundidad de 0 a 20 centímetros para la mayoría de los cultivos anuales y perennes, salvo que sean especies forestales.

4.3.2.4. Material necesario para el muestreo

Para la toma de muestras de suelo se debe utilizar los siguientes materiales: Un implemento adecuado para el muestreo. Los más comunes son: el taladro o barreno de suelo, más adecuado para suelos arenosos y húmedos: el tubo de muestreo, ideal para el muestreo de tierras blandas y ligeramente húmedas: la sonda de muestreo, utilizadas para todo tipo de suelos, el barreno del cilindro cerrado, que es adecuado para suelos secos y compactados: y la pala recta, implemento más disponibles y simples para el agricultor (Figura 4.3).

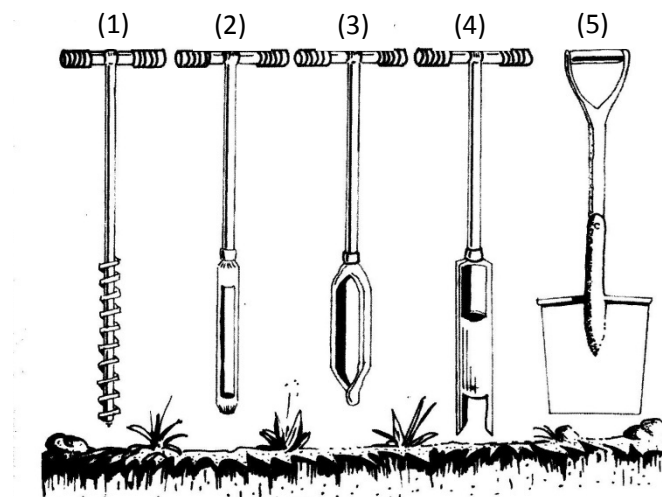


Figura No. 0.3. Diferentes materiales para realizar un muestreo de suelos. (1). Barreno de rosca; (2) barreno calador; (3) barreno holandés; (4) barreno cilíndrico; (5) pala de corte.

Es importante considerar que no se deben retirar muestras simples próximas a casas, cárcavas, árboles, surcos de erosión, hormigueros, caminos, etc. Nunca colocar las muestras compuestas en recipientes usados o sucios, como bolsas de leche, bolsas de fertilizantes, de cal, de cemento, embalajes de defensivos, etc.

4.3.3. Análisis de laboratorio

El análisis de suelo es el principal medio para el diagnóstico de las necesidades de abonamiento para la mayoría de los cultivos, principalmente las de ciclo anual por lo que debe ser realizado preferentemente en laboratorios especializados.

Los parámetros físicos y químicos a ser analizados dependen del tipo de trabajo que se pretenda realizar, los parámetros convencionales que son realizados son: textura (% de arena, limo y arcilla); pH en agua y cloruro de potasio (relación suelo agua 1:5); Conductividad eléctrica en mm cm^{-1} o mS cm^{-1} , (relación suelo agua 1:5); cationes de cambio Ca, Mg, K, Na ($\text{Cmol}(+) \text{ kg suelo}^{-1}$); Capacidad de Intercambio de cationes ($\text{Cmol}(+) \text{ kg suelo}^{-1}$); Materia Orgánica (%); Nitrógeno total (%); fósforo asimilable (ppm). En la Tabla 4.1 se presenta el análisis de un suelo de una zona cercana a la ciudad de La Paz, Bolivia.

Los métodos empleados para estos análisis son: para la textura, el método de Bouyucos o llamando también del densímetro; pH y la Conductividad eléctrica a través del uso de un pH-metro y conductivímetro; la materia orgánica es determinada por combustión húmeda o Wakley Black; el nitrógeno total por el método de Kjeldahl; el fósforo es extraído por el método de Olsen, mientras que el potasio se extrae por el método de Peach – extractor. Los procedimientos detallados para este tipo de análisis no son descritos en este manual pues van más allá de sus objetivos.

4.3.4. Interpretación de los resultados de laboratorio

La interpretación de los análisis de suelos se hace utilizando tablas de fertilidad que contienen los valores de referencia de los nutrientes con base en el concepto de nivel crítico. El diseño de estas tablas se realiza con información derivada de investigaciones de invernadero y campo en calibración y correlación de análisis de suelos, y con la experiencia acumulada por laboratorios y especialistas en el tema. Estas tablas usualmente clasifican los contenidos de nutrientes en varias categorías: bajo o deficiente, medio o suficiente, óptimo o adecuado, y alto o excesivo. En el presente manual se presentan las tablas utilizadas en Perú, cuyas condiciones podrían asemejarse a las condiciones del Altiplano Boliviano.

Tabla 0.1. Profundidad efectiva de suelo en cm

Profundidad efectiva en cm	Clase
< 15	Efímero
15– 25	Muy superficial
25– 50	Superficial
50– 100	Moderada
100– 150	Profundo
> 150	Muy profundo

Fuente: PIWA (1992)

Tabla 0.2. Valores de la densidad aparente, textura y porosidad.

Textura	Da (gr cm ⁻³)	Porosidad
Arenosa	1.6	40
Franco arenosa	1.5	43
Franco	1.4	47
Franco limosa	1.3	50
Franco arcillosa	1.3	55
Arcillosa	1.1	58

Fuente: Thompson. L. M (1974) en PIWA (1992)

Tabla 0.3. Interpretación de los contenidos de Materia orgánica (Walkey y Black), Nitrógeno total (Kjeldahl), Fosforo disponible (Olsen modificado) y Potasio (Peech)

M.O.*	Nitrógeno**	Fósforo**	Potasio**	Interpretación
	total (N)	(P ₂ O ₅)	(K ₂ O)	
%	%	ppm	Ppm	

< 2	< 0.1	0 – 6	0 – 124	Bajo
2 – 4	0.1 – 0.2	7 – 14	124 – 248	Medio
> 4	>0.2	> 14	> 248	Alto

Fuente: * Lays Salcedo; ** UNA La Molina en PIWA (1992)

La determinación indirecta del contenido de materia orgánica también se puede obtener a partir de la dosis de Nitrógeno que posee el suelo. Así se tiene que:

$$\% \text{ M.O.} = \% \text{ N} \times 20$$

Tabla 0.4. Rangos para la interpretación de la reacción del suelo (pH), por el método del potenciómetro

Rango	Interpretación
< 4.5	Extremadamente ácido
4.5 – 5.0	Muy fuertemente ácido
5.2 – 5.5	Fuertemente ácido
5.6 – 6.0	Moderadamente ácido
6.1 – 6.5	Ligeramente ácido
6.6 – 7.3	Neutro
7.4 – 7.8	Ligeramente alcalino
7.9 – 8.4	Moderadamente alcalino
8.5 – 9.0	Fuertemente alcalino
9.1 – 10.0	Muy fuertemente alcalino
> 10.0	Extremadamente alcalino

Fuente: ONERN en PIWA (1992)

Tabla 0.5. Rangos para la interpretación de la conductividad eléctrica (mmhos cm⁻¹ o mS cm⁻¹)

Rango	PSI	Interpretación
0 – 4	<4	Normal
4 – 8	4 – 8	Ligeramente salino
0 – 16	8 – 15	Salino
8 – 16	>15	Salino sódico
>16	>15	Muy salino sódico
>16	>15	Muy salino

Fuente: Lays Salcedo en PIWA (1992)

Tabla 0.6. Rangos para la interpretación de la presencia de carbonatos en porcentaje. Método del Gasómetro; Saturación de Bases (%) por sumatoria de cationes intercambiables.

PSI*	Saturación de bases** (%)	Interpretación
<1	<35	Bajo
1 – 5	35 – 80	Medio
>5	>80	Alto

Fuente: * UNA La Molina; Lays Salcedo. ** ONERN en PIWA (1992)

Tabla 0.7. Rangos para la interpretación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC en cmol (+) kg⁻¹ de suelo). Método del Acetato de Amonio.

Rango	Interpretación
0 – 5	Muy bajo
5 – 10	Bajo
10 – 15	Medio
15 – 20	Alto
>20	Muy alto

Fuente: PIWA (1992)

4.4. Relaciones catiónicas

Durante la interpretación también se evalúan las relaciones entre los cationes Ca, Mg y K para determinar si existe algún desequilibrio. Para esto se calcula los cocientes de la división matemática de los contenidos en cmol(+)/l de estos elementos. Por lo general el antagonismo principal que se presenta es la relación de Ca y/o Mg con respecto a K.

4.5. Contenido de nitrógeno en el suelo

Los suelos del Altiplano boliviano en general presentan bajos contenidos de materia orgánica (menor a 1%), por lo tanto los contenidos de nitrógeno total también son bajos (menor a 0.1%). En el suelo el nitrógeno puede encontrarse en forma orgánica e inorgánica. A pesar de que es prácticamente no disponible para las plantas, la forma orgánica predomina en el suelo, en los horizontes superficiales, como aminoácidos, proteínas, azúcares y otros compuestos representando el 95 a 98 % del Nitrógeno total, por tanto el nitrógeno mineral disponible para el desarrollo de la planta queda entre 1 a 5% (Rezende y Araujo, 2007). La disponibilidad de nitrógeno para las plantas depende del contenido y de la tasa de mineralización de la materia orgánica (entrada) y de las pérdidas que ocurren en el suelo (salidas). Según Fatecha (1999), la temperatura ideal para conseguir una buena mineralización de 30 °C, con una humedad de suelo entre 50 – 60% de la Capacidad de Campo, el pH alrededor de la neutralidad 5.6 – 7.5, excelente aireación y relación C/N 17/1.

4.6. Contenido de Fósforo

El Fósforo es un elemento de gran importancia en la nutrición de las plantas y con frecuencia presenta limitaciones en la fertilidad de los suelos. El contenido de P disponible en el suelo se expresa en mg/l o ppm, siendo el nivel crítico de 10 mg/l, esto significa, que existe 10 kg de P por cada millón de kg de suelo. Las formas en la que el fósforo es absorbido por las plantas son $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ y HPO_4^{-2} , siendo el primero el más absorbido por el vegetal. El fósforo orgánico provee sitios de baja energía de adsorción contribuyendo a la fracción lábil del P del suelo. En cuanto a su disponibilidad, el pH del suelo, ha sido identificado como el factor más importante en la regulación del fósforo disponible, en general, se considera que la disponibilidad de fósforo es óptima a pH de 6 a 7.

4.7. Contenido de potasio

La disponibilidad de K aumenta cuando aumenta la cantidad de Nitrógeno y Fósforo en el suelo debido al efecto de interacción de los tres nutrientes (Conti y Garcia, 2006). Las plantas absorben potasio de la solución del suelo o del complejo absorbente. El pH del suelo influye también en la retención del potasio. En suelos ácidos es fácilmente lavado, mientras que en suelos neutros o ligeramente alcalinos es retenido por el suelo. Su contenido también depende del material parental el cual en el Altiplanopresenta una relativa abundancia del elemento.

4.8. Relación C/N y la mineralización del nitrógeno

Este factor es de extrema importancia para el manejo de la fertilidad relacionada con la disponibilidad de N, la actividad de microorganismos y la materia orgánica contenida por el suelo. Los restos orgánicos incorporados al suelo aumentan la actividad microbiana que actúan para su descomposición. Estos microorganismos usan el Carbono para la constitución de su propio cuerpo, desprendiendo energía para la respiración y eliminándolo en forma de CO₂. Durante este proceso, el N es momentáneamente inmovilizado como NH₄ y NO₃ por causa del uso por parte de los microorganismos que los hace no aprovechables. Durante esta inmovilización el N soluble pasa a ser insoluble para las plantas por la posición antagónica que posee ante el Carbono hasta que exista la relación ideal que rompa esta posición antagónica. Cuando esta relación (C/N) es superior a 33, se produce la inmovilización (los nutrientes no son solubles, por tanto son no absorbibles), si la relación C/N se encuentra entre 17 a 33 se tiene un equilibrio (nutrientes casi solubles y aun no absorbibles) y cuando la relación se encuentra en un valor inferior a 17 se produce la mineralización (Fatecha, 1999).

4.9. Calculo de nitrógeno, fósforo y potasio disponible en el suelo

El plan de abonamiento que se desee implementar requiere conocer las propiedades químicas presentes en el suelo antes de la aplicación de abonos. Esta información se obtiene de los análisis de suelos y sus resultados, discutidos en párrafos anteriores. La razón para ello está en la necesidad de conocer cuál será la dosis de abonamiento aconsejada conociendo cuánto de nutrientes provee el suelo donde se trabaja. A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de estos parámetros. Según los datos mostrados en la Tabla 3.4 y asumiendo un coeficiente de mineralización del nitrógeno en el suelo de 2.5%, se hace una estimación de la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio que el suelo es capaz de ofertar al cultivo.

Tabla 0.8. Aporte de nutrientes por un suelo de la estación experimental de Patacamaya.

Aporte del suelo	Símbolo	Unidad	Valor
Superficie	S	m ²	10000
Arena	A	%	59
Arcilla	Ar	%	25
Limo	L	%	16
Textura			FYA
Profundidad del suelo	Prof	m	0.15
Densidad del suelo	Dap	gr cm ⁻³	1.3
Nitrógeno total	N	%	0.05
Fósforo asimilable	P	ppm	17.25
Potasio intercambiable	K	meq kg ⁻¹	0.55
Nitrógeno asimilable (1.5 -3 % Nt)	ND	%	2.5
Peso del suelo	PS	kg ha ⁻¹	1950000

$$masa\ suelo = 1300 \frac{kg}{m^3} \times 0,15m \times 10000m^2 = 1950000 \frac{kg}{ha}$$

$$Nitrógeno\ Disponible = 1950000 \frac{kg}{ha} \times \frac{0,05\ kg\ Nt}{100\ kg\ suelo} \times \frac{2,5\ kg\ ND}{100\ kg\ Nt} = 24,3 \frac{kg}{ha}$$

$$Fósforo\ Disponible = 1950000 \frac{kg\ suelo}{ha} \times \frac{17,25\ kg\ P}{1000000\ kg\ suelo} \times \frac{142\ kg\ P_2O_5}{62\ kg\ P} = 77 \frac{kg\ P_2O_5}{ha}$$

$$Potasio\ Disponible = 1950000 \frac{kg\ suelo}{ha} \times \frac{5,5\ meqK}{kg\ suelo} \times \frac{39\ mg\ K}{1\ meq\ K} \times \frac{1\ kg\ K}{10^6\ mg\ K} \times \frac{94\ kg\ K_2O}{78\ kg\ K} = 504 \frac{kg\ K_2O}{ha}$$

Por tanto los aportes de N, P y K por parte del suelo, serían:

Tabla 0.9. Aporte de NPK por el suelo presentado en la Tabla 4.8

Nitrógeno disponible	ND	kg ha ⁻¹	24.3
Fosforo disponible	P ₂ O ₅	kg ha ⁻¹	77.0
Potasio disponible	K ₂ O	kg ha ⁻¹	504.0

Para conocer el aporte de nitrógeno, fósforo y potasio por parte del estiércol, se utilizará como ejemplo los datos de análisis de laboratorio del estiércol de ovino del Altiplano central (Huanca, 2008). Estos cálculos asumen que el estiércol tiene una tasa de mineralización de nitrógeno del 25% y el fosforo del 35% (Arce, CH, 1997 en FAUTAPO, 2008) y también una tasa de aplicación de 12 Tn ha⁻¹.

Tabla 0.10. Aporte de nutrientes por el estiércol, bajo la aplicación de 12 toneladas de estiércol húmedo por Ha

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Nitrógeno total	N	%	0.6
Fosforo	P ₂ O ₅	%	0.25
Potasio	K ₂ O	%	0.9
Estiércol aplicado		kg ha ⁻¹	12000
Materia seca del estiércol	MS	%	96
Mineralización del nitrógeno		%	25
Mineralización del fosforo		%	35

$$EMS = \frac{12000 \text{ kg húmedo}}{\text{ha}} \times \frac{96 \text{ kg M.S.}}{100 \text{ kg húmedo}} = 11520 \frac{\text{kg estiércol M.S.}}{\text{ha}}$$

$$ND = 11520 \frac{\text{kgE}}{\text{ha}} \times \frac{0,6 \text{ kg Nt}}{100 \text{ kgE}} \times \frac{25 \text{ kg ND}}{100 \text{ kg Nt}} = 17,3 \frac{\text{kg ND}}{\text{ha}}$$

$$PD = 11520 \frac{\text{kgE}}{\text{ha}} \times \frac{0,25 \text{ kg P}_2\text{O}_5}{100 \text{ kgE}} \times \frac{35 \text{ kg}}{100} = 10,08 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}$$

$$KD = 11520 \frac{\text{kgE}}{\text{ha}} \times \frac{0,9 \text{ K}_2\text{O}}{100 \text{ kgE}} = 103 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}$$

Tabla 0.11. Aporte de NPK por el estiércol presentado en la Tabla 4.10

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Estiércol en Materia Seca	EMS	kg ha ⁻¹	11520
Nitrógeno Disponible	ND	kg ha ⁻¹	17,6
Fosforo Disponible	PD	kg ha ⁻¹	10,1
Potasio	KD	kg ha ⁻¹	103,7

De este ejercicio se obtiene en conclusión que la aplicación de 12 Tn. de estiércol con 4% de humedad, aportan al suelo y por tanto al cultivo un total de 17,6 kg de nitrógeno disponible, 10 kg de fósforo y 103 kg de potasio. En el caso específico de N, Mamani (2012) y Miranda (2013) reportan que la producción de 1850 Kg de grano requiere de alrededor de 50 Kg de N, los cuales se distribuyen entre 35 Kg de N aproximadamente para el grano y el restante para los órganos que soportan la producción de grano.

