

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**ADUBAÇÃO ORGÂNICA EM CONDIÇÕES DE
IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR E SEU EFEITO NA
PRODUTIVIDADE DA QUINUA (*Chenopodium quinoa*
Willd) NO PLANALTO DA BOLÍVIA**

TESE DE DOUTORADO

Roberto Miranda Casas

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

**ADUBAÇÃO ORGÂNICA EM CONDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO
SUPLEMENTAR E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE DA
QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd) NO PLANALTO DA
BOLÍVIA**

Roberto Miranda Casas

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. Reimar Carlesso

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com dados fornecidos pelo (a) autor (a).

Miranda Casas, Roberto

ADUBAÇÃO ORGÂNICA EM CONDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO
SUPLEMENTAR E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE DA QUINUA
(*Chenopodium quinoa* Willd) NO PLANALTO DA BOLÍVIA /

Roberto Miranda Casas. - 2012.

98 p.; 30cm

Orientador: Reimar Carlesso

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2012´

1. Adubo orgânico 2. Produtividade da quinua 3.
Irrigação 4. Irrigação Suplementar 5. Bolívia I. Carlesso,
Reimar II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Central de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**ADUBAÇÃO ORGÂNICA EM CONDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO
SUPLEMENTAR E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE DA QUINUA
(*Chenopodium quinoa* Willd) NO PLANALTO DA BOLÍVIA**

elaborada por
Roberto Miranda Casas

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Reimar Carlesso, PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Carlos Alberto Ceretta, Dr. (UFSM)

Celso Aita, Dr. (UFSM)

Cleudson J. Michelon, Dr. (IFFarroupilha – JC)

Mirta T. Petry, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 24 de agosto de 2012.

Dedico

Aos meus pais: Dámaso Miranda (†) e Ignacia Casas (†)

A minha família: Elizabeth, Santiago, Ernesto e Gabriel

Aos produtores de Quinoa no Planalto Sul e Central da Bolívia

Ao povo de Santa Maria no Rio Grande do Sul, Brasil e ao povo da Bolívia.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, pública e gratuita, ao Centro de Ciências Rurais, e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

À Universidade Maior de São Andrés, Faculdade de Agronomia, La Paz, Bolívia e ao projeto QUINAGUA, pela concessão da bolsa de estudos.

Um profundo agradecimento e respeito ao professor Reimar Carlesso, pelo apoio nos momentos difíceis da minha vida em Santa Maria, pela amizade, confiança e estímulo para a realização deste trabalho, “de verdad muchas gracias”. Também aos professores: Celso Aita, Mirta Petry, Carlos Alberto Ceretta da UFSM; ao professor Dirck Raes da Universidade de Leuven, Bélgica; e a professora, coordenadora, chefe e amiga, Magali Garcia e ao amigo Rene Chipana da Bolívia.

A todos os colegas, amigos do Sistema Irriga: Cleudson Michelin, Cleiton Dalla Santa, Alberto Knies, Zanandra de Oliveira, Manuel Moura, Rodrigo Elesbão, Tiago Broetto, Rúbia de Oliveira, Vinícius Dubou, Marta Rocha, Moacir Tuzzin, e um abraço muito especial para Mirta Petry e Juliano Martins, já que sem eles a tese não poderia ser concluída.

A minha “família de Camobi” onde morei: Daniel Uhry, Gabriel Rossato, Juliana Zanetti, Marília Milani, Juliano Martins, Daniel Michelin e Manuel Moura.

A meus amigos do curso de Inglês: Maureen Stefanello e Matias Bortoluzzi e amigos como a Deisy Morales, Marcelo Sulzbacher, à “galera” do Paraguai, Ramiro Samaniego, Diego Fatecha, Marcos Ferreira e especialmente para Nathalia Riveros e Fábio.

Quero agradecer a meus colegas, amigos, companheiros de trabalho de Faculdade de Agronomia de La Paz, Bolívia: Sam Geerts, Jorge Cusicanqui, Cristal Taboada, Felix Mamani, Carmen Del Castillo, Justina Condori, Silvia Aliaga, Ruben Huanca, Octavio Condori, Edwin Maita, Gladis Yana, Maria Huanca, Cinthya Mamani, Rodrigo Inda, Soledad Lutino, Victor Osco entre otros.

Finalmente a minha esposa Elizabeth Callisaya e meus filhos Santiago, Ernesto e Oscar Gabriel Miranda pela compreensão nos momentos de ausência e enfim, a todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho.

Enfim, a todos meu muito obrigado.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

ADUBAÇÃO ORGÂNICA EM CONDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE DA QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd) NO PLANALTO DA BOLÍVIA

AUTOR: ROBERTO MIRANDA CASAS
ORIENTADOR: REIMAR CARLESSO

Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 24 de agosto de 2012.

A quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) é um grão andino, com elevado valor proteico (14%), sendo um dos principais cultivos que geram rendas para os agricultores do Planalto Boliviano. A cultura desenvolve-se em condições de baixa temperatura, precipitação pluvial e fertilidade e, embora tenha um bom desenvolvimento em condições com limitações ambientais e de solo, os rendimentos usualmente observados no Planalto Boliviano são baixos. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a produtividade da cultura da quinua, teores de nitrogênio nos grãos e no solo em diferentes quantidades de adubação orgânica e com irrigação suplementar. Foram realizados quatro experimentos: o primeiro, realizado no Planalto Sul, no delineamento de blocos ao acaso bifatorial: quantidades de esterco de ovelha aplicadas ao solo (0, 4, 8 e 12 Mg ha⁻¹) e manejos de irrigação (sem e com irrigação suplementar); o segundo experimento foi realizado no Planalto Central, em esquema trifatorial, em três repetições: épocas de aplicação do esterco (Maio, Julho e Setembro), manejos de irrigação (sem e com irrigação suplementar) e doses de esterco de ovelha aplicadas no solo (0, 15 e 30 Mg ha⁻¹), avaliando-se, em ambos os experimentos, os efeitos sobre a produtividade de grãos, matéria seca da quinua, teor de nitrogênio nos grãos e eficiência de uso do nitrogênio; o terceiro experimento foi realizado no Planalto Central, onde foram avaliados dois tipos de solo e duas coberturas da superfície do solo por resíduos vegetais: areia franca com festuca e restecas de quinua e, solo franco argila arenoso com festuca e restecas de batata, sendo analisado o efeito sobre os teores de nitrogênio mineral do solo; o quarto experimento foi realizado no Laboratório da Faculdade de Agronomia de La Paz, no delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições, Incubou-se solo com diferentes quantidades de esterco de ovelha (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 30 Mg ha⁻¹), onde se determinou a mineralização do nitrogênio e carbono em diferentes datas, durante um período de três meses. Os resultados indicaram que, no Planalto Boliviano, o rendimento da quinua é influenciado pelas condições de clima e solo (200 mm anuais de chuva e 0,03% de nitrogênio total no solo). No entanto, doses de 15 Mg ha⁻¹ de esterco de ovelha, aplicados cinco ou sete meses antes da semeadura da quinua e complementados com irrigação suplementar na fase de floração e grão leitoso, favoreceram a produtividade de grãos, o acúmulo e a eficiência de uso de nitrogênio. Os teores de nitrogênio total não foram influenciados pelas doses de esterco de ovelha utilizadas. Além disso, o manejo do solo (cobertura vegetal) e o tipo de textura do solo influenciaram nos valores dos teores de nitrogênio mineral, apresentando valor de 2 mg de nitrogênio kg⁻¹ de solo. A incorporação do esterco de ovelha ao solo resultou na imobilização do nitrogênio nos primeiros 45 dias após a aplicação, sendo a taxa de mineralização do nitrogênio de 0,62 a 0,64 mg kg dia⁻¹ para tratamentos com doses de 16 e 20 Mg ha⁻¹ de esterco.

Palavras-chave: Adubo orgânico. Produtividade da quinua. Nitrogênio. Irrigação suplementar. Bolívia.

ABSTRACT

PhD Dissertation
Post Graduate Program of Soil Sciences
Federal University of Santa Maria,

ORGANIC FERTILIZATION UNDER SUPPLEMENTARY IRRIGATION CONDITIONS AND ITS EFFECT ON THE PRODUCTIVITY OF QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd) IN THE BOLIVIAN HIGHLANDS