Tabla 0.12. Oferta de nutrientes por el suelo y el estiércol cuando se aplica 12 ton de este insumo por hectárea en el suelo del ejemplo.

Nutriente	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	kg ha ⁻¹		
Oferta Estiércol	17.6	10.1	103.7
Oferta Suelo	24.3	77.0	504.1
Oferta total	41.9	87.1	607.8
Requerimiento cultivo*	50	28	349
Déficit	-8.1	59.1	258.8

*Según datos de Mamani (2012) y Miranda (2013), asumiendo un rendimiento de 1850 Kg/ha considerando la producción total

Los resultados de la tabla 4.12, muestran que el estiércol aplicado en una cantidad de 12 ton ha⁻¹, a un suelo que tiene 0.04% de nitrógeno total, no lograría satisfacer completamente la demanda nutritiva del cultivo, en términos de nitrógeno, habiendo un déficit de casi 10 Kg de este nutriente para alcanzar un rendimiento esperado de 1800 kg ha⁻¹ de grano y que no presentaría problemas de aporte de fósforo y potasio. Estos resultados demuestran que en suelos con bajos niveles de nitrógeno, como es el caso del Altiplano y donde no se aplica un estiércol fermentado y bien manejado, el abonamiento orgánico debe ser tratado con cautela. Para ello es necesario incrementar la dosis de abono o aplicar estiércol con mayor nivel de mineralización.

En el caso específico del ejemplo, el requerimiento adicional sería provisto por un incremento de aproximadamente 4 toneladas adicionales del mismo tipo de estiércol.

Las experiencias de campo y los resultados de diversos experimentos llevados adelante permiten llegar a la conclusión que la dosis ideal de abonamiento orgánico del cultivo de quinua en suelos del altiplano se encuentran entre 15 y 20 Tn/ha, las que si cuentan con suficiente cantidad de agua en el suelo y están suficientemente mineralizados, permitirán maximizar la eficiencia de uso de nutrientes por parte del cultivo.

4.10. Épocas de aplicación

La época de aplicación del abono orgánico al suelo, influye en la tasa de mineralización del estiércol y por tanto en la asimilación del nutriente. Por otro lado las tasas de mineralización se hallan directamente relacionadas con las condiciones de humedad, temperatura y grado de remoción del suelo, es así que en ambientes de temperaturas elevadas el estiércol proveniente de animales puede mineralizarse hasta en 20 días, mientras que en ambientes fríos los efectos de la mineralización del estiércol pueden verse luego de una gestión (Herve, Mita y Coûteaux, 2006). Otro factor que determina la época de aplicación es el sistema de labranza, ya que en la labranza conservacionista o labranza mínima los procesos de mineralización son lentos. En la aplicación de estiércol de llama, fermentado por tres meses en Patacamaya, la mineralización del nitrógeno mineral empezó a los 28 días luego de haberse incubado, por lo que puede decirse que si se trata de estiércol fermentado, esta debería aplicarse por lo menos un mes

anterior a la siembra del cultivo y si se trabaja con estiércol fresco, debería aplicarse hasta 3 meses antes del cultivo.

4.11. Forma de aplicación

La forma de aplicación del estiércol, también afectara la dinámica del nitrógeno. El estiércol suele ser acumulado en la superficie, luego esparcido a través de toda el área para luego ser incorporado al suelo. Esta forma de aplicación incidirá en una pérdida del nitrógeno del material orgánico mientras el mismo se encuentre sobre la superficie del suelo. Por otro lado, al ser distribuido en toda el área, mejora las condiciones del suelo en términos de sus condiciones físicas, químicas y biológicas.

Asimismo, el estiércol puede ser incorporado en surcos, lo cual cuando se hace, ocurre al momento de la siembra, para optimizar el uso del abono en el cultivo y de la maquinaria que se use, sin embargo se corre el riesgo de que la mineralización y liberación de nutrientes no coincida con los periodos de mayor requerimientos de nutrientes por parte del cultivo.

La aplicación también puede ser hecha en hoyos, sistema bajo el cual se optimiza el uso del abono orgánico, sin embargo, si la aplicación es realizada en forma manual, el tiempo y el requerimiento de mano de obra se incrementan, pues no existe maquinaria que facilite este trabajo.

Capítulo 5

CALIBRACION DE UN MODELO DE CRECIMIENTO PARA MODELAR LA RESPUESTA A LA FERTILIDAD Y EL APORTE DE AGUA DEL CULTIVO DE LA QUINUA

El agotamiento de la fertilidad del suelo es ampliamente reconocido como una de las causas de la baja producción agrícola de los pequeños agricultores. Este efecto de la fertilidad del suelo y el potencial de la aplicación de fertilizantes en la producción agrícola tradicionalmente se han estudiado a través de la investigación experimental. Desafortunadamente, los experimentos de campo tienden a ser laboriosos, y requieren de tiempo y recursos y sus resultados son a menudo afectados por el procedimiento experimental establecido. Es por eso que hoy en día la investigación experimental a menudo se complementan con modelos de cultivo para estudiar la respuesta del cultivo a la fertilidad del suelo para diferentes sistemas y condiciones ambientales (Myers, 2005).

Los modelos de cultivos integran diferentes factores que determinan la producción de los cultivos y contribuyen a la comprensión de las interacciones entre estos factores. Adicionalmente, permiten eficientes evaluaciones a largo plazo de los numerosos escenarios y estrategias de manejo de la fertilidad.

Los modelos de cultivos suelen hacer uso de un enfoque de balance de nutrientes para considerar el efecto de la fertilidad del suelo en la producción agrícola (por ejemplo Brisson et al., 1998 (STICS), Jones y Kiniry, 1986 (CERES)). En estos modelos la productividad del cultivo y de los procesos de crecimiento están fuertemente relacionados con el contenido de nutrientes en el suelo, la absorción y el contenido de nutrientes en los diferentes órganos de la planta.

Una de las desventajas de un enfoque cuantitativo es la gran cantidad de datos requeridos para cubrir los modelos. Por otra parte, los balances de nutrientes se calculan sobre todo para los nutrientes seleccionados (a menudo simplemente nitrógeno), que no son necesariamente los nutrientes más limitantes o más críticos. Adicionalmente, la tasa de mineralización de los fertilizantes orgánicos es difícil de cuantificar, pero crucial para estimar la contribución al equilibrio de nutrientes. Además, las relaciones entre los nutrientes y la producción de cultivos se desarrollan sobre todo para un tipo determinado cultivo, por lo que los modelos no son ampliamente aplicables.

Una alternativa al enfoque cuantitativo consiste en modelar el efecto de la fertilidad del suelo en el desarrollo del cultivo y la producción de una manera cualitativa de tal manera de reducir los datos requeridos y contar con un modelo ampliamente utilizable. El modelo AquaCrop sigue este enfoque cualitativo (Hsiao et al., 2009, Steduto et al., 2009, Raes et al., 2009). AquaCrop es el modelo de productividad de agua para cultivos, desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

En contraste con otros modelos, los ciclos de los nutrientes no son considerados explícitamente en AquaCrop sino que el estrés por fertilidad de suelo se determina por su efecto esperado sobre la producción de biomasa de los cultivos, la cual está al mismo tiempo influenciada por el contenido de agua en el suelo que favorece la transpiración del cultivo. En el procedimiento de cálculo no se hace distinción entre los nutrientes ni se asume parámetros específicos de un cultivo pues esto ya se incluye en la calibración previa del modelo.

La ventaja adicional de AquaCrop es que el modelo integra el efecto de varios factores que limitan la producción, incluyendo el clima, el estrés hídrico del suelo, el estrés por salinidad de suelo, diversos efectos del manejo en campo y el estrés por fertilidad del suelo. Con este enfoque integrado, se explica la interacción entre los estreses lo que a su vez conduce a simulaciones de rendimiento más realistas.

Por ello, se presenta el enfoque cualitativo para simular la respuesta del cultivo de quinua a la fertilidad del suelo, implementada en el modelo AquaCrop, con el fin de proponer un modelo de simulación sencillo que sea utilizable por productores o futuros productores de quinua que deseen evaluar el impacto conjunto de factores productivos biofísicos sobre el rendimiento de la quinua. La capacidad del modelo para simular el contenido de agua del suelo, el desarrollo del dosel del cultivo, la biomasa aérea seca y la producción de grano se ha determinado y calibrado para diferentes niveles de fertilidad del suelo y de estrés hídrico. Con ello se presta especial atención a la capacidad del modelo para simular con precisión la producción de cultivos, cuando interactúan tanto el estrés por fertilidad del suelo como el estrés hídrico que afectan conjuntamente a la producción de quinua.

5.1. El enfoque cualitativo de Aquacrop

AquaCrop es un modelo de productividad de agua de cultivos genérico pero preciso. En el modelo se simula el comportamiento del cultivo en diferentes condiciones de clima, suelo, y el manejo y la gestión del riego. AquaCrop fue calibrado y validado con éxito para cultivos comunes como cebada, maíz, trigo, algodón y en el presente caso, se lo hizo exitosamente

para quinua (Geerts et al., 2009). Al estar basado en un módulo de crecimiento impulsado por agua, AquaCrop es especialmente adecuado para simular condiciones en que el agua es un factor limitante para la producción agrícola.

El modelo ha sido liberado por la FAO con la filosofía de permitir a personal que trabaja con producción agrícola el uso de un modelo de producción que no requiera demasiada información sobre el cultivo de interés pues ésta, en general, no está disponible.

Siguiendo, este enfoque, en lugar de utilizar un equilibrio de nutrientes, AquaCrop utiliza una evaluación cualitativa para determinar el nivel de estrés de un cultivo experimenta debido a las deficiencias de nutrientes integrada al estrés que sufre por la falta de agua en el suelo. Esta medida cualitativa corresponde a la biomasa aérea seca relativa máxima (B_{rel}) que se puede esperar en un campo con estrés de fertilidad en comparación a condiciones sin estrés. B_{rel} varía entre 100% que indica que no hay estrés fertilidad del suelo y 0% que corresponde a máximo estrés por fertilidad del suelo que resulta en el fracaso total del cultivo.

$$B_{rel} = \frac{B_{stress}}{B_{ref}} \cdot 100\%$$

Donde B_{rel} es la biomasa aérea seca relativa máxima (%), B_{stress} es la biomasa aérea total al final de la época de cultivo en un campo con estrés por fertilidad del suelo, B_{ref} es la biomasa seca aérea al final de la época de cultivo en un campo sin estrés de fertilidad del suelo. Tanto B_{stress} y B_{ref} , deben ser observados en campos regados sin estrés hídrico, libres de cualquier otro factor de estrés como malezas, plagas, enfermedades, salinidad, etc.

Para la calibración, cuando la producción de cultivos no se ve afectada por estrés de fertilidad de suelo, el modelo AquaCrop calcula el rendimiento del cultivo (Y) en base a la cantidad de agua transpirada por el cultivo (Tr). Esta depende de las condiciones climáticas (Evapotranspiración de referencia, ETo) y la cobertura de cultivo (CC) a través del coeficiente de transpiración del cultivo ($K_{c_{tr}}$). La expansión de CC desde su valor inicial (CCo) hasta el máximo de cobertura de dosel (CCx) es descrito por una función logística determinada por el Coeficiente de Crecimiento del Dosel (CGC). Al final del ciclo del cultivo, la disminución de CC por la senescencia se describe por medio del Coeficiente de Disminución del Dosel (CDC). Como el modelo asume un valor de productividad de agua (WP^*) para cada cultivo, la transpiración de ese cultivo (en este caso quinua) se convierte en producción de biomasa aérea seca (B). Finalmente, el rendimiento (Y) se determina en base a la biomasa (B) por medio del índice de cosecha (HI). Una descripción más detallada sobre el procedimiento de cálculo del modelo AquaCrop y los algoritmos se puede consultar en Raes et al. (2009).

Bajo este esquema, en AquaCrop, el efecto global del estrés de fertilidad de suelo sobre la producción del cultivo es simulado como el resultado de una integración de su efecto sobre el desarrollo de CC y la producción de biomasa (B). Para ello se aplican las siguientes consideraciones (Figura5.1):

- (a) el estrés de fertilidad producirá una reducida expansión y consecuentemente un desarrollo más lento del dosel del cultivo

- (b) también provocará una reducción de la máxima cobertura de cultivo y por tanto un cultivo menos denso, y
- (c) una reducción del CC una vez que se ha alcanzado el máximo CCx

Adicionalmente, y en base a observaciones de campo, se asume que el coeficiente de Productividad de Agua (WP^*) es reducido por el estrés por fertilidad. Específicamente Geerts (2008) reportó para quinoa que la Productividad de Agua (WP^*) describiría mejor la realidad de suelos con escasa fertilidad del Altiplano Boliviano si este coeficiente se reduciría después que una cierta cantidad de biomasa se haya producido y los nutrientes se conviertan en una limitación.

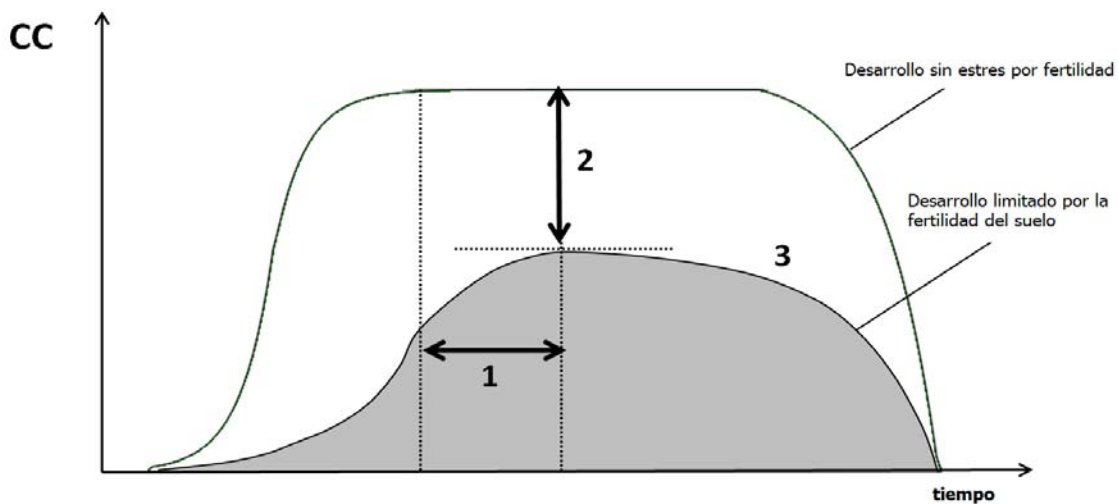


Figura No. 0.1. Cobertura verde de cultivo (CC) afectada por la fertilidad de suelo por un desarrollo más lento y un desarrollo menos denso del dosel y una reducción de la cobertura de cultivo durante el periodo de cultivo

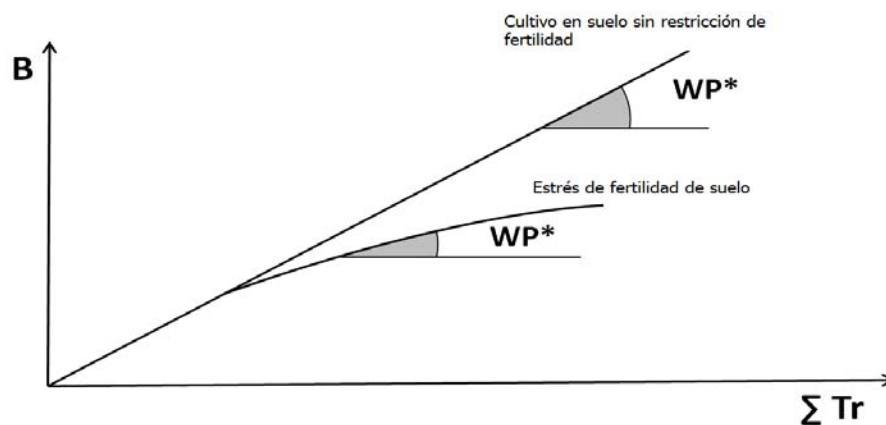


Figura No. 0.2. Efecto del estrés de fertilidad de suelo reduce la Productividad de agua (WP^*) a lo largo de la estación de cultivo debido a que más cuanto más biomasa (B) se produce, la cantidad de nutrientes disponibles en el suelo se reduce por el incremento de consumo por una planta desarrollándose en relación a la Transpiración acumulada (ΣTr)

5.2. Necesidad de calibrar el modelo

Para simular las respuestas de fertilidad de suelo, el modelo usa cuatro coeficientes de estrés que definen la relación entre el nivel de fertilidad y un parámetro específico, en este caso el Crecimiento del cultivo (CGC), la cobertura Máxima del Cultivo (CCx), la Productividad de Agua (WP*) y la senescencia o reducción del cultivo (CC). El valor de los coeficientes varía entre 0 y 1, correspondientes a un rango de máximo estrés hasta un punto de no estrés respectivamente, determinando el impacto del estrés por fertilidad en la curva que definen. Dado que el efecto del estrés por fertilidad es específico y diferente para cada sistema de cultivo, se requiere que el modelo sea calibrado para cada cultivo y de ser posible para cada tipo mayor de suelos.

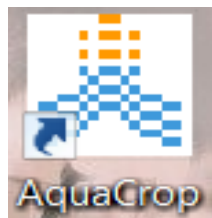
Para facilitar la calibración antes mencionada, AquaCrop (v. 4.0) incluye un procedimiento de calibración automática. Este requiere de observaciones de campo de CCx y B_{rel} y al menos una descripción cualitativa del descenso del desarrollo del dosel del cultivo durante el ciclo para representar el suelo estresado por fertilidad, que servirá como punto de calibración en comparación a un suelo no estresado (siempre hablando de estrés de fertilidad). Ambos campos deben estar libres de otros estreses tanto como sea posible para evitar la influencia de estos factores en el resultado final. Con estos valores, las curvas de los cuatro coeficientes antes mencionados son automáticamente ajustadas por el software por medio de una optimización iterativa interna. Posteriormente, la reducción del desarrollo del dosel (CC) y la biomasa esperada (B) son calculados para niveles de fertilidad reducidos, integrados con el estrés por reducción de agua a través del valor de Productividad de Agua (WP*), lo cual produce un valor muy aproximado a la realidad. Los detalles del proceso de calibración interna para fertilidad y los mecanismos de cálculo se presentan en el manual de Aquacrop (v. 4.0) (Raes *et al.*, 2012). Una vez que el modelo se ha calibrado para el estrés de fertilidad, la producción del cultivo puede ser simulada para cualquier nivel de fertilidad y contenido de agua en el suelo, así como para los tipos de aporte de agua pasados o previstos que ocurran en campo, siempre y cuando el tipo de suelo no cambie en extremo.

En el presente manual se describe la calibración efectuada por el equipo del Proyecto QUINAGUA-SUMAMAD de la Facultad de Agronomía de la UMSA (La Paz, Bolivia), a ser publicado en Van Gaelen *et al.*, (2013) para el caso específico de un cultivo estándar de quinua cultivado bajo condiciones del Altiplano Boliviano, específicamente en el sector del Altiplano Central. Adicionalmente se presentan los detalles sobre la metodología a ser utilizada si el lector cuenta con su propia información sobre impactos de la fertilidad de suelo en el cultivo de quinua y desea calibrar el software que se encuentra libre para descarga en el sitio <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.

5.3. Uso y calibración del modelo AquaCrop para fertilidad limitada

Para utilizar el modelo Aquacrop, el usuario debe descargar el software de la página web de la FAO <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>. Una vez descargado e instalado puede ser utilizado, si se desea, en combinación con el software EToCalculator también disponible para descarga en la misma página web.

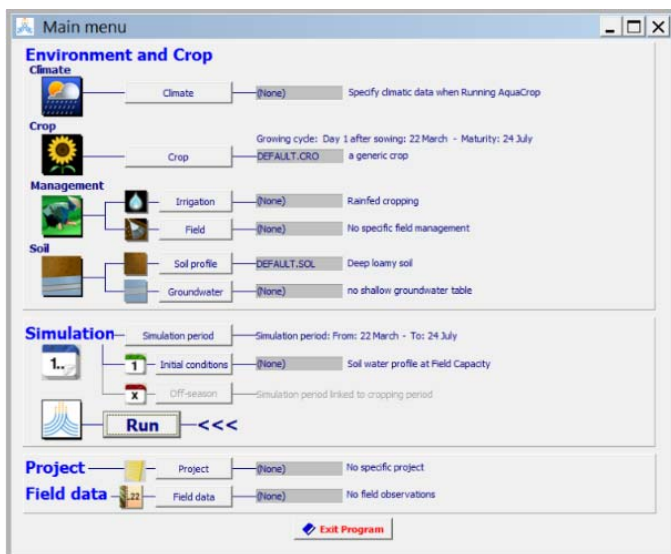
Para iniciar el modelo debe hacer doble clic sobre el icono del programa, que es el que se muestra a continuación:



Luego aparecerá la pantalla inicio en la que debe hacer clic en la opción “**Start**” para entra al menú del programa.

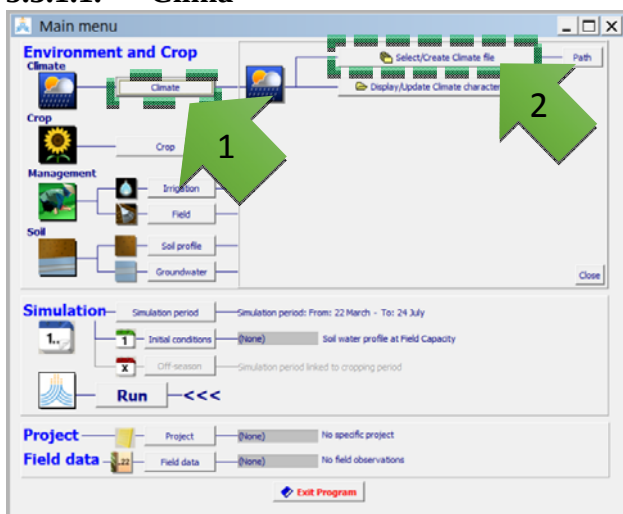


5.3.1. Menú principal

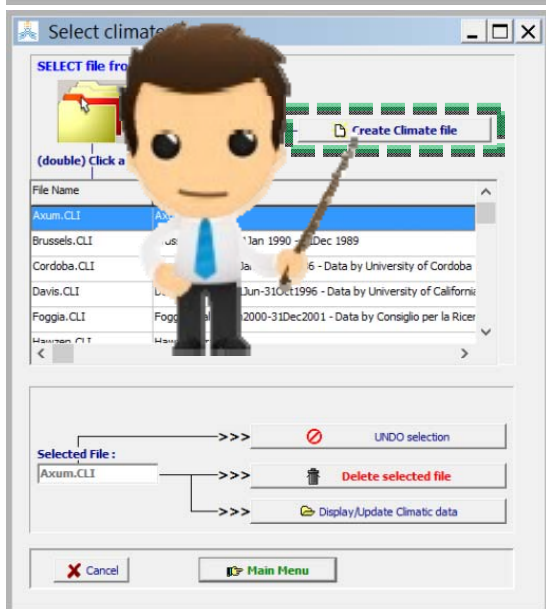


En esta sección se muestran todas las entradas con las que el programa trabaja, siendo estas: clima, cultivo, manejo, suelo y condiciones iniciales.

5.3.1.1. Clima

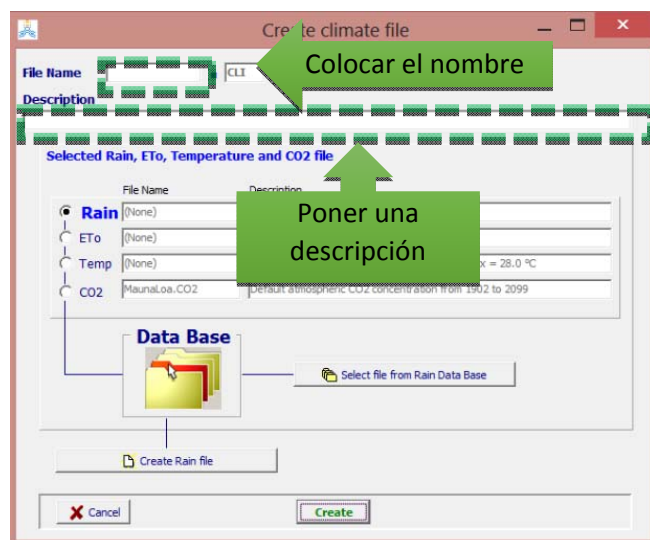


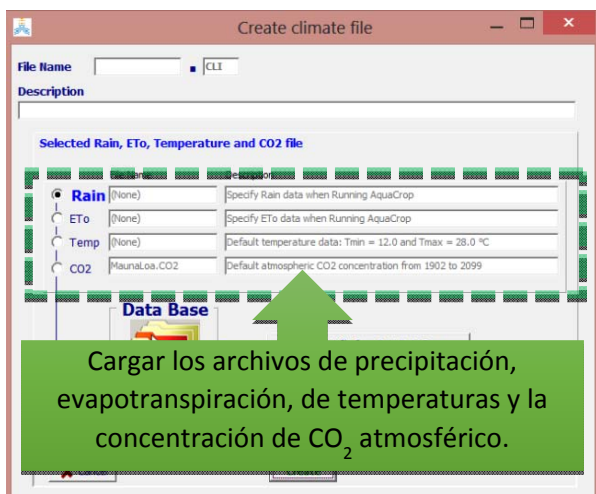
Para la creación del archivo clima debe primero hacer clic en el icono “**Climate**” y luego en la opción “**Select/CreateClimate file**”.



Aparecerá una nueva ventana en la que podrá crear el archivo, para ello pulse sobre “**Create a climate file**”

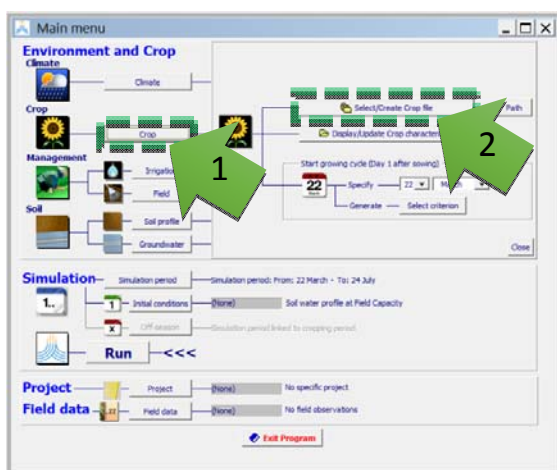
En ese instante se abrirá la pantalla en la que debe poner la información para la creación del archivo de clima. En la parte superior usted puede poner el nombre al archivo de clima, este archivo se creará con la extensión “.cli”. Luego también se puede añadir una breve descripción de este archivo.





Durante el proceso de creación del archivo de clima usted debe contar la información climática del lugar sobre el cual desea trabajar. La información que necesita para el modelo es precipitación, evapotranspiración de referencia y temperaturas mínimas y máximas. En Anexo se presenta un manual corto de cómo utilizar el software ETocalculator para poner disponibles los archivos partes del archivo climático .cli. Para terminar con el archivo de clima, luego de cargar los archivos necesarios, haga clic sobre la opción “**Create**”.

5.3.1.2. Cultivo



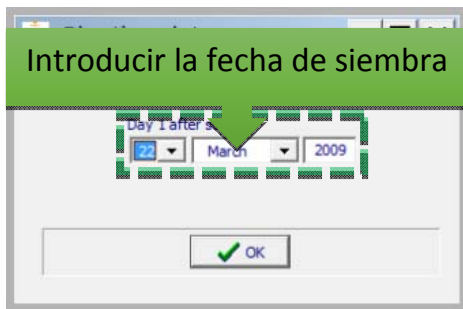
La segunda parte que se debe crear es la de cultivo, en este caso se facilita el trabajo debido a que el programa ya cuenta con un archivo de quinua. De esta manera se ahorra tiempo y esfuerzo, principalmente a que esta sección es amplia y cuenta con varios aspectos sobre la fenología y productividad del cultivo.

Para encontrar este archivo se debe hacer clic en principio sobre el icono “**Crop**” y posteriormente sobre “**Select/CreateCrop file**”

En la nueva pantalla que aparece, usted encontrará un listado de cultivos, situado en la parte media de la ventana, en la cual debe buscar el archivo “**Quinoa.CRO**”. Habiéndolo encontrado lo selecciona y hace clic en “**MainMenu**”.

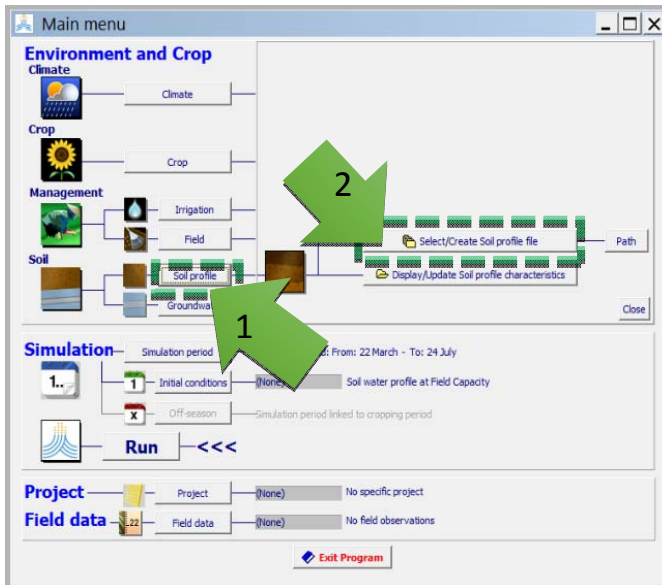
Para ese momento usted ya habrá seleccionado el archivo correspondiente al cultivo de quinua. Luego aparecerá una ventana pidiéndole que ingrese la fecha de siembra del cultivo. En este caso usted simplemente tiene que hacer un cambio, poniendo la fecha a la que desea sembrar el cultivo.





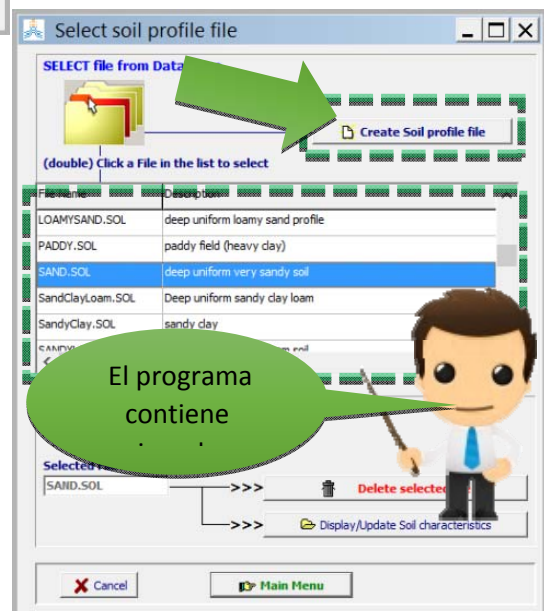
Con esto concluye la segunda sección del programa. Pero posteriormente volveremos aquí para hacer algunas modificaciones.

5.3.1.3. Suelo



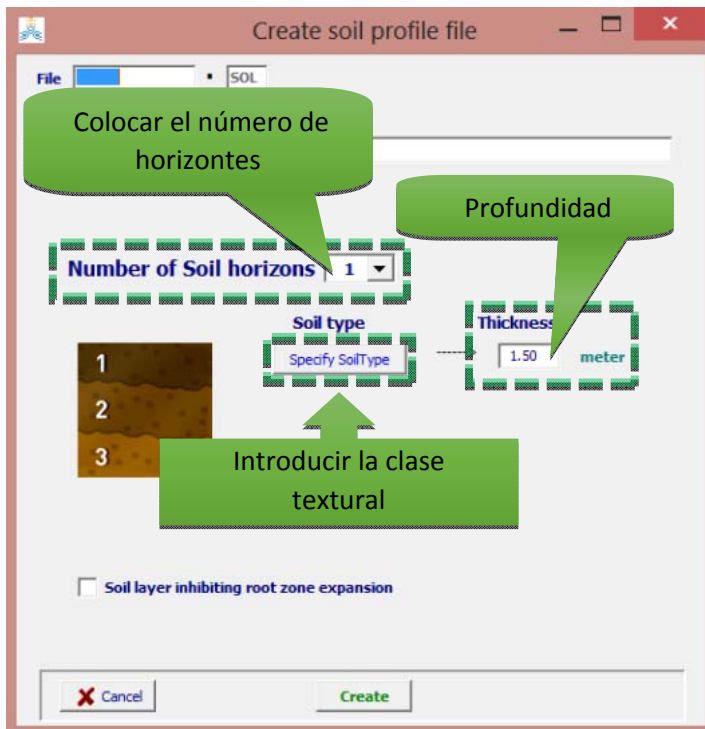
Como tercer paso se introduce la información concerniente al suelo. Para ello se pulsar sobre el icono “**Soilprofile**” y a continuación sobre “**Select/CreateSoilprofile file**”

Como se vio anteriormente, el programa cuenta en todos los casos con una serie de ejemplos que son archivos que contienen información general. Para el presente caso, se creará un archivo de suelo. Entonces tiene que hacer clic sobre “**CreateSoilprofile file**” y podrá seleccionar un suelo que se aproxime a la clasificación textural que describa específicamente su suelo.





A continuación surgirá una nueva ventana en la que debe introducir el nombre del archivo que se creará con una extensión “.SOL”, también se puede incluir una descripción respecto al archivo.