AUTHOR: ROBERTO MIRANDA CASAS

ADVISOR: REIMAR CARLESSO

Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil, 24th of August, 2012

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is an Andean grain with high protein content (14%), and it is one of the main crops that generate incomes for Bolivian plateau farmers. The quinoa crop grows in conditions of low temperature, rainfall, and fertility, and although a good development is observed under limited environmental and soil conditions, the yields in Bolivia are usually very low. This study aimed to evaluate the quinoa grain yield and the nitrogen content in the soil and the grains using different amounts of organic fertilization and supplemental irrigation. Four experiments were conducted: the first one was conducted in the South Highland, in a completely randomized block design, bi-factorial: quantities of sheep manure applied in the soil (0, 4, 8 and 12 Mg ha⁻¹) and irrigation management (with and without supplemental irrigation), the second experiment was conducted in the Central Highlands, using a completely randomized block design, with three factors: sheep manure applied in three different times (May, July and September), irrigation (with and without supplemental irrigation) and application of three amounts of sheep manure (0, 15 and 30 Mg ha⁻¹), evaluating in both experiments, the effects of these treatments on grain yield, quinoa dry matter, grain nitrogen content and nitrogen use efficiency. The third experiment was conducted in the Central Highlands with the objective of evaluating two soil textures classes and two crop residues on soil surface: sandy soil with fescue and quinoa crop residues on the soil surface and sandy clay loam soil with fescue and potato crop residues. On this experiment it was analyzed the effect of these treatments on the mineral nitrogen content of the soil; the fourth experiment was conducted in the Laboratory of the Agronomy Faculty of La Paz, in a completely randomized design with three replications. Soil was incubated with different quantities of sheep manure (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 and 30 Mg ha⁻¹) to determine nitrogen and carbon mineralization in different times during a period of time of three months. Experimental results indicated that in the Bolivian highlands the quinoa yield is influenced by climate and soil conditions (rainfall of 200 mm per year and 0.03% of total nitrogen in the soil). However, the distribution of 15 Mg ha⁻¹ of sheep manure applied five to seven months before sowing the crop and complemented with supplemental irrigation at flowering and grain milk crop development stage, increase quinoa grain yield, the nitrogen accumulation and the nitrogen use efficiency. The total grain nitrogen was not affected by the quantities of sheep manure used. Results also indicated that the soil management (vegetation) and the type of the soil texture has influenced on the soil mineral nitrogen, showing value of 2 mg N kg⁻¹ of soil. The incorporation of sheep manure to the soil resulted in nitrogen immobilization during the first 45 days, the rate of nitrogen mineralization ranged from 0.62 to 0.64 mg kg day⁻¹ for treatments with doses of 16 and 20 Mg ha⁻¹ of sheep manure.

Key words: Organic fertilizer. Productivity of quinoa. Nitrogen. Deficit irrigation. Bolivia.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características químicas e físicas do solo do Planalto Sul Boliviano, comunidade de Irpani.....	36
Tabela 2 – Características químicas do esterco utilizado no experimento conduzido no Planalto Sul Boliviano, comunidade de Irpani.	37
Tabela 3 – Características químicas e físicas do solo do local do experimento no Planalto Central Boliviano, Comunidade de Patacamaya.	42
Tabela 4 – Características químicas do esterco de ovelha utilizado no experimento conduzido no Planalto Central Boliviano, comunidade de Patacamaya.	42
Tabela 5 – Características físicas e químicas de dois tipos de solos onde foi conduzido o experimento no Planalto Central Boliviano, comunidade de Patacamaya.	44
Tabela 6 – Características físicas e químicas da camada superficial do solo franco arenoso, coletado no Planalto Central boliviano e utilizado no trabalho de laboratório.	46
Tabela 7 – Características químicas do esterco de ovelha utilizado no experimento conduzido em laboratório.	46
Tabela 8 – Resultados do quadrado médio da análise da variância para a produtividade, massa seca e índice de colheita de plantas de quinua submetidas a dois manejos de irrigação e quatro níveis de adubo orgânico.	52
Tabela 9 – Valores médios do rendimento de grãos, produção de massa seca e índice de colheita da quinua cultivada em diferentes níveis de adubação orgânica em condições de irrigação suplementar, no Planalto Sul, no ano agrícola de 2007/08.....	52
Tabela 10 – Resultados do quadrado médio da análise da variância para a extração de nitrogênio no grão, na planta, requerimento de nitrogênio (RN) e eficiência de utilização de nitrogênio (EUN).....	56
Tabela 11 – Conteúdo de nitrogênio no grão e na planta de quinua, no experimento conduzido no Planalto sul Boliviano, comunidade de Irpani, ano agrícola de 2008/09.....	57