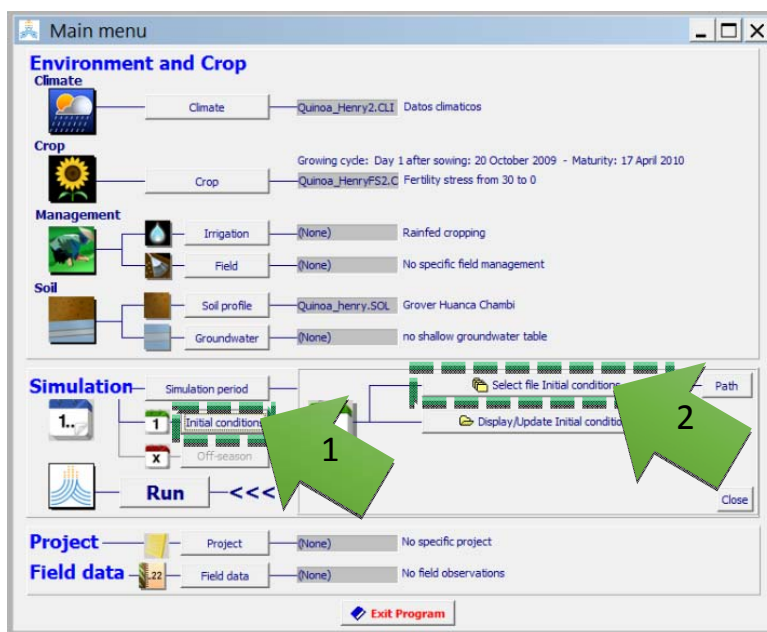


Para generar las características que presenta su suelo, usted podrá ver que cuenta con tres casillas. La primera es el número de horizontes que tiene el perfil de suelo; para modificar esta información debe pulsar sobre la pestaña que se encuentra en la opción “**Number of Soilhorizons**”. El segundo parámetro es la clase textural a la que pertenece cada horizonte de suelo, y para añadir esta información debe pulsar sobre “**SpecifySoilType**” entonces se desplegará otra ventana en la que usted puede elegir la clase textural a la que pertenece cada horizonte. La tercera entrada es el espesor que presenta cada horizonte, lo cual se modifica pulsando sobre el cuadro

que aparece debajo de la opción “**Thickness**” (considerar que este valor debe estar en metros).

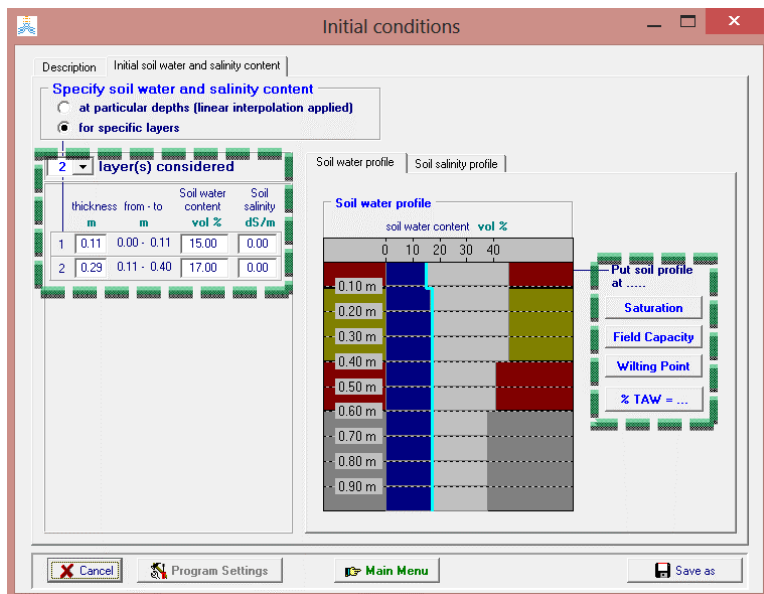
Así concluye la tercera sección del programa. Como ya se habrá percatado, la información de esta sección no es muy compleja y se puede extraer de alguna descripción de suelos con la que cuente o con información de campo. Sin embargo, cuanto más aproximada a la realidad sea su información, mejor reflejará el movimiento de agua en el suelo y su disponibilidad para el cultivo.

5.3.1.4. Condiciones iniciales



Esta entrada considera las condiciones en las que se encuentra la humedad de suelo al momento de la siembra. Para ajustar esta información debe hacer clic sobre “**Initial conditions**” y luego sobre “**Select file Initial conditions**”.

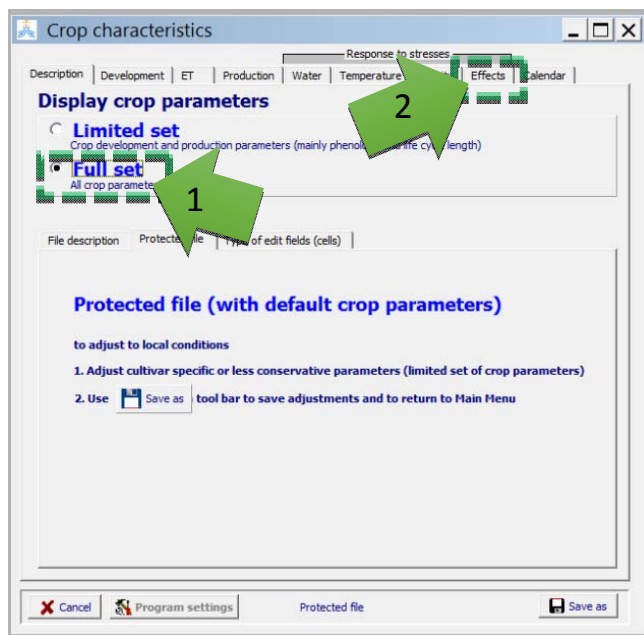
En esta sección podrá encontrar que el programa incluye cuatro opciones predeterminadas que se encuentran en el lado derecho de la ventana que describen posibilidades de contenido de agua en el suelo. Esto se muestra en “Poner el perfil de suelo en...” o “**Put soil profile at...**” en la que se muestran las siguientes opciones: “**Saturation**” que significa que el software simulará que el suelo se encuentra saturado. La segunda “**Field Capacity**” en la que asumirá el valor de capacidad de campo. “**Wilting Point**” que significa que el modelo usará el valor de punto de marchitez permanente como valor inicial de humedad en el suelo. Por último, el usuario también puede especificar algún valor a través de la opción “**% TAW =...**” que permite incluir un porcentaje del total de agua disponible que sea distinto a las otras opciones.



Terminada esta entrada, se cuenta con la información suficiente para realizar una simulación a secano, en la que no se considere estrés nutricional (o por fertilidad).

5.3.2. Calibración del modelo Aquacrop cuando la fertilidad del suelo es limitante

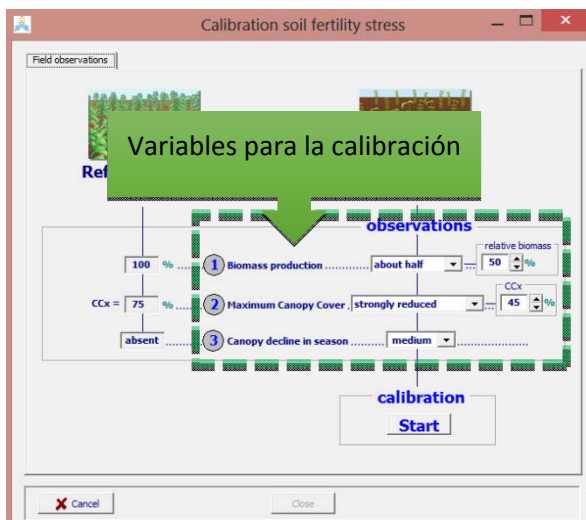
Como se mencionó anteriormente el modelo AquaCrop tiene la facilidad de incluir el efecto que provoca el estrés por fertilidad sobre el cultivo, en este caso sobre la quinoa. Pero para poder introducir este factor hay que tomar en cuenta dos cosas, el primero que implica la calibración del efecto sobre la planta de estrés nutricional. El segundo es la creación de los archivos de manejo para la práctica de aplicación de fertilizante sobre el cultivo.



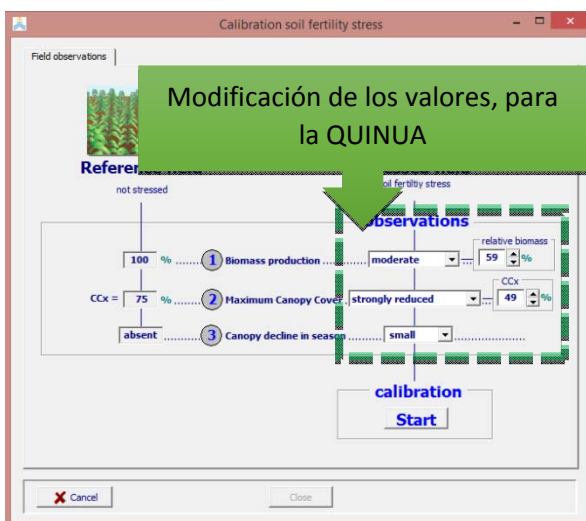
Para ello se vuelve al **Punto 5.4.1.2.** de la parte de datos de cultivo. Para ello en el menú principal se presiona en “**Crop**” luego en “**Display/Update Crop characteristics**” y aparecerá la ventana que se muestra a la izquierda. En este punto se presiona la opción “**Full set**” y al hacer esto se habilitarán nuevas pestañas. Dentro de estas nuevas pestañas aparecerá la pestaña “**Effects**” sobre la que presionamos.

Ya dentro de esta pestaña se cambia la configuración de “no considerado” a “considerado” para ello pulsamos en “**Considered**”





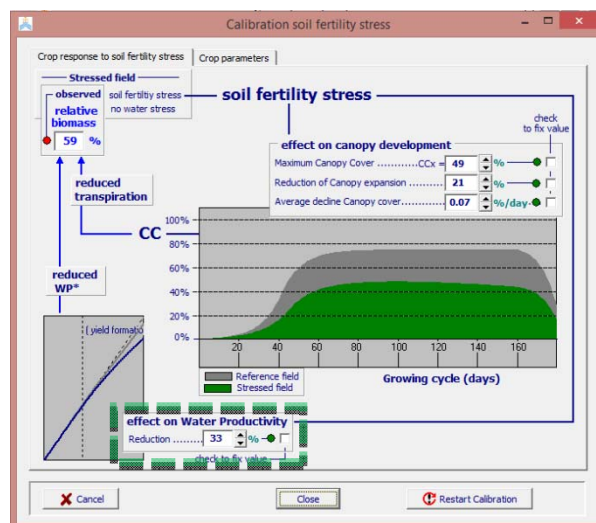
Luego, se abrirá una ventana en la que se introducen los valores para la calibración del efecto de estrés por fertilidad sobre el cultivo. Para ello se requiere introducir tres valores. Estos valores son el de **biomasa aérea seca relativa**, la **reducción de la cobertura vegetal máxima** y el **decaimiento de la cobertura una vez alcanzada la máxima**. Si el usuario cuenta con sus propios datos, en este punto puede calibrar el software para su caso específico de efecto de la fertilidad de suelo. Si el usuario no cuenta con su propia información, puede utilizar los siguientes datos que fueron calibrados para quinua en un suelo típico del Altiplano Central.



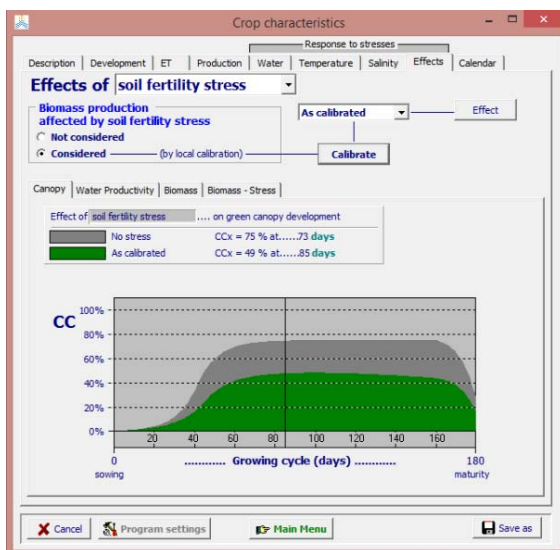
Estos datos se cambian a los siguientes: en la primera entrada modificamos la **biomasa relativa a 59%**, el segundo de la **máxima cobertura vegetal a 49%** y en el tercero de **decaimiento de la cobertura** buscamos la opción “small”. Estos valores fueron calibrados y validados con datos de campo de las gestiones 2006/2007 y 2009/2010 de la estación experimental de Patacamaya.

A continuación pulse en la opción “Start”

Prosiguiendo cambiará la ventana donde aparecerá otra en la que se verá el grafico comparando el desarrollo de la cobertura vegetal sin estrés nutricional (curva color gris) y el desarrollo con estrés nutricional (curva color verde). Se muestra así la menor producción de biomasa del cultivo y consecuentemente un menor rendimiento de grano. Como el modelo está basado en el uso efectivo del agua, otro parámetro que se debe modificar en este punto es el efecto que tiene el estrés por fertilidad sobre la productividad de agua. Para ello en la parte inferior de esta ventana podrá observar la opción “**effect on Water Productivity**” la cual debe cambiarse hasta un valor de **33%**. Este parámetro es muy importante debido a que el modelo asume que



durante el crecimiento del cultivo se incrementa la biomasa y la fertilidad del suelo va decreciendo, indicando una menor transpiración de la planta.

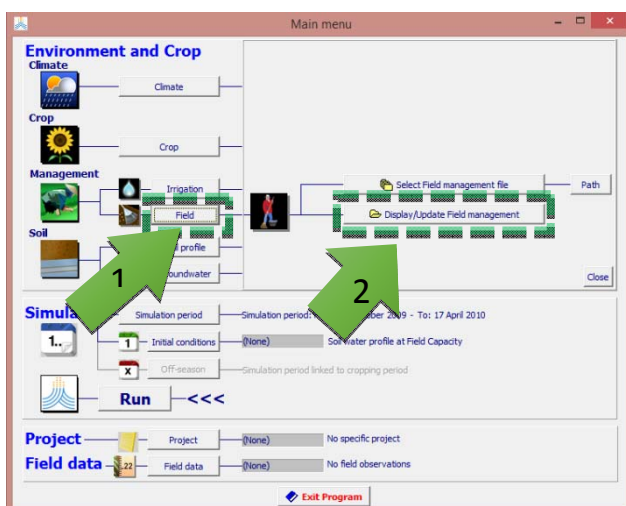


Así es como se llega a la pantalla final en la que se muestra el efecto del estrés por fertilidad sobre el cultivo.

5.3.3. Corrida del modelo calibrado par diferentes condiciones de fertilidad y humedad del suelo

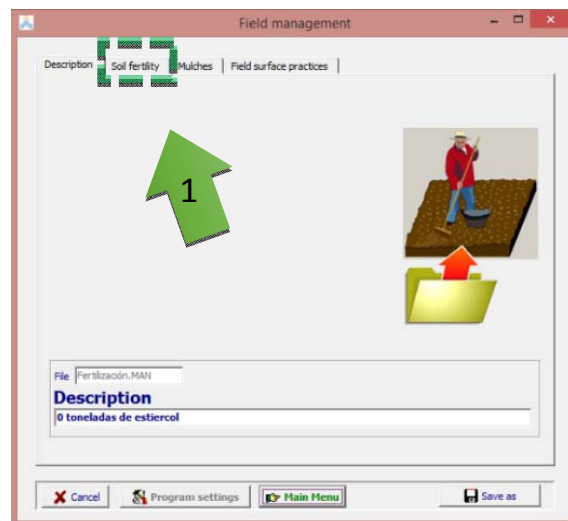
Para aplicar la calibración antes presentada y que el modelo simule los rendimientos de quinua bajo diferentes condiciones de fertilidad de suelo, se debe indicar al programa qué tipo de fertilidad es la preponderante en la zona donde se trabaje. Para ello, en el menú principal se encuentra una opción de manejo o como se muestra “**Management**”, la cual indica las posibles prácticas de manejo del cultivo que se pueden introducir al modelo. Estas prácticas son dos la primera “**Irrigation**” que se refiere a la práctica de riego. La segunda es de “**Field**” en la que introducen las prácticas de fertilización, mulching y prácticas en la superficie del suelo y es la que se utilizará en este punto.

5.3.3.1. Niveles de fertilidad

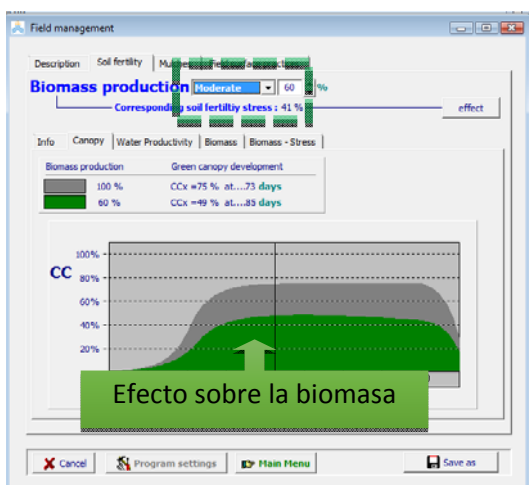


Para añadir la práctica de fertilización en un principio se debe pulsar la opción “**Field**” y luego sobre “**Display/Update Field management file**”.

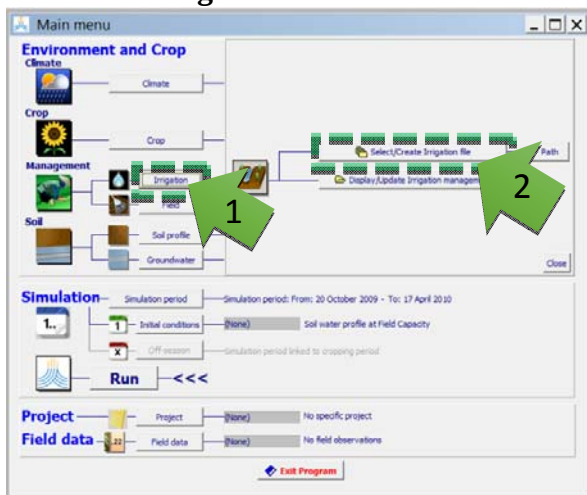
A continuación se abrirá una ventana en la que se presiona la pestaña “**SoilFertility**” que muestra el nivel de fertilidad del suelo del usuario o aquel que desea que se simule.



El usuario puede seleccionar el nivel de fertilidad que desea simular con rangos desde muy pobre hasta No-limitante “**Non-limiting**”.



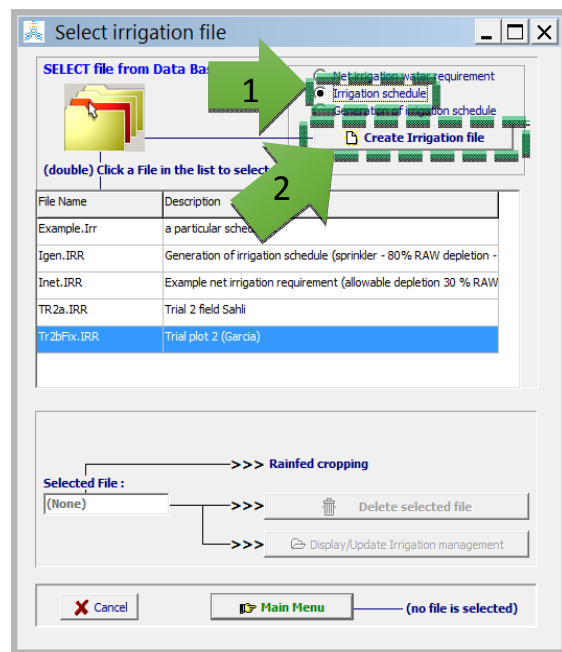
5.3.3.2. Riego



Otra práctica que toma en cuenta el modelo es la influencia del riego integrada con el nivel de fertilidad del suelo. Si el usuario desea simular la influencia combinada de la fertilidad y el riego, puede hacer uso de esta opción.

Para crear el archivo se pulsa primero en “**Irrigation**” para luego pulsar en “**Select/Create Irrigation file**”.

Se abre una ventana en la que, para añadir los eventos de riego que se aplicarán al cultivo de quinua, se debe presionar en “**Irrigation schedule**” ya que es en esta opción donde se informa al modelo sobre los eventos de riego que sean planificados o deseen ser simulados. Luego se presiona “**Create Irrigation file**”.



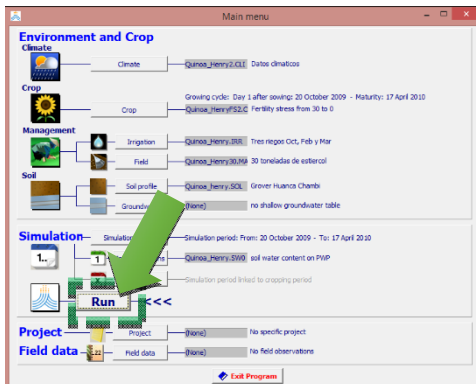
De igual manera como vimos antes se debe introducir el nombre del archivo y si se desea se incluye una descripción. También en esta ventana se presiona en la pestaña “**Irrigation method**”. Aquí se elige el método de riego a utilizarse (riego superficial, aspersión y goteo).



Para finalizar con esta práctica se pulsa la pestaña “**Irrigation events**”, en esta sección se añade los eventos de riego que se aplicarán. Primero en la parte izquierda de la ventana se incluye la opción en la cual se introduce el número de riegos que se realizarán. Posteriormente en el cuadro se observa que se puede incluir la fecha de estos (como días luego de la siembra), añadiendo también la lámina de agua a aplicarse por evento.

Con esta información ya se pueden realizar las respectivas simulaciones las cuales pueden incluir diferentes niveles de fertilización, aplicación de diferentes cantidades de agua de riego y en diferentes localidades con diferentes características climáticas (las que deben representarse nuevamente a través del archivo .cli).

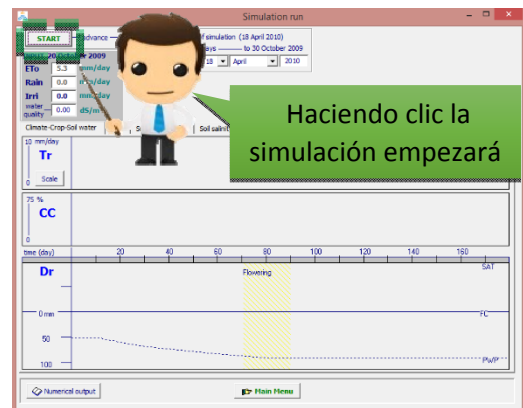
5.3.4. Simulación



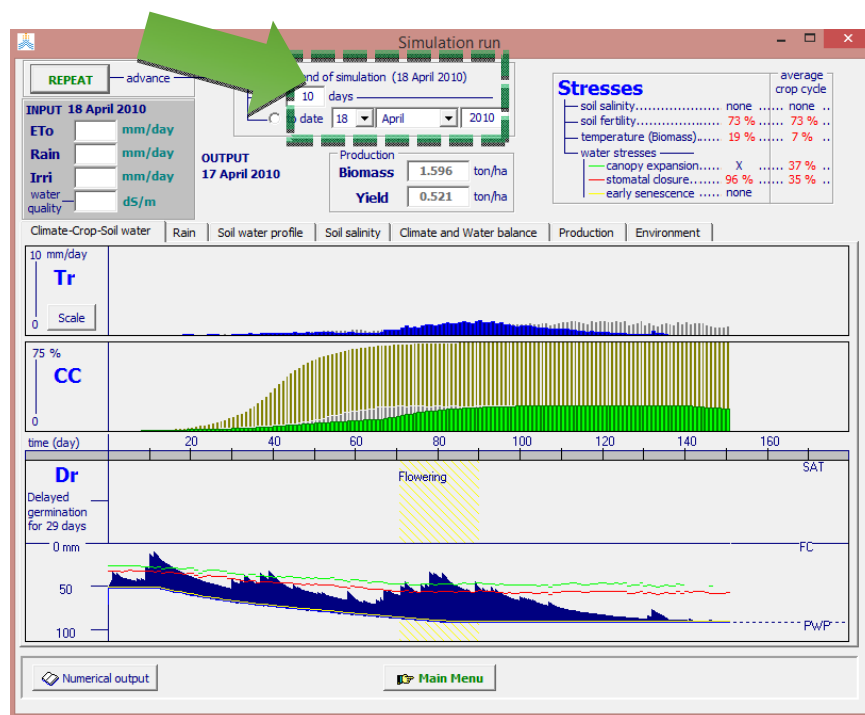
Para la simulación, se retorna al menú principal y se presiona “**Run**”. Como se mencionó antes, este paso requiere que los archivos de clima, cultivo y suelo estén cargados juntamente con la opción del tipo de fertilidad y riego (si se incluye).

Entonces se abrirá un ventana en la que se realizará la simulación. Para empezar el proceso debe hacer clic en la opción “**Start**”. El proceso tardará unos cuantos segundos y brindara los resultados.

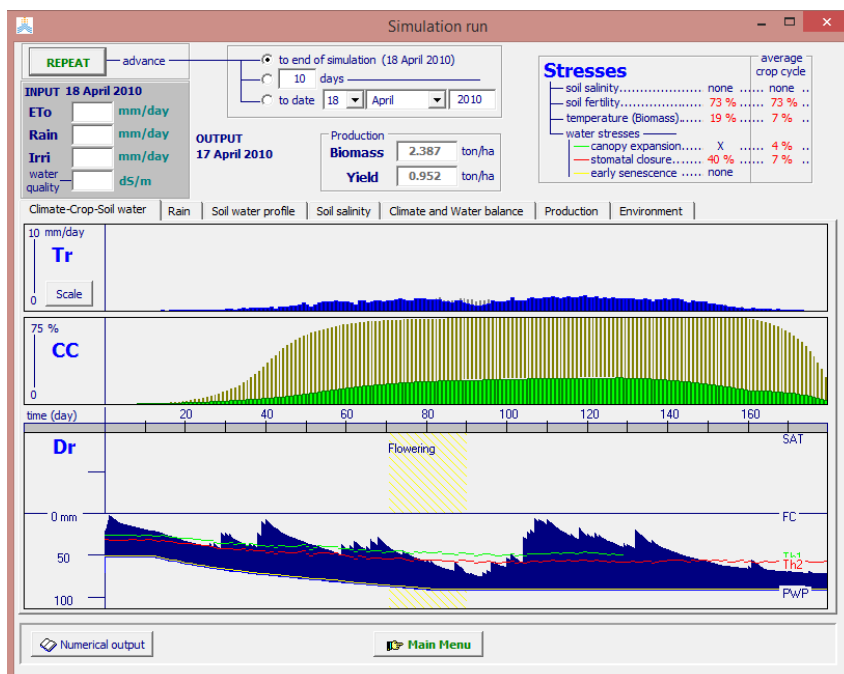
A continuación se presentan 4 ejemplos de los resultados que el modelo ofrece.



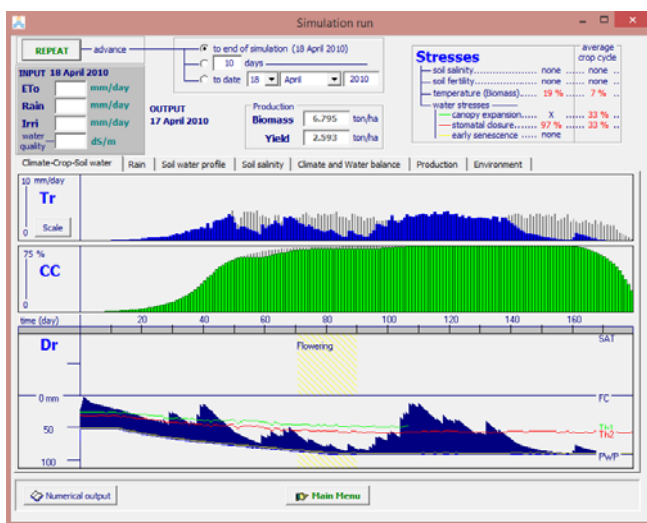
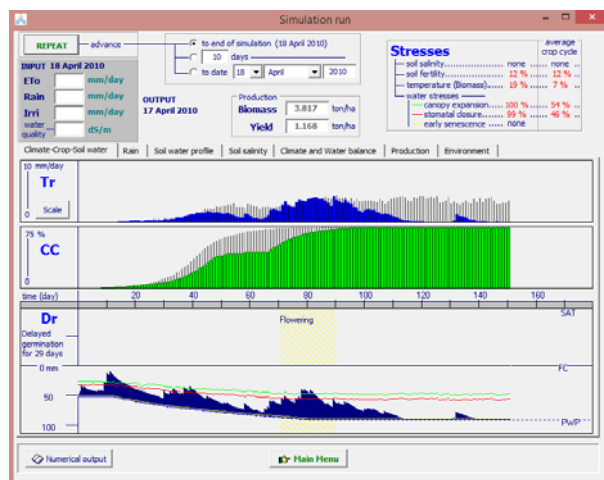
Este ejemplo muestra cómo es que el modelo simula rendimiento que se puede obtener a secano sin aplicar fertilizante ni riego. Se aprecia la poca cobertura que tendrá el cultivo y los periodos de estrés.



Este es otro ejemplo en el que se incluyó la aplicación de riego deficitario únicamente, es decir sin aplicar fertilizante. La cobertura es mayor pero la falta de nutrientes reduce la eficiencia de uso de agua por parte de la quinua.



En este caso solo se simula una fertilidad cercana a la óptima “**Near optimal**” (se supone 15 toneladas de estiércol por hectárea) y sin la aplicación de riego. Se aprecia una mejor cobertura de cultivo, pero la limitación al momento de la floración reduce los rendimientos.



En último ejemplo en el cual se mantiene la fertilidad de suelo cercana a óptima “**Near optimal**” y riego deficitario, el modelo integra ambos efectos, de estrés hídrico y nutricional o de fertilidad.

Para corroborar los valores a continuación se presenta una tabla con los rendimientos reales (con su desviación estándar) y los rendimientos simulados.

Tabla 0.1. Comparación entre los valores simulados y los reales

Riego	Fertilización ton/ha	Rend. Real ton/ha		Rend. Sim. ton/ha
		Media	Desv. Est.	
RD	0	0.50	0.208	0.952
RD	15	2.57	0.677	2.552
SR	0	0.49	0.178	0.521
SR	15	1.26	0.797	1.168

RD: Riego deficitario y SR: Sin riego

Capítulo 6

FACTORES DE DEGRADACION DE SUELO DEL SISTEMA QUINUERO

La degradación del suelo está definida como la pérdida de su capacidad productiva como consecuencia de una disminución de sus cualidades físicas, químicas y biológicas, debido a factores ambientales y/o antropogénicos. La degradación tiene como efecto principal y más visible, la disminución de la producción de biomasa vegetal. Además dificulta la integración de la materia orgánica depositada sobre el suelo por la agresión que se produce en la microfauna y en la microflora.



Figura No. 0.1. a) Parcelas de quinua desprovistas de toda cobertura vegetal b) salinización del suelo como factor de degradación. Fuente: propia (2005)

El principal efecto de la degradación es que dificulta el enraizamiento de las plantas y la disponibilidad de los elementos nutritivos, a la par que hace decrecer la cantidad de agua retenida por el suelo por la compactación en horizontes subsuperficiales y la formación de finas capas en la superficie. Con esa degradación, las tasas de infiltración de agua en el suelo se reducen, mientras las tasas de escorrentía y de erosión aumentan. En estas condiciones, la eficacia de los abonos y del riego es menor, lo que requiere el empleo de cantidades crecientes de estos insumos o cambios en las formas de aplicación hacia métodos más costosos, para la consecución de producciones similares. El encarecimiento de la producción hace los suelos sean abandonados sin protección incrementándose el riesgo de desertización de las zonas afectadas.

Los factores ambientales naturales que participan en la formación del suelo, son los mismos que participan en su degradación, por tanto su acción es lenta. Los factores antrópicos suelen ser más serios y rápidos, y por tanto la agricultura intensiva incidirá en la pérdida de la diversidad tanto de la fauna como la flora.

La degradación del suelo lleva siempre consigo una serie de efectos todos ellos negativos. Cualquiera que sea el tipo de degradación sufrida, una de las propiedades que se ve siempre afectada es la estructura, formándose agregados más inestables y con fuerte tendencia a la destrucción y dispersión de los coloides. El deterioro estructural dificulta el enraizamiento de las plantas y su capacidad de absorción de agua y nutrientes y agrava considerablemente los riesgos de erosión. Una estructura deficiente provoca una menor permeabilidad del suelo y una mayor dificultad en la infiltración del agua de lluvia que conduce a un incremento de la escorrentía y un menor aprovechamiento del agua, con lo que el aporte de agua al suelo es menor que lo que indica la pluviometría del lugar. La disminución de la materia orgánica y la degradación del complejo de cambio provoca una pérdida de nutrientes que acelera el proceso degradativo de la vegetación.

La consecuencia de los efectos expuestos comienza con una pérdida de la productividad que conduce al abandono de muchos suelos. Un suelo sin vegetación está expuesto a su arrastre por el agua y si a ello se le suma la pérdida de capacidad de retención de la misma, puede provocar un incremento en los cursos temporales de agua que pueden llegar a provocar inundaciones o avalanchas de material que enterrando suelos vecinos, incrementan la superficie degradada. Los deterioros agrícolas, económicos y ambientales, conducen a un deterioro social que se traduce en empobrecimiento de las poblaciones humanas con la consiguiente migración de la población a áreas urbanas a las que también alcanza el deterioro iniciado en las rurales.

6.1. Factores que influyen en la degradación de los suelos

Son muchos los factores que influyen en la degradación de los suelos, y ellos pueden ser clasificados como de origen natural y antropogénico (Figura 6.2) este factor en la mayoría de los casos se debe al manejo inadecuado que se realiza del suelo.

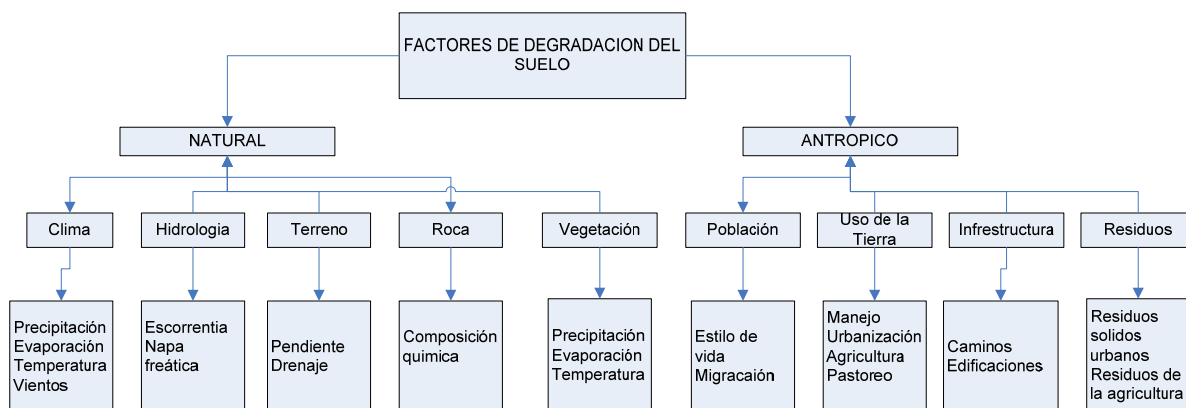


Figura No. 0.2. Factores naturales y antrópicos que influyen en la degradación de los suelos, según Lal y Steward (1992), citado en Orsag (2000).