Tabela 12 – Requerimento de nitrogênio (RN) e eficiência de utilização do nitrogênio (EUN) das plantas de quinua cultivadas em condições de irrigação suplementar e de diferentes níveis de esterco de ovelha no experimento conduzido no Planalto Sul Boliviano, na comunidade Irpani.	58
Tabela 13 – Variação do teor de nitrogênio total do solo, em condições de irrigação suplementar, chuva natural e diferentes quantidades de esterco de ovelha, em três pontos diferentes (no solo, interior do tubo aberto e interior do tubo fechado), no experimento conduzido no Planalto Sul Boliviano, comunidade de Irpani.	59
Tabela 14 – Resultados do quadrado médio da análise da variância para o rendimento de grãos, massa seca e índice de colheita da quinua, no experimento conduzido no Planalto Central boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola de 2009/10.	60
Tabela 15 – Valores médios do rendimento de grãos, massa seca e índice de colheita da quinua submetida a diferentes níveis de adubação orgânica, época de aplicação do adubo e níveis de manejo de irrigação, em experimento conduzido no Planalto Central boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola de 2009/10.	61
Tabela 16 – Conteúdo de nitrogênio nos grãos da quinua, com diferentes níveis de adubação orgânica e épocas de aplicação do esterco de ovelha e níveis de manejo de irrigação, em experimento conduzido no Planalto Central boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola de 2009/10.	65
Tabela 17 – Resultados do quadrado médio da análise da variância para a acumulação de nitrogênio no grão, na planta e eficiência de utilização de nitrogênio (EUN) pelas plantas de quinua, em função das épocas de aplicação do esterco de ovelha, níveis de manejo de irrigação e doses de esterco aplicadas no Planalto Central Boliviano.	66
Tabela 18 – Resultados de acumulação de nitrogênio no grão e na planta de quinua e eficiência de utilização de nitrogênio (EUN), do experimento conduzido no Planalto Central Boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola de 2009/10.	67

Tabela 19 – Valores médios da análise de desdobramento do fator época de aplicação de esterco de ovelha dentro do fator níveis de manejo de irrigação para o acúmulo de N no grão e na planta de quinua e EUN, em experimento conduzido no Planalto Central Boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola 2009/10.	70
Tabela 20 – Resultados do conteúdo de amônio e nitratos para um solo de textura areia franca e franco argilo arenosa, para a avaliação realizada no Planalto Central de Bolívia, em quatro épocas de aplicação de esterco, em Patacamaya, no ano de 2011.....	72
Tabela 21 – Porcentagem de carbono orgânico total e nitrogênio inicial e final de quatro tratamentos, em experimento conduzido no laboratório da Faculdade de Agronomia, Bolívia, em 2010.....	84
Tabela 22 – Porcentagem do nitrogênio mineral em função do conteúdo de esterco de ovelha utilizado no experimento conduzido no laboratório de Agronomia da Bolívia, em 2010.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização do Planalto Norte, Central e Sul na Bolívia. Fonte: Adaptado de Garcia et al. (2006).	20
Figura 2 –	Sistema radicular da quinua com 60 cm de comprimento.....	25
Figura 3 –	Características da cultura de quinua. (a) glândulas de oxalato de cálcio (cristais brancos) sob a superfície da folha; (b) panícula de quinua, variedade Real Branca; (c) cultura da quinua produzida nas encostas do Sul da Bolívia.	25
Figura 4 –	Normais climatológicas da temperatura máxima, mínima e média (a) e distribuição mensal da precipitação pluvial ao longo dos meses do ano (b), no Planalto Sul da Bolívia. (Adaptado de SENAMHI, 2004). .	36
Figura 5 –	Tubos de PVC de 10 cm de diâmetro e 25 cm de comprimento, instalados próximo às plantas de quinua, (a) tubo aberto na parte superior; (b) tubo fechado para evitar o ingresso da água da chuva e as raízes, em experimento conduzido no Planalto Central Boliviano, comunidade de Irpani.....	38
Figura 6 –	Normais climatológicas da temperatura máxima, mínima e média (a) e distribuição mensal da precipitação pluvial ao longo do ano (b), no Planalto Central da Bolívia (Adaptado de SENAMHI, 2004).	41
Figura 7 –	Ilustração da amostragem nos dois tipos de solo para a determinação de nitrogênio mineral no Planalto Central Boliviano, no ano 2011.	44
Figura 8 –	Preparação de amostras de solo em frascos de vidro: (a) para determinação de nitrogênio mineral; (b) determinação do CO ₂ , no experimento conduzido no laboratório da Faculdade de Agronomia da Universidad Mayor de San Andres, La Paz, Bolívia - 2010.....	47
Figura 9 –	Precipitação pluvial, temperaturas máxima e mínima do ar durante o ciclo do cultivo da quinua (Novembro – Abril) no Planalto Sul Boliviano, ano agrícola de 2007/08.	51
Figura 10 –	Rendimento de grãos da quinua para diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo no Planalto Sul boliviano.....	53