6.1.1. Factores Naturales

Los factores ambientales que influyen en la degradación de los suelos son naturales, los cuales generalmente son irreversibles o muy difíciles de controlar. Su manejo implica medidas de prevención y mitigación, como las implementaciones de prácticas mecánicas y/o físicas (terrazas, zanjas de desagüe, etc.), agronómicas y/o biológicas (rotación de cultivos, cultivos en curvas de nivel, abonos verdes, coberturas vegetales, enmiendas orgánicas, etc.).

6.2.1. Factores antrópicos

En la mayor parte de los casos, la erosión o degradación del suelo se debe a la mala utilización de prácticas de manejo de suelos, por ejemplo un pastoreo excesivo o sobrepastoreo en las praderas nativas ocasiona, no solo la eliminación de la cobertura vegetal por el consumo animal, si no que provoca una compactación del suelo.

En comunidades del Altiplano en general y en el Sur en particular, la poblaciones que viven en estas regiones, se dedican a diferentes rubros, debido a la presencia de dos épocas climáticas bien definidas: época húmeda (noviembre a marzo) cuando se practica la agricultura y la época seca (mayo a agosto) cuando no es posible hacer agricultura. Por tanto, se tiene una migración temporal en el periodo invernal, durante el cual mayormente no se protege el suelo que ha sido previamente cultivado dejándolo a expensas de los factores ambientales. Si adicionalmente, durante la época de cultivo no se toman medidas de manejo del suelo y/o el cultivo, llevando adelante técnicas de labranza no apropiadas para la zona, se provocará muchas veces, la pérdida o disminución de la productividad y degradación del suelo, ya que la agricultura, así como otras actividades requieren de un constante monitoreo.



Figura No. 0.3. a) Uso de implementos agrícolas para habilitar cultivos de quinua y b) suelo descubierto luego de la cosecha de la quinua en el Altiplano sur de Bolivia.
Fuente: Propia.

Debido a la elevada demanda del cultivo de la quinua por parte del mercado, muchas poblaciones empezaron a producir este grano en planicies que inicialmente estaban destinadas al pastoreo del ganado, y para ello se introdujo la utilización de implementos agrícolas en la preparación del suelo, ocasionando la pérdida de la estabilidad estructural. Asimismo la eliminación de la cobertura vegetal (thola, paja y otras especies anuales) ocasionan que los vientos que van de 2 hasta por encima de los 15 km por hora arrastren partículas de suelo, asociadas a la estructura arenosa de estos sistemas.

6.2. Causas de la degradación física del suelo

Una de las principales causas de la degradación de las características físicas del suelo en las zonas productoras de quinua es la cobertura inadecuada de la superficie del suelo, que expone los agregados de la superficie del suelo a la acción de lluvias y del viento. De esta manera las pérdidas por erosión aumentan con las intensidades más altas de las lluvias. Durante una tormenta fuerte, decenas de gotas de lluvia golpean cada centímetro cuadrado de tierra, aflojando las partículas de la masa de suelo. Las partículas pueden saltar a más de 60 cm de alto y a más de 1.5 m de distancia. Si la tierra no tiene una cobertura vegetal, las gotas pueden destruir muchas toneladas de suelo por hectárea que son así fácilmente transportadas por la escorrentía superficial incrementada por la fácil escorrentía que se produce en un suelo compactado.

La pérdida de suelo por unidad de área de suelo desnudo es directamente proporcional al producto de dos características de la lluvia: la energía cinética y la máxima intensidad durante un período de 30 minutos. Este producto es usado para expresar el potencial de erosividad de la lluvia.

Por otra parte, el viento, es un fuerte factor erosivo en las zonas de producción quinuera especialmente del Altiplano Sud. Con el suelo descubierto, el viento transporta partículas que, cuando chocan con el suelo, lo van desgastando. La corrosión es la abrasión sufrida por las rocas al ser friccionadas por los impactos de las partículas arenosas que son transportadas por el viento. Cuando el viento pierde fuerza va depositando los materiales transportados de

forma gradual, lo que habitualmente da lugar a la acumulación de partículas de similar tamaño y peso en dunas poco fértiles.

El altiplano es una zona árida fuertemente influenciada por la elevada cantidad de radiación solar que recibe lo que provoca mecanismos convectivos violentos formadores de precipitación. Por ello es común que la lluvia ocurra en eventos aislados, cortos e intensos que tienen una fuerte capacidad erosiva. Por otra parte la energía radiativa produce el calentamiento de grandes masas de aire que al moverse hacen que el Altiplano sea una zona de vientos fuertes que también producen procesos erosivos de consideración. Por ello, el cambio de tipo de labranza mínima y manual hacia aquella intensiva con maquinaria, provoca rápidamente procesos erosivos que reducen aún más los niveles productivos de las zonas quinueras. A su vez, la utilización de equipos inadecuados y pesados y el pasaje de maquinaria sobre el suelo cuando este presenta consistencia plástica por lluvias previas, lleva al surgimiento de capas compactadas subsuperficiales, normalmente situadas entre 10 y 30 cm de profundidad y con un espesor de 10 a 15 cm. Esas capas ofrecen fuerte resistencia a la penetración de las raíces de las plantas y restringen la capacidad de infiltración de agua y la aireación.

Capítulo 7

PRACTICAS DE MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS PARA MEJORAR EL SISTEMA PRODUCTIVO DE LA QUINUA

Las prácticas de manejo de suelos, agua y abonos orgánicos y químicos, implican una previa planificación de su uso y están relacionadas con los métodos de prevención y degradación de estos recursos. Con respecto al suelo, se busca aumentar la resistencia o protección contra las fuerzas ejercidas por la acción del viento y el agua. En todos los casos, solo una combinación de prácticas aplicadas a escala familiar y local podrá ser efectiva, ya que el objetivo de recuperar suelos ya degradados en los que se haya perdido los niveles de fertilidad a consecuencia de la degradación física, química y/o biológica se logrará por una acción integrada personal y comunal. Por otro lado estas prácticas de manejo de suelos deben estar orientadas a aumentar o por lo menos mantener los niveles de humedad del suelo, de tal manera de asegurar el desarrollo de los cultivos.

Los capítulos anteriores describieron las condiciones limitantes tanto agroclimáticas (lluvias y temperaturas) como de fertilidad y manejo de suelos del Altiplano andino. En estas zonas se registran bajas precipitaciones que limitan el desarrollo de coberturas vegetales, temperaturas extremas que provocan estrés a las plantas, velocidades de viento que sobrepasan los 15 metros por segundo y que son capaces de transportar diferentes cantidades de material fértil del suelo, sumados a la poca estructuración y presencia de suelos de textura gruesa y precipitaciones intensas y aisladas que aportan mucha cantidad de agua en cortos tiempos. Estos factores hacen que este sistema sea frágil y por tanto las medidas de protección y

manejo de suelos, deben ser realizadas con bastante cuidado y cautela. En este sentido las prácticas de conservación, como las agronómicas que implican el uso de enmiendas orgánicas, manejo de abonos verdes, implementos agrícolas adecuados y sistemas de labranza como la siembra directa, si bien constituyen una inversión adicional a la producción de la quinua, deberían ser tomadas en cuenta a fin de contar con un sistema sostenible de producción de quinua orgánica a largo plazo.

En este punto se hace referencia a la publicación de Jacobsen (2011) que presenta un resumen estadístico de la variación de producción, área productiva y rendimientos de quinua en Bolivia los que integrados muestran que la productividad de quinua en el país se ha incrementado a expensas de apertura de nuevas tierras y no así en base a incrementos de los rendimientos por Ha. Estos, en muchos casos eran superiores en las décadas pasadas pero al presente han bajado a niveles marginales de alrededor de 500 Kg ha⁻¹. Las razones para estos valores se encuentran en el cambio de la forma de producción del cultivo que ha pasado de un tipo de labranza mínima en hoyos con restricción del retiro de la cobertura vegetal hacia un cultivo mecanizado que deja al descubierto grandes extensiones de suelo expuestas al rigor de la intensidad de los elementos meteorológicos del Altiplano. El cambio de un sistema manual de labranza mínima hacia nuevos sistemas más intensivos requiere de una mayor inversión de insumos tanto de enmiendas de suelos como de adición de agua, pues exponen a la evaporación el almacenamiento de agua que antes era conservado en el suelo. Dado que el productor no acompaña sus nuevos sistemas productivos con mayor inversión, la degradación de suelos es palpable en las zonas productoras de quinua.

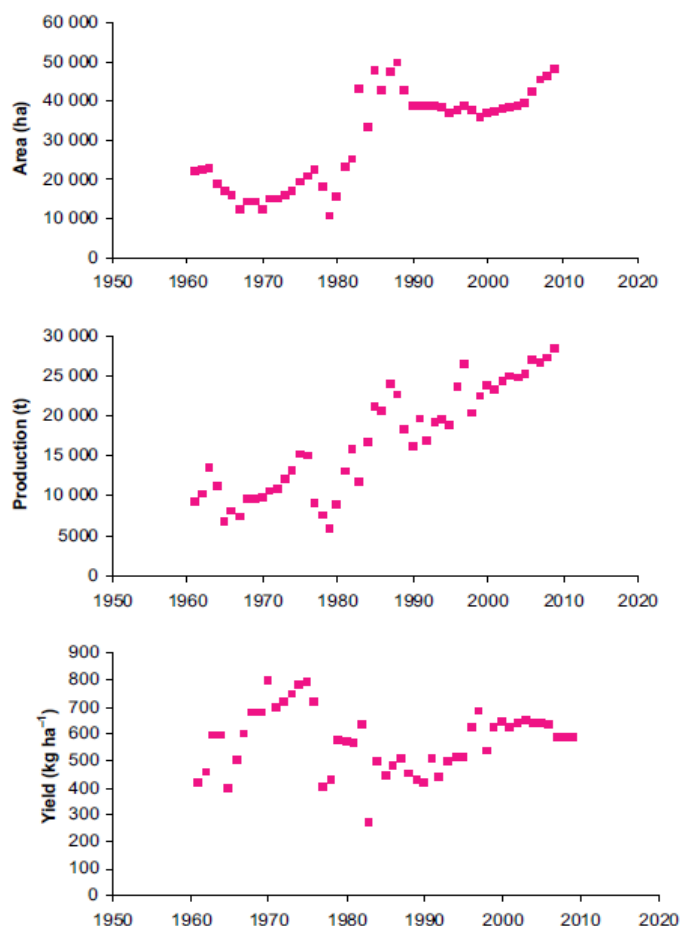


Figura No. 0.1. Área productiva, producción y rendimiento de quinua en Bolivia (Jacobsen, 2012)

Los impactos del cambio de sistema de cultivo no pueden revertirse, ni el cambio en sí mismo, pero se pueden tomar acciones que reduzcan sus consecuencias negativas de ahora hacia el futuro, con prácticas que ayuden a mantener, restablecer y mejorar las condiciones productivas de los suelos del altiplano Boliviano.

7.1. Prácticas agronómicas

Entre las prácticas agronómicas, denominadas también culturales, se encuentran las rotaciones de cultivo e incorporación de materia orgánica (estiércol, compost, abonos verdes) que permitan mejorar las condiciones del suelo, además de mantener la fertilidad. Según Orsag (2010), las ventajas de estas prácticas son la simplicidad y bajo costo y deberían ser utilizadas como preventivas en el manejo de suelos. Entre las desventajas son mencionadas la baja durabilidad, pues deben ser realizadas cada año, asimismo este tipo de prácticas no son suficientes para frenar los procesos de degradación, especialmente cuando estos se encuentran demasiado avanzados. Estas prácticas consideran la elección de cultivos de acuerdo a la aptitud de uso del suelo, realización de rotación de cultivos, siembras en contorno, coberturas vegetales, labranza conservacionista como la labranza mínima o labranza cero.

7.2. Elección del cultivo de acuerdo a la aptitud de uso del suelo

La región del sur del Altiplano Boliviano, se caracteriza por presentar colinas y planicies aluviales. En forma natural la vegetación que se desarrolla en estos ambientes son praderas de thola (*Parestrepheya lepidophylla*) o la paja brava (*Festuca ortophylla*, *Stipa ichu*) en sitios donde las condiciones de salinidad lo permitan. Ya en las planicies cercanas al salar o áreas deprimidas se tiene acumulaciones de sales donde se desarrollan especies halófitas como el chiji blanco (*Distichilis humilis*), khota (*Antobrium triandrum*) y el chiji negro (*Mulenbergia fastigiata*) entre otras.

Algunos estudios reportan que áreas ubicadas entre el Nor Este y Sur Este del salar de Uyunitendrían aptitud de uso que corresponde a la clase III para el cultivo de la quinua. Estos suelos al ser arenosos se adecuan para el desarrollo de este cultivo. Sin embargo si los estudios se realizan a escalas grandes (por ejemplo de 1:250000), los datos son referenciales, ya que visitas a los campos de cultivo evidencian que algunos sectores corresponderían a la clase IV (suelos con limitaciones para la agricultura) y clase V, VI, (aptos solamente para el pastoreo), por las limitaciones de clima, presencia de piedra y profundidad efectiva muy reducida. Esto muestra que son necesarios trabajos de relevamiento de suelos a escalas mucho menores (por ejemplo de 1:50000) para definir las zonas aptas para la agricultura y así evitar el uso de suelos poco aptos para cultivar quinua intensivamente los que obviamente se degradarán.

Sivila y Herve (2006), mostraron que en un área del Altiplano una parcela con leguminosas nativas (*Lupinus sotto-buchtienii*, *Trifolium amabile*, *Astragalus micranthellus*) contenía 0.47% de carbono frente a 0.26% de una parcelas sin estas especies vegetales. Asimismo había diferencias entre el contenido de nitrógeno total de 0.064 y 0.039% respectivamente para la parcela con leguminosas nativas y sin leguminosas, lo cual muestra la importante influencia de la cobertura vegetal sobre los suelos si estos son cultivados con especies que sean adecuadas de acuerdo a su aptitud.

7.2.1. Barbechado

Bajo condiciones áridas a semiáridas como el Altiplano Boliviano en general y el altiplano sur en particular, el cultivo de la quinua es una de las pocas especies que puede desarrollarse a nivel comercial por las condiciones ambientales ya descritas en anteriores capítulos. Por tanto no es posible realizar mucha rotación de cultivos y esto es más pronunciado cuanto más al sud se encuentre el punto. Por ello, los pobladores realizan el *barbecho* o *barbechado* que es una práctica que consiste en descansar el terreno durante algún tiempo con la finalidad de que recupere su fertilidad natural.

Desafortunadamente, debido a la presión de mercado y de tierra, los años de descanso han disminuido siendo que el tiempo de descanso presente no permitiría una recuperación total de las condiciones del suelo. Según el estudio realizado por Ortuño, Beck y Sarmiento (2006), en el Altiplano Central de Bolivia, los suelos recuperarían su capacidad de sostener cultivos y de adecuados nutrientes (C, N, K, Ca) en 9 a 22 años de descanso comparado con parcelas jóvenes. Asimismo Sivila y Herve (2006) mencionan que el barbechado es una estrategia que utiliza el productor para que los suelos recuperen su fertilidad natural, la que sin embargo,

también depende de factores como la falta de medios de producción (mano de obra, capital) y bajos precios de los cultivos determinados por el mercado. Por tanto, esta práctica, si bien aconsejada se torna cada vez menos factible de aplicación en las zonas que responden fuertemente al mercado y que se encuentren en un entorno de moderado a elevado minifundio.

7.2.2. Coberturas vegetales y abonos verdes

La cobertura del suelo es el factor individual de mayor importancia en el control de la erosión hídrica (Amado, 1985). La cobertura del suelo puede ser representada básicamente por la cobertura vegetal de las plantas en desarrollo (período vegetativo) o por sus residuos (Forster, 1981, citado por Lopes, 1984).

La cobertura del suelo, con plantas en cultivo, varía de especie a especie, en función de sus características fenológicas y vegetativas (ciclo, hábito de crecimiento, altura, velocidad de cobertura del suelo, estado de crecimiento) y de las prácticas culturales necesarias para su cultivo (densidad poblacional, espaciamiento de siembra, fertilización y enclavamiento). Los cultivos anuales, por ejemplo, permiten que el suelo quede desprotegido durante algunas épocas del año, principalmente en las épocas de preparación del suelo, de la siembra hasta el establecimiento y, si las condiciones agroclimáticas no permiten el cultivo en invierno, también en este periodo.

A pesar de la disminución progresiva de la erosión durante el período vegetativo, los cultivos en desarrollo no reducen la erosión tan eficientemente como lo hacen sus residuos de cosecha mantenidos en contacto directo con la superficie del suelo. Por eso, la utilización de los residuos de cosecha como cobertura del suelo es una manera eficiente, simple y económica del control de la erosión (Amado, 1985).

Las funciones más importantes del abono verde y de la cobertura de cultivos son:

- Protegen la capa superficial del suelo contra las lluvias de alta intensidad, el sol y el viento.
- Mantienen elevadas tasas de infiltración de agua por el efecto combinado del sistema radicular y de la cobertura vegetal. Las raíces después de su descomposición, dejan canales en el suelo y la cobertura evita una desagregación y sellado de la superficie y reduce la velocidad de la escorrentía.
- Promueven un considerable y continuo aporte de biomasa al suelo, de manera que mantienen e incluso elevan, a lo largo de los años, el contenido de materia orgánica.
- Atenúan la amplitud térmica y disminuyen la evaporación del suelo, aumentando la disponibilidad de agua para los cultivos comerciales.
- Por medio del sistema radicular, rompen capas duras y promueven la aireación y estructuración del suelo, induciendo la actividad biológica del suelo.
- Promueven el reciclaje de nutrientes; el sistema radicular bien desarrollado de muchos abonos verdes, tiene la capacidad de traslocar nutrientes que se encuentran en capas profundas hacia las capas superficiales del suelo, poniéndolos a disposición de los cultivos posteriores.

- Reducen la lixiviación de nutrientes por la ocurrencia de lluvias intensas y de precipitaciones elevadas. El abono verde, al retener nutrientes en la fitomasa y liberarlos de forma gradual durante la descomposición del tejido vegetal, atenúa este problema.
- Promueven la adición de nitrógeno al suelo a través de la fijación biológica de las leguminosas; esto puede representar una importante economía de este elemento en la fertilización de los cultivos comerciales, además de mejorar el balance de nitrógeno del suelo.
- Reducen la población de malezas a través del efecto supresor y/o alelopático ocasionado por el crecimiento inicial y el desarrollo de biomasa.
- El crecimiento de los abonos verdes y su descomposición activan el ciclo de muchas especies de macro y microorganismos del suelo, cuya actividad mejora la dinámica física y química del suelo.
- Presentan múltiples usos en la producción agrícola; algunos abonos verdes poseen elevada calidad nutritiva, pudiendo ser utilizados en la alimentación animal, en la alimentación humana o, hasta ser utilizados como fuente de madera y leña.

Dadas las condiciones climáticas del altiplano en general y del Altiplano centro y sur en particular, la cobertura vegetal natural y el potencial de abonos verdes está limitada a pocas especies, entre las que se encuentra la thola (*Parestrephya lepidophylla*), que es una especie semi arbustiva que se desarrolla asociada a otras especies vegetales como la paja brava (*Festuca dolchophylla*). Además se encuentran otras especies anuales como el pasto bandera (*Bouteloa simplex*) y algunas poaceas. Los suelos en la que estas especies vegetales se desarrollan son generalmente de textura gruesa (arenosos, franco arenosos, areno francosos) y son los que se habilitan para el cultivo de la quinua (Figura 7.2). Sin embargo, las condiciones térmicas se van tornando menos limitantes por lo que se debería iniciar experimentación sobre otras especies que podrían actuar como cobertura y abono verde.



Figura No. 0.2. a) Cobertura vegetal natural conformada por tola (*Parestrephya lepidophylla*) y b) En las cercanías al salar de Uyuni, se desarrollan especies como el *Distichilis humilis* (chiji blanco) y *Suaeda foliosa* (kauchi), que son plantas halofitas. En estas zonas los suelos son salinos sódicos y es muy difícil hacer agricultura, aunque variedades de quinua real son capaces de soportar estos altos contenidos de sales.

Es importante el repensar en la promoción del cultivo de especies nativas e introducidas que puedan ser utilizadas como abonos verdes. Por ejemplo, en el Altiplano Central y Norte,

podría explorarse la introducción de leguminosas como tarwi y arveja, que además podrían utilizarse como alimento animal o humano.

Los abonos verdes y las plantas que podrían utilizarse para cobertura de suelos, deberían tener las siguientes características (Amado y Wildner, 1991):

1. presentar rápido crecimiento inicial (agresividad inicial) y eficiente cobertura del suelo;
2. producción de elevadas cantidades de fitomasa (materia verde y seca);
3. capacidad de reciclaje de nutrientes;
4. facilidad de implantación y manejo en campo;
5. presentar bajo nivel de ataque de plagas y enfermedades y no comportarse como planta hospedera, característica muy importante en el caso de la quinua que permite muy reducido uso de plaguicidas químicos
6. presentar un sistema radicular profundo y bien desarrollado;
7. ser de fácil manejo para su incorporación al suelo y posterior implantación de cultivos.
8. presentar potencial para uso múltiple;
9. presentar tolerancia o resistencia a la sequía y/o heladas;
10. presentar tolerancia a la baja fertilidad y capacidad de adaptación a suelos degradados;
11. posibilidad de producción de semillas en cantidades suficientes para aumentar sus áreas de cultivo;
12. no comportarse como planta invasora, dificultando la implantación de los cultivos de quinua y /o la rotación.
13. de preferencia, pertenecer a la familia de las leguminosas.

Aunque pocas especies lograrán cubrir todos los requerimientos citados y menos en el Altiplano, la consideración del concepto de abonos verdes para lograr la sostenibilidad de los suelos donde se cultiva quinua es muy importante y el inicio de una era de conceptualización distinta del cultivo con visión de sostenibilidad podrá promover estas buenas prácticas de cultivo.

Dada las condiciones climáticas del Altiplano, no es posible realizar la siembra de ningún cultivo en época de invierno, sin embargo podría ser posible la siembra conjuntamente con la quinua o en terrenos que se encuentren en barbecho para que luego sus residuos queden sobre el suelo protegiéndolo. Está claro que esta actividad requiere de una inversión adicional por parte del productor en términos económicos y de trabajo, mas debe ser considerada para mantener el nivel de fertilidad del suelo al mismo tiempo que reducir los problemas de erosión fuertemente integrados en el sistema productivo.

7.2.3. Adición de estiércol

Según Jacob y Uexkull (1973) la mayoría de los abonos de origen animal, contienen varios elementos nutritivos (particularmente N, P, K así como pequeñas cantidades de elementos menores), cuya concentración es sin embargo, más baja que las de los fertilizantes minerales (Tabla 7.1). Sin embargo en este punto, es importante considerar que el estiércol no debe valorarse únicamente por su contenido de nutrientes, sino también por su efecto benéfico a las propiedades del suelo, al mejorar las condiciones físicas (estructura), químicas (pH, Capacidad de Intercambio de Iones) y biológicas (sustrato para el desarrollo de microorganismos para facilitar la mineralización de los nutrientes) y fundamentalmente al promover el crecimiento de especies y variedades que protegerán el suelo de su degradación.

Tabla 0.1. Contenido de nutrientes en el estiércol de ganado ovino y camélido en el Altiplano Boliviano

Tipo de estiércol	N %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	pH	C.O. %	C/N
Oveja (Irpani)	1.17	1.14	0.55	2.30	0.44		15.86	13.55
Oveja (Tihuanaku)	1.15	0.24	0.57			7.88		
Oveja (Patacamaya)	0.95	0.25	0.90	0.72	0.18	7.71	21.91	23.06
Llama (Mejillones)	0.46	0.09	0.47	5.43	2.33	6.58	10.09	23.69

Fuente: Elaboración propia en base a Inda (2010); Osco (2009); Huanca (2008) y Condori (2008)

Para la aplicación de este tipo de materia orgánica, deberá considerarse la forma de almacenamiento (corrales cerrados o abiertos) lo que influye en los procesos anaeróbicos de descomposición, forma de aplicación (sobre la superficie, incorporado en surcos, hoyos o esparcido), así como la época de aplicación (antes, durante o después de la siembra). Por ejemplo, si el estiércol se deja secar en la superficie del suelo después de ser esparcido y antes de ser labrado, un 25% de nitrógeno puede perderse por volatilización en un día y un 50% en cuatro días (Tisdale, et al. 1991).

En capítulos anteriores se ha enfatizado en la necesidad de un sistema integrado de producción de quinua con estiércol y riego deficitario para producir rendimientos aceptables que permitan no ampliar más la frontera agrícola. En este capítulo se destaca que el abono orgánico también ayudaría a mantener la estructura y conservación del suelo, acentuando su importancia en el sistema productivo sostenible de la quinua. Sin embargo, en muchos casos el estiércol se está tornando limitante por su baja disponibilidad. Por ello, en la zona se debería empezar a considerar alternativas imaginativas de fuentes de abono orgánico, como el manejo de residuos urbanos, compostajes familiares y otros que ayudarán a dar respuestas a esas limitantes, al mismo tiempo que reducirían la contaminación urbana en una típica situación de que “todos ganan”.

7.2.4. Sistemas de labranza

El manejo del sistema de labranza es otra práctica habitual a ser seleccionada que ayuda en las prácticas de conservación del suelo. El sistema de labranza que se elija para una situación

particular dependerá de factores como las condiciones climáticas, tipo de cultivo que se va a producir, condiciones del suelo, disponibilidad de recursos del productor, preferencias, etc. Así en regiones donde las precipitaciones son bajas, como el caso del Altiplano Boliviano, los sistemas de labranza y las prácticas afines de conservación del agua son muy convenientes ya que se debe almacenar agua en el suelo para posterior uso por las plantas. Para conseguir aquello, son muy convenientes los sistemas o prácticas de labranza que aumenten la infiltración del agua, retengan la humedad del suelo y limiten la evaporación.

El triángulo de labranza

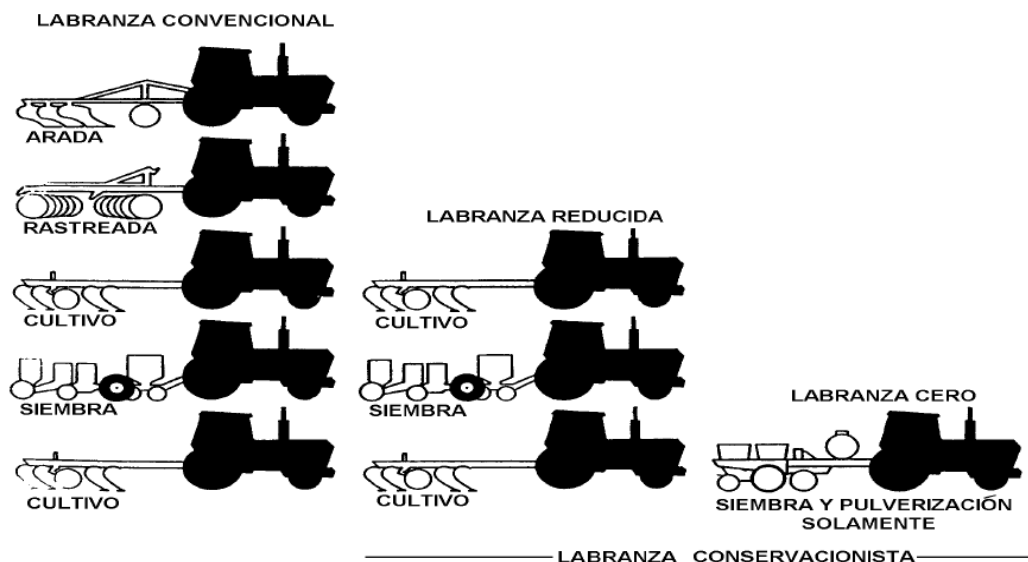


Figura No. 0.3. Características comparativas de la proporción de uso de maquinaria en función del tipo de labranza (FAO, 2000)

En general los sistemas de labranza se dividen en labranza convencional y labranza mínima o conservacionista. Se asocia al término labranza convencional con la realización de laboreos agresivos con maquinaria pesada que, mal utilizados, por plazos no demasiado prolongados, pueden afectar la integridad del suelo, especialmente en suelos de baja estabilidad y/o con pendiente. Este laboreo convencional es una buena forma de lograr algunos objetivos de manejo, como por ejemplo control de malezas, control de algunas plagas y la mineralización de algunos nutrientes, básicamente nitrógeno. Por otro lado, el contenido de agua es uno de los problemas de este tipo de labranza o de cualquier laboreo que signifique un movimiento del suelo. Al remover el suelo no sólo se expone a la materia orgánica para que se mineralice sino que se expone el agua retenida en los poros a la evaporación. Laboreos sucesivos exponen al suelo a que siga evaporando su agua. Para ahorrar tiempo a menudo se utilizan tractores pesados y grandes que aumentan la compactación y el mayor consumo de combustible y la dependencia de la disponibilidad de la maquinaria hace que este sistema sea menos flexible cuando la época de siembra está perjudicada por el clima.

La labranza conservacionista llamada también siembra directa o plantío directo, es una práctica agronómica que difiere de la forma de preparación convencional del suelo, debido a que la remoción del suelo resulta ser mínima y por lo tanto permite conservar el suelo y el agua. En este caso, se puede clasificar en este tipo de labranza al cultivo tradicional de quinua

que se realiza en laderas por medio de hoyos que no remueven la vegetación original y mantienen el ecosistema original.



Figura No. 0.4. Sembradora Satiri II en los suelos arenosos del Altiplano sud

Este tipo de labranza está siendo promovida por las organizaciones de productores de quinua, para evitar la erosión y degradación de suelos de las zonas productoras. En ella, para la siembra se utiliza una sembradora convencional que debería estar equipada con ruedas de presión en lugar de una cadena para cubrir la semilla. La remoción del suelo a través de diferentes técnicas o la utilización de implementos produce la desestructuración del suelo, haciéndolo más susceptible al arrastre de las partículas del suelo por el viento o el agua. Según trabajos realizados por diversas instituciones conservacionistas, el arado de discos destruye la estructura de suelos, más aun en suelos que tengan textura arenosa o franco arenosa como es el caso del Altiplano Sur. Este tipo de implementos es más adecuado para suelos arcillosos con abundante vegetación la misma que puede ser incorporada al suelo para su posterior mineralización. En cambio en terrenos donde no se tenga cobertura vegetal, las partículas de suelo quedan expuestas a la acción de factores erosivos como el viento o el agua.

La propuesta del TIMTAA (Taller de Investigación y Mecánica de Tecnología Agrícola Andina), es la utilización de implementos agrícolas que no produzcan el volteo de la capa arable empleando un arado denominado “QHULLIRI”. Este implemento lleva dientes fijos que solamente aflojan la tierra con la finalidad de facilitar la infiltración del agua de lluvia, aumentar el volumen de poros en el suelo, aumentando de esta manera la capacidad de almacenamiento de agua, promover que los cuchillos que lleva efectúen el deshierbe además que una pala horizontal flotante deje nivelado el suelo. A fin de mejorar el rendimiento de la quinua, el TIMTAA desarrollo el 2002 una maquina sembradora llamada SATIRI III, la que incorpora una dosis de humus junto a la semilla al momento de la siembra. Un requisito imprescindible es la utilización de un abono que tenga un avanzado proceso de maduración con el fin de que los nutrientes estén prontamente disponibles para satisfacer las necesidades nutricionales del cultivo y no dañe a la semilla pues se aplica en forma conjunta con ella.

Generalmente estas máquinas están diseñadas para excavar 2 surcos distanciados a 90 cm; depositando unas 30 a 50 semillas cada 100 a 110 cm; sin embargo de acuerdo a los modelos estas dimensiones son regulables de acuerdo al modelo que se utilice y la densidad de plantas que se desee.

CONCLUSIONES

El crecimiento de la producción y demanda de quinua representa para los andes, a la vez una gran oportunidad y, potencialmente, una amenaza grave para el medio ambiente y el manejo del sistema productivo local. Los altos precios y la demanda en todo el mundo han puesto una enorme presión sobre el sistema de producción que ha alentado un cambio hacia sistemas más intensivos, las que no van de la mano con mayor inversión en insumos, especialmente fertilización y riego. El cultivo de la quinoa desde hace más de 5,000 años muestra su extrema importancia histórica, cultural y nutricional y ahora también económica. Hoy en día, el cultivo es un éxito financiero para los pequeños productores altiplánicos, pues el precio se ha más que triplicado desde la última década, convirtiéndose en un potencial promisorio para los agricultores bolivianos del altiplano gracias a su fuerte promoción internacional.

En el sistema tradicional, la quinua cubría sólo una parte del frágil ecosistema del cual eran parte otros cultivos y/o ganado que pastaba el resto de los terrenos que se dejaban también en descanso por periodos prolongados. Al presente, el ganado se vende para hacer espacio para la quinua y la producción es mucho más intensa que antes pero la disponibilidad y el uso de estiércol se han reducido, lo que provoca su reducida o nula utilización. Adicionalmente el riego es casi nunca considerado. A partir de los resultados y para ayudar a mantener la sostenibilidad de la producción de la quinua, el suelo y la gestión del agua debe ser una prioridad, así como una toma de conciencia de las limitaciones del clima. Teniendo en cuenta que el objetivo es producir más granos de quinua con menos entrada de agua y bajo un buen programa de fertilización, las siguientes consideraciones globales podrían ser tenidas en cuenta:

- Para ser efectivas, las tasas de aplicación de estiércol deben estar entre 15 y 20 Ton/ha, que garantizan suficientes nutrientes para la producción del cultivo y ayudar a mantener la estructura del suelo bien desarrollada.
- Un adecuado equilibrio del suelo-agua y la disponibilidad de agua durante los períodos críticos es esencial para utilizar los beneficios de la fertilización del suelo, especialmente de la aplicación de estiércol. Por tanto, el riego deficitario debe considerarse no sólo para enfrentar las limitaciones climáticas, sino también maximizar la eficiencia de uso de nutrientes.
- El momento de la fertilización del suelo es también importante si se trabaja con fertilizantes orgánicos. La aplicación de estiércol en la siembra, producirá pocos beneficios a los rendimientos del cultivo, ya que el nitrógeno se liberará sólo después de aproximadamente 50 a 60 días de la aplicación. El mejor momento de aplicación es de alrededor de dos meses antes de la siembra para una maduración adecuada del estiércol o trabajar con compost, ya sea para madurar el estiércol o para transformar los residuos domésticos o de cultivos en nutrientes disponibles para la quinua.
- Por último, pero no menos importante, es importante buscar alternativas a la fertilización orgánica. Dado que el estiércol no es fácilmente disponible, otras fuentes, tales como la fertilización mineral podrían explorarse, lo que podría ser una opción para el mercado local no muy estricto con las normas orgánicas.
- El modelo Aquacrop puede utilizarse como una herramienta de evaluación para cubrir las preguntas “*que pasaría si...?*” en relación al sistema suelo y fertilidad con valores de calibración ya definidos por el equipo de trabajo de los autores.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Abrecht, D., Carberry, P., 1993. The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Res.* 31, 55–69.