Figura 11 – Produção de massa seca da cultura de quinua para diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo no Planalto Sul boliviano.	54
Figura 12 – Valores do índice de colheita da quinua para diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo no Planalto Sul boliviano.	55
Figura 13 – Acumulação de N no grão e na planta de quinua em função de diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo no Planalto Sul Boliviano.	57
Figura 14 – Precipitação pluvial e temperatura máxima e mínima durante o ciclo de desenvolvimento das plantas de quinua (Setembro a Abril) no Planalto Central boliviano, no ano agrícola de 2009/10.	62
Figura 15 – Rendimento de grãos (a) e índice de colheita (b) da quinua com aplicação de diferentes doses de esterco de ovelha, no Planalto Central boliviano, no ano agrícola de 2009/10 (as barras verticais representam o desvio padrão das médias).	63
Figura 16 – Variação da produção de massa seca das plantas de quinua em função da época de aplicação e doses de esterco (desdobramento do fator época dentro das doses de esterco) (a) e rendimento de grãos (desdobramento do fator época dentro dos níveis de manejo de irrigação e doses de esterco) (b) no Planalto Central boliviano no ano agrícola de 2008/09 (as barras verticais representam o desvio padrão entre as médias).	64
Figura 17 – Nitrogênio acumulado no grão (a) e na planta (b) de quinua em função de diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo, no Planalto Central Boliviano, no ano agrícola de 2008/09.	68
Figura 18 – Eficiência de utilização do nitrogênio (EUN) de plantas de quinua em função de diferentes doses de esterco de ovelha ao solo, no Planalto Central Boliviano no ano agrícola 2008/09 (as barras verticais representam o desvio padrão entre as médias).	69
Figura 19 – Eficiência de utilização de nitrogênio das plantas de quinua para os níveis de manejos de irrigação, épocas de aplicação de esterco e doses de aplicação de esterco de ovelha, no Planalto Central Boliviano no ano agrícola de 2008/09.	71

Figura 20 – Resultados do nitrogênio mineral em dois tipos de solo (franco argilo arenoso e areia franca) e duas coberturas vegetais no solo, no Planalto Central Boliviano, no ano de 2011.	73
Figura 21 – Resultados do conteúdo de água no solo no momento da extração das amostras para avaliação do nitrogênio mineral no Planalto Central Boliviano, no ano de 2011.	74
Figura 22 – Resultados da correlação entre o nitrogênio mineral e o nitrogênio total em um solo de textura franco argilo arenosa e areia franca, no Planalto Central Boliviano, no ano de 2011 (as barras verticais representam o desvio padrão entre as médias). Dados de quatro meses de avaliação.....	75
Figura 23 – Resultados da variação do conteúdo das diferentes formas de nitrogênio mineral no solo: a) amônio e b) nitritos + nitratos para diferentes níveis de esterco de ovelha aplicados ao solo, em função do tempo de incubação, Altiplano Central Boliviano, no ano de 2010.	76
Figura 24 – Variação do nitrogênio mineral do esterco de ovelha, em função do tempo de incubação, de amostras de solo do Altiplano Central Boliviano, no ano de 2010.....	78
Figura 25 – Resultados da variação da concentração das diferentes formas de nitrogênio (NH_4^+ e $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$) em um solo franco arenoso em função a diferentes níveis de aplicação de esterco de ovelha e de dias após a incubação (as barras verticais representam o desvio padrão entre as médias).	79
Figura 26 – Resultados da imobilização e mineralização do amônio, nitritos+nitratos e nitrogênio mineral, em solo com diferentes níveis de aplicação de esterco de ovelha. Avaliação realizada em laboratório da Faculdade de Agronomia da cidade de La Paz, com amostra de solo do Planalto Central Boliviano, no ano de 2010.	80
Figura 27 – Resultados da taxa de mineralização do nitrogênio mineral, entre os dias 57 e 71 após a incubação, em um solo franco arenoso do Planalto Central Boliviano, no ano de 2010.	81

Figura 28 – Resultados da taxa de mineralização de carbono no solo submetido a diferentes níveis de aplicação de esterco de ovelha, após 92 dias de incubação em um solo franco arenoso do Planalto Central Boliviano, no ano 2010.....	82
Figura 29 – Resultados dos valores acumulados de carbono mineralizado do solo com a aplicação de diferentes quantidades de esterco de ovelha em um solo franco arenoso, no Planalto Central da Bolívia, no ano de 2010. As barras verticais representam o desvio padrão.	83
Figura 30 – Resultados medidos em nível de campo do conteúdo de água no solo, no experimento com e sem irrigação suplementar, conduzido na comunidade de Irpani, no ano de 2007/08.	85
Figura 31 – Resultados de umidade do solo na camada superficial do perfil do solo medidos em nível de campo e simulados pelo modelo AquaCrop durante o ciclo de desenvolvimento da quinua. Avaliação realizada no experimento realizado no Planalto Sul Boliviano, comunidade de Irpani, no ano agrícola de 2007/08.	86
Figura 32 – Resultados medidos em nível de campo do conteúdo de água no solo, no experimento com e sem irrigação suplementar, conduzido na comunidade de Patacamaya, no Planalto Central Boliviano no ano 2009/10.	87
Figura 33 – Variação da umidade do solo durante o ciclo do cultivo da quinua, para três épocas de aplicação do esterco com dados reais e valores simulados pelo Modelo AquaCrop, no Planalto Central Boliviano no ano agrícola de 2009/10.....	88

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Características do Planalto da Bolívia	20
2.1.1 Condições de clima do Planalto da Bolívia.....	20
2.1.2 Características dos solos do Planalto da Bolívia.....	21
2.2 O cultivo da quinua (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd)	22
2.2.1 Distribuição.....	22
2.2.2 Exigências ambientais do cultivo da quinua	23
2.2.3 Descrição botânica da quinua	24
2.2.4 Descrição nutritiva da quinua	26
2.3 Adubação orgânica na produção da quinua	26
2.3.1 Dinâmica do nitrogênio e do carbono	29
2.3.2 Mineralização, imobilização e nitrificação do nitrogênio	30
2.3.3 Eficiência de uso do nitrogênio.....	32
2.4 Irrigação suplementar e armazenamento de água no solo	33
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Experimento 1: Avaliação da produtividade, nitrogênio na quinua e no solo	35
3.2 Experimento 2: Efeito da época e níveis de aplicação de esterco de ovelhas na cultura da quinua	40
3.3 Experimento 3: Avaliação do nitrogênio mineral em dois tipos de solo com diferentes tipos de cobertura com resíduos vegetais	43
3.4 Experimento 4: Mineralização de nitrogênio e carbono	45
3.5 Simulação da variação do conteúdo de água no solo usando o modelo AquaCrop	49
3.6 Análise estatística	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 Experimento 1: Produtividade de grãos da quinua, produção de massa seca e acúmulo de nitrogênio com aplicação de diferentes quantidades de esterco de ovelha	51
4.1.1 Produtividade de grãos de quinua.....	51
4.1.2 Conteúdo de nitrogênio total nos grãos da quinua e acumulação de nitrogênio pela cultura	56

4.1.3	Requerimento de nitrogênio e eficiência do uso de nitrogênio na cultura da quinua em condições de irrigação e níveis de adubação orgânica	58
4.1.4	Conteúdo do nitrogênio total em solos cultivados com quinua com diferentes níveis de adubação orgânica.....	59
4.2	Experimento 2: Épocas de aplicação de esterco de ovino na produção de quinua no Planalto Central boliviano, Patacamaya	59
4.2.1	Produtividade da quinua.....	59
4.2.2	Conteúdo de nitrogênio na quinua e eficiência de utilização do nitrogênio.	65
4.3	Experimento 3: Nitrogênio mineral e total em dois tipos de solo no Planalto Central.....	71
4.4	Experimento 4: Avaliação do nitrogênio mineral e CO₂ do solo em condições controladas de laboratório	75
4.4.1	Dinâmica do nitrogênio.....	75
4.4.2	Mineralização e imobilização do nitrogênio	80
4.4.3	Mineralização do carbono	81
4.4.4	Relação carbono: nitrogênio.....	83
4.5	Conteúdo de água no solo	85
5	CONCLUSÕES	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 INTRODUÇÃO

A Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) é uma planta da família das Amaranáceas, anteriormente denominada de Quenopodiáceas. Originária do Planalto Boliviano da cordilheira dos Andes possui ampla distribuição geográfica em praticamente todo o Planalto Boliviano. No passado essa cultura era a principal fonte proteica da população boliviana e, atualmente, é um grão com elevado valor econômico por possuir teores altos de proteínas, aminoácidos essenciais, vitaminas e minerais. O conteúdo proteico no grão varia de 12 a 14% (GALWEY, 1993; BHARGAVA et al., 2003; GEERTS et al., 2008). O valor calórico é de aproximadamente 350 cal 100 g⁻¹, sendo um excelente alimento para populações em geral em especial para as regiões frias (PROMUEVE, 2011).

A quinoa apresenta uma ampla variabilidade genética (DEL CASTILLO et al., 2006) apresentando grande resistência às variações de temperatura, mostrando-se adaptável a diversas condições de latitude e altitude, sendo cultivada em zonas semiáridas em situações severas de déficit hídrico, situações de baixas temperaturas e/ou também em solos salinos (BOSQUE et al., 2003).

Atualmente, a quinoa é a cultura que apresenta a principal fonte de renda dos agricultores do Planalto Sul e Central da Bolívia, especialmente pela elevada demanda mundial por produtos orgânicos e pela alta qualidade nutricional do grão da quinoa. Os preços de exportação desse grão podem atingir até US\$ 3.000,00 (R\$ 6.000,00) por tonelada de grão (PROMUEVE, 2011). Esse alto valor comercial ocasionou como resultado que muitas das áreas usualmente utilizadas para o cultivo de pastagem para a alimentação de lhamas e ovelhas foram destinadas para a produção da quinoa (JACOBSEN, 2011).