Aguilera. 2010. Impacts of soil management practices on soil fertility in potato-based cropping systems in the bolivian andean highlands. doctoral dissertation. University of Missouri.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy.

Alzérreca, H., Laura C., Prieto C., Céspedes E., Calle M., Vargas A. & Cardozo G. 2002. Estudio de la tola y su capacidad de soporte para ovinos y camélidos en el ámbito boliviano del sistema TDPS. Bolivia Autoridad Binacional Programa de Naciones Unidas del Lago Titicaca para el Desarrollo (ALT), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Asociación Integral de Ganaderos en Camélidos de los Andes Altos (AIGACAA), CD-ROM, La Paz. 520 p

Amado, T., 1985. Relações da erosão hídrica dos solos com doses e formas de manejo do resíduo da cultura da soja. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado Agronomia). Fac. Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 104 p.

Amado, T. y Wildner, L. do P. 1991. Adubação verde. En: Manual de Uso, Manejo e Conservação do Solo e da Água. Santa Catarina. Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento. Florianópolis. pp. 105-117.

Bilbao Lopez, M., Espíndola, G., Peric Alarcón, Y., 2006. Semilla básica por selección masal estratificada en ocho variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). En: Del Castillo, C., García, M., Vacher, J.J., Winkel, T. (Eds.), Compendio de Resúmenes de Tesis de Grado e Investigaciones realizadas en Quinoa, Cañahua, Amarantho y Papa en la Facultad de Agronomía de la UMSA entre 1991 y 2006. Facultad de Agronomía, UMSA-IRD, Francia-Quinagua, VLIR & KULeuven, Bélgica, La Paz, Bolivia, p. 22.

Blodgett, T., Lenters, J., Isacks, B., 1997. Constraints on the origin of Paleolake expansions in the central Andes. *Earth Interactions* 1:1-28.

Bohnert, H., Nelson, D., Jensen, Y., 1995. Adaptations to environmental stresses. *PlantCell* 7, 1099-1111.

Bosque, H., Lemeur, R. & Van Damme, P. 2000. Análisis ecofisiológico del cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en condiciones de estrés de la sequía y la salinidad. *Tropicultura*, 18(4), 198-202.

- Borda, A., 2011. Análisis de productividad y componentes Del rendimiento de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en la comunidad Callapa- Altiplano Central. Tesis de Licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés – Facultad de Agronomía. La Paz-Bolivia. 154 p.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346.
- Canedo, C., 2013. Análisis regional de frecuencias y requerimiento de agua en las zonas productoras de quinua bajo condiciones de cambio climático en el altiplano de Bolivia. Tesis de Maestría.
- Carlesso, R., Zimmermann. 2005. Água no solo. Parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação. Univesidade federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. P. 87.
- Clapperton, C., 1993, Quaternary geology and geomorphology of South America. Elsevier Science, Amsterdam. 779 pp.
- Condori O. 2007. Evaluación participativa del riego deficitario y de fertilización orgánica sobre el desarrollo y rendimiento de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el Altiplano Sur. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz Bolivia, 121 p.
- Conti, M. y García, F., 2006. Potasio. pág. 123 -137. En Echeverría, H. E. y García, F. O. (eds). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires – Argentina.
- De Latorre-Herrera. 2003. Current Use of Quinoa in Chile. In: Food Reviews international. Volume 19, Issue 1-2, 2003
- Donatelli, M., Hammer, G.L., Vanderlip, R.L., 1992. Genotype and water limitation effects on phenology, growth and transpiration efficiency in grain sorghum. *Crop Sci.* 32, 781–786.
- English, M., 1990. Deficit irrigation. I. Analytical framework. *J. Irrig. Drain E. ASCE* 116, 399–412
- English, M., Raja, S., 1996. Perspectives on déficit irrigation. *Agricultural Water Management*. 32, 1–14.
- Fageria, N., 1998. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. *Revista Brasileira. Eng. Agrícola. Ambiental.*, p. 16.
- FAO, 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO. No 8.
- Fatecha, A. 1999. Guía para la fertilización de cultivos anuales e perennes de la región oriental del Paraguay. Caacupé, Ministerio de Agricultura y Ganadería, 23p.
- Fundación AUTAPO. 2007. Fertilidad, uso y manejo de suelos en la zona intersalar, departamentos de Oruro y Potosí. Educación para el Desarrollo Fundación AUTAPO; Programa Quinoa Altiplano Sur.

Fundación AUTAPO. 2008. Estudio de suelos del área Productora de quinua real. Altiplano sur Boliviano. Estudio Final. Educación para el Desarrollo Fundación AUTAPO; Programa Quinua Altiplano Sur; Embajada del Reino de los Países Bajos.

Garcia, M. 2003. Agroclim study and drought resistance analysis of quinoa for an irrigation strategy in the Bolivian Altiplano. Disertaciones de Agricultura. Faculty of Applied Biological Sciences. K.U.Leuven, Belgium. 556 p.

Garcia, M. 2006. Análisis de las tendencias del cambio climático en las zonas áridas y semiáridas de Bolivia. 43 p.

Garcia, M., Raes, D., Jacobsen, S., 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. Agric. Water Manage. 60, 119–134.

Garreaud, R., Vuille M., Clement A., 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 194 (2003) 5-22.

Geerts, S. et al. 2008. Revisión Bibliográfica de los últimos avances en el conocimiento de la quinua (*Chenopodium quinoa* Wild). Proyecto QUINAGUA. Consejo Interuniversitario Flamenco VLIR –

Geerts, S. et al. 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. Agric. Water Manage.

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Del Castillo, C., Buytaert, W., 2006. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: a case study for quinoa. Agric. Forest Meteorol. 139, 399–412.

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J.A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., Steduto, P., 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. Agron. J. 101, 499–508.

Gross, K., 1981. Predictions of fate from rosette size in four “biennial” plant species: *Verbascum thapsus*, *Oenothera biennis*, *Daucus carota*, and *Tragopogon dubius*. Oecologia, 48, 209–213.

Herve, D. y Beck, S. (2006). Balance de investigaciones sobre la reconstitución de la fertilidad del suelo en el Altiplano central Boliviano (TROPANDES – Bolivia). Ecología en Bolivia vol.41 no.3 La Paz Dec. 2006

Herve, D., Mita, V., y Coûteaux, M., 2006. Construcción de un balance de nitrógeno en cultivos de papa bajo rotación con largo descanso. Ecología en Bolivia, Vol. 41(3): 133-153.

Hirose, T., Kachi, N., 1982. Critical plant size for flowering in biennials with special reference to their distribution in a sand dune system. Oecologia, 55, 281-284.

Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. Agron. J. 101, 448–459.

- Huanca, R. 2008. Evaluación de diferentes niveles de abono orgánico y riego deficitario sobre el desarrollo y rendimiento de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el altiplano Central. 2008. 147F. Tesis de licenciatura- Universidad Mayor de San Andrés. La Paz Bolivia,
- INCAP. 1975. Tabla de composición de alimentos para uso en América Latina. Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá (INCAP), Guatemala
- Inda, R. 2010. Evaluación del comportamiento del nitrógeno, en parcelas con cultivo de quinua bajo diferente manejo de suelos (Municipio Salinas de Garci Mendoza), Oruro. 138f. Tesis de Licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz Bolivia. 138 p.
- Jacob, A., Uexkull, H., 1973. Fertilización: nutrición y abonado de los cultivos tropicales y subtropicales. P. imprenta: Ediciones Euroamericanas. México (México). 4ed.
- Jacobsen, S. 2011. The situation for quinoa and Production in Southern Bolivia: From Economic Success to Environmental Disaster. Journal of agronomy and Crop Science. Berlin. v. 197, p. 390-399, 2011.
- Jacobsen, S., Mujica, A., Jensen, C., 2003. The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. Food Rev. Int. 19, 99–109.
- Jensen, C., Jacobsen, S., Andersen, M., Núñez, N., Andersen, S., Rasmussen, L., Mogensen, V.O., 2000. Leaf gas Exchange and water relation characteristics of Field quinoa during soil drying. Eur. J. Agron. 13, 11–25
- Jetté, C., Alzérreca, H., and Coppock, D., 2001. National, regional and local context. p. 17-50 In D.L. Coppock and C. Valdivia (eds). Sustaining Agropastoralism on the Bolivian Altiplano: The case of San José Llanga. Department of Rangeland resources, Utah State University, Logan, UT.
- Jones, C., Kiniry, J., 1986. CERES-Maize: a Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, Texas, USA.
- Larson, W., & Pierce, F., 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F. & Stewart, B.A. eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, SSSA, 1994. p.37-51. (Special, 35).
- Lopes, P., 1984. Relações da erosão com tipos e quantidades de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo. Dissertação (Mestrado Agronomia). Fac. Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 116 p.
- Lopez, C., Dessimoni, G., Pinto, N., 2009. Aproveitamento, composição nutricional e antinutricional da farinha de quinua (*Chenopodium quinoa*); Departamento de Zootecnia – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha – UFVJM; Diamantina Brasil.
- Mamani, P. 2011. Exportación y balance de nitrógeno en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo diferentes niveles de abono en la comunidad de Callapa. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz Bolivia, 143 p.
- Manejo biodinámico do solo. 2010. Agricultura familiar e sustentabilidade - manejo biodinámico do solo. Univesidade Federal de Santa Maria. estado sul do Brasil..

Manual de Adubação e de Calagem. 2004. Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. Porto Alegre. Brasil. pp 404.

Marengo, J., Soares, W., Saulo, C., Nicolini, M., 2004. Climatology of the low level Jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalysis: Characteristics and temporal variability. Journal of Climate. Vol, 17. Numero 12.

Medrano, A., Torrico, J., Fortanelli, J., 2010. Análisis de la sostenibilidad de la producción de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el intersalar boliviano. CienciAgro. Vol.2 Nr.2 (2011) 303-312

Meyers, 2005. Helping small-scale farmers in the semi-arid tropics: Linking participatory research, traditional research and simulation modelling. In: Nutrient and water management practices for increasing crop production in rainfed arid/semi-arid areas - Proceedings of a coordinated research project. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria, pp. 127-137.

Miranda R. 2012. Adubação orgânica em condições de irrigação suplementar e seu efeito na produtividade da quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) no planalto da Bolívia. Tesis Doctoral. Universidad Federal de Santa Maria, Brasil.

Miranda R., Carlesso R., Huanca M., Mamani P., Borda A. 2012. Rendimiento y acumulación de nitrógeno en la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) producida con estiércol y riego suplementario. Revista Venesuelos 20:21-29

Miranda R., Mendoza H., Yucra E., 2012. Abonamiento orgánico y riego suplementario en el cultivo de quinua. Revista Suelos Ecuatoriales, 42(2): 173-180.

Miranda, R., Inda, R., 2010. Comportamiento de la humedad del suelo en parcelas con cultivo de quinua en el sur de Bolivia – comunidad de Irpani. Proyecto QUINAGUA – Facultad de Agronomía. Primero Congreso de Riego en Bolivia del 12 al 14 de julio.

Mujica, A., 2004. Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO, CIP, UNA. Puno, Perú. 320 p.

Mujica, A., Jacobsen, S.; Izquierdo, J., Marathe, J., 2001. Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. 2da Edición. Santiago de Chile. P. 361.

Orsag, V. 2010. El Recurso Suelo – Principios para su manejo y conservación. Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Agronomía – Carrera de Ingeniería Geográfica. Pp. 473.

Orsag, V. y Miranda, R. 2009. Evaluación del impacto del riego con aguas del río Desaguadero sobre la salinización/ sodificación y acumulación de metales pesados en suelos y vegetación. Sectores Chilahualla y El Choro (Altiplano Central – Bolivia. Pp 231 – 248. En memorias del II congreso nacional de la ciencia del suelo. Sociedad Boliviana de la Ciencia del suelo. 19 al 21 de septiembre. Cochabamba. Bolivia.

Ortuño, T., Beck, S., Sarmiento, L., 2006. Dinámica sucesional de la vegetación en un sistema agrícola con descanso largo en el Altiplano Central Boliviano. Ecología en Bolivia, vol 41 (3) pp. 40-70.

Oweis, T., Hachum, A., 2003. Improving water productivity in the dry áreas of West Asia and North Africa. In: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (Eds.), Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. International Water Management Institute (IWMI), Sri Lanka, pp. 179–198.

Pereira, L., Oweis, T., Zairi, A., 2002. Irrigation management under waterscarcity. Agric. Water Manage. 57, 175–206.

PIWA.1992. Principios técnicos para la reconstrucción y producción agrícola en waru waru. Tomo I. suelos y agua. Convenio: PELT/INADE – IC/COTESU. Puno Peru. Pp. 197.

PIWA.1992. Principios técnicos para la reconstrucción y producción agrícola en waruwaru. Tomo II. Producción agrícola. Convenio: PELT/INADE – IC/COTESU. Puno Peru. Pp. 163.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009. AquaCrop: The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. Agron. J. 101, 438–447.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2012. AquaCrop Reference Manual, AquaCrop version 4.0. FAO, Rome, Italy.

Rezende, P. y Araujo, C., 2007. Adubação nitrogenada de hortaliças. Princípios e praticas com o tomateiro. Editora UFV. Brasil. Pp148.

Rowell, D., 1994. Soil Science: methods and applications. London. Longman. 350 p.

Ruthsatz, B. and U. Fisel. 1984. The utilization of natural resources by a small community on the highlands of Bolivia and its effects on vegetation cover and site conditions. Erdwissen schaftliche Forschung XVIII:211–234.

Schulte, G., Markus, H., Aufhammer, W., 2005. Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. European Journal of Agronomy Volume 22, Issue 1, January 2005, Pages 95–100

Seth, A., Thibeault, J., Garcia, M. and Valdivia, C. 2010. Making Sense of Twenty- First-Century Climate Change in the Altiplano: Observed Trends and CMIP3 Projections, Annals of the Association of American Geographers: DOI: 10.1080/00045608.2010.500193.

Sivila de Cary y Herve, D., 2006. Efecto de leguminosas nativas en terrenos en descanso sobre la microbiota del suelo durante un cultivo de papa (Altiplano central boliviano). Ecología em Bolivia, Vol. 41(3): 154-166.

Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. Agron. J. 101, 426-437.

Tapia, M. y Fries, A., 2007. Guía de campo de los cultivos andinos, FAO, Lima, Perú.

Terceros, L. 1997. La desertificación y los procesos de transformación del sistema productivo en tres comunidades del altiplano sur de Bolivia. En Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) Ancestral cultivo, alimento del presente y futuro (Mujica, Jacobsen, Izquierdo, Pierre Marathee eds). Santiago de Chile 2001.

Thibeault, J., Seth, A., y García, M., 2010. Changing climate in the Altiplano. CMIP3 projections for temperature and precipitation extremes, J. Geophys. Res.-Atmos., 115, D08103, doi:10.1029/2009JD012718,.

Tisdale, S., Nelson, W. y Beaton, J., 1985. Soilfertility and fertilizers. (4th ed.). Macmillan Publ. Co., New York, USA. 754 p.

USDA-NRCS. 2008. Soil Quality Institute, Ames, IA. Disponível em: <http://soils.usda.gov/sqi/> Acessado em 15 abr.

Valdivia, C., Seth, A., Gilles, J., García, M., Jiménez, E., Cusicanqui, J., Navia, F., and Yucra, E. 2010. Adapting to Climate Change in Andean Ecosystems: Landscapes, Capitals, and Perceptions; Shaping Rural Livelihood Strategies and Linking Knowledge Systems, Ann. Assoc. Am. Geogr., 100, 818–834, doi:10.1080/00045608.2010.500198, 2010.

Van Haelen, H. et al. 2013. A qualitative approach to model crop response to soil fertility stress. Submitted to Journal of Agricultural Science.

Zhang, H., Oweis, T., 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. Agric. Water Manage. 38, 195–211.

Zuazo, F. 2013. Evaluación de la actividad microbiana y la mineralización de nitrógeno en macetas bajo diferentes niveles de abono orgánico y régimen de humedad em el cultivo de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). Tesis de Licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés – Facultad de Agronomía. La Paz-Bolivia. 154 p.

ANEXOS