O rendimento de grãos normalmente observado para a cultura da quinoa está entre 500 a 700 kg ha⁻¹ no Planalto Sul e de 1000 kg ha⁻¹ no Planalto Central da Bolívia. As principais dificuldades de produção dessa cultura são a presença de condições climáticas extremas (baixas temperaturas e déficit hídrico), a deficiência de umidade do solo devido às reduzidas precipitações pluviais, além da baixa fertilidade natural dos solos da região. Entretanto, devido às baixas precipitações pluviais e falta de água nestes ecossistemas, não é possível praticar a irrigação total, sendo uma alternativa a prática da irrigação suplementar, estratégica ou deficitária

(GEERTS, 2008). Por outro lado, em alguns ambientes o cultivo da quinua pode atingir rendimentos superiores a 3.500 kg ha^{-1} , quando são aplicados até 120 kg ha^{-1} de nitrogênio (SCHULTE et al., 2005). No entanto, devido às exigências ou recomendações de uma parte significativa do mercado internacional de quinua de fornecimento de um produto livre ou com a mínima utilização de agroquímicos, na Bolívia, os órgãos oficiais de assistência técnica não recomenda aos produtores o uso de adubos comerciais, somente adubos orgânicos. Assim, para atender ou parcialmente suprir as necessidades nutricionais dessa cultura, o que é utilizado com mais frequência pelos produtores é o esterco de rebanhos de ovelhas e/ou lhamas.

Os solos do Planalto Sul e Central da Bolívia contêm reduzidos valores de matéria orgânica (0,1 a 0,9%) e de nitrogênio total (0,03 a 0,07%) (ORSAG et al., 2011), portanto, existe a necessidade de adubação suplementar para o cultivo comercial. Atualmente, para produzir quinua, os agricultores aplicam entre 2 e 6 Mg ha^{-1} de esterco fresco, no momento da semeadura (meses de Setembro a Novembro), ou antes da semeadura, no momento de realizar-se o primeiro cultivo do solo (aração) entre os meses de Fevereiro a Abril. No primeiro caso, o tempo de decomposição e mineralização do material orgânico aplicado não coincidem com as fases fenológicas de maior requerimento nutricional pelas plantas, e no segundo caso, poderia ocorrer uma menor efetividade da adubação orgânica devido a perda de nutrientes, reduzindo a eficiência de aplicação do esterco. É conhecido que a velocidade de mineralização do esterco depende das condições ambientais como a temperatura, umidade, aeração, relação carbono/nitrogênio, fonte orgânica, atividade de microrganismos entre outros. Assim, a mineralização é variável de uma região para outra (CAYUELA et al., 2009). Nos solos tropicais, essa mineralização pode ser rápida, porém, em climas áridos a semiáridos e de alta altitude, como no caso do Planalto Central e Sul da Bolívia, a mineralização provavelmente ocorre mais lentamente.

A quantidade de esterco aplicada no solo deve ser levada em consideração quando se opta somente pelo uso da adubação orgânica. É evidente que a utilização de baixas quantidades não proporciona efeitos significativos no aumento da produtividade da quinua, ocasionada também pela baixa fertilidade natural dos solos. Porém, aplicações elevadas poderiam ocasionar, em muitos ambientes, efeitos negativos ao ambiente, em função de eutrofização das águas superficiais e/ou subsuperficiais.

O presente trabalho foi desenvolvido com a finalidade de avaliar a produtividade da quinua, o conteúdo e a eficiência de utilização de nitrogênio na planta de quinua e no solo do Planalto Sul e Central da Bolívia, a partir da utilização de diferentes níveis de esterco ovino, condições de irrigação suplementar e chuva natural. Além desse objetivo principal o trabalho também possui os seguintes objetivos específicos: (i) avaliar a resposta de produtividade da quinua em relação a aplicações de esterco ovino e irrigação suplementar; (ii) avaliar o efeito da época de aplicação do esterco (Maio, Julho, Setembro) na eficiência de uso de nitrogênio e na produtividade da quinua; (iii) determinar as variações do nitrogênio mineral em dois tipos de solo; (iv) determinar a taxa de mineralização do nitrogênio e carbono no solo, a partir da utilização de diferentes níveis de esterco ovino em condições controladas de laboratório e; (v) estimar as variações da umidade do solo nos experimentos conduzidos no Planalto Sul e Central da Bolívia, usando o modelo de simulação AquaCrop.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Características do Planalto da Bolívia

O Planalto da Bolívia encontra-se localizado entre as Latitudes 10° 50' a 19° 00' S e Longitudes de 67° 30' a 69° 40' W, ao sul dos Estados de La Paz, Oruro e Potosí (Figura 1). Esta planície está situada a uma altitude média de 3800 metros, apresentando uma superfície aproximada de 20.000 km² com planícies altas e com sedimento fluvial (HERVE et al., 2002).

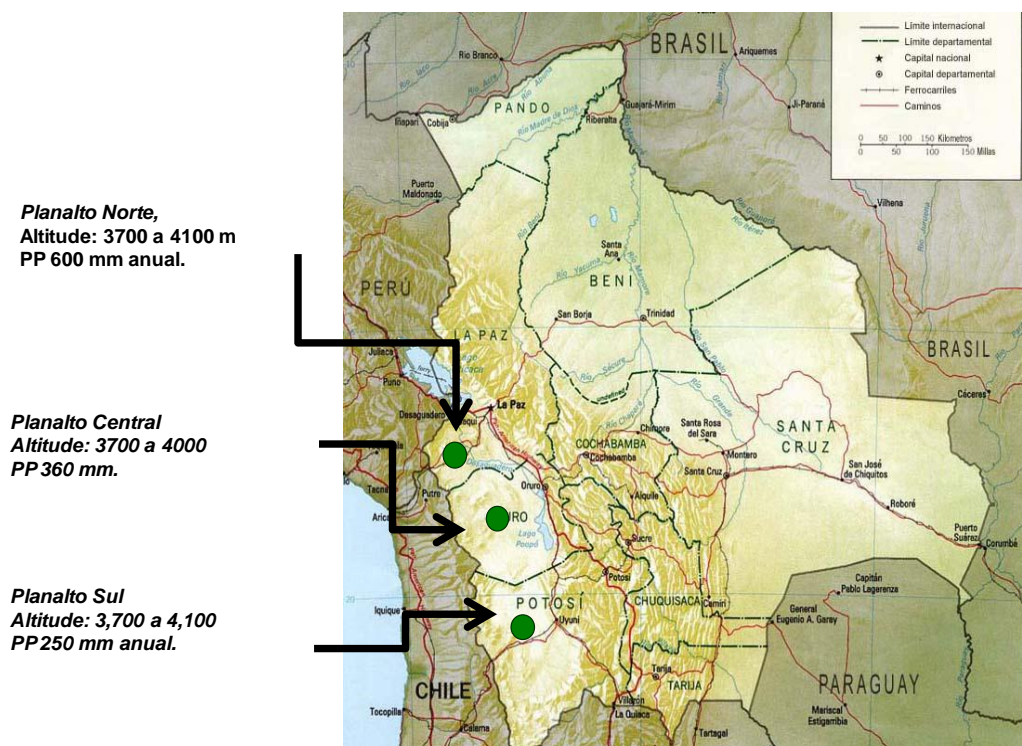


Figura 1 – Localização do Planalto Norte, Central e Sul na Bolívia.

Fonte: Adaptado de Garcia et al. (2006).

2.1.1 Condições de clima do Planalto da Bolívia

Fisiograficamente, o Planalto da Bolívia é descrito como uma planície alta, que se origina no lago Titicaca, apresentando um comprimento aproximado de 800 km e largura de 200 km. Aproximadamente 75% da superfície está compreendida em altitudes entre 3600 a 4000 metros. De acordo com Garcia et al. (2006), essa é uma região com severas restrições à atividade agrícola pelas frequentes secas,

temperaturas extremas, geadas e também com elevada demanda evaporativa da atmosfera. Apesar disso, é uma região agrícola importante, onde reside aproximadamente um quarto de toda a população da Bolívia. A altitude influencia nas baixas temperaturas, as quais diminuem gradativamente do Norte para o Sul (GARCIA et al., 2006).

No Planalto Norte, a precipitação pluvial média normal varia de 600 a 700 mm anuais, sendo que, 20 a 25% das precipitações pluviais ocorrem de Dezembro a Janeiro (SENAMHI, 2004). A temperatura média anual é de 7°C e, as máximas extremas podem atingir 25°C no verão (Dezembro a Janeiro), enquanto que as mínimas extremas podem facilmente atingir zero graus centígrados no inverno (Junho e Julho). As geadas mais intensas ocorrem com maior frequência nos meses de Março a Setembro e com menor frequência nos meses de Novembro a Fevereiro, sendo estas as com maiores riscos ocasionam na agricultura (OSCO, 2007).

O Planalto Central da Bolívia apresenta uma altitude média de 3.800 metros, a precipitação pluvial média anual é de 409 mm, com uma estação seca entre os meses de Abril a Novembro e uma estação chuvosa entre os meses de Dezembro a Março. A temperatura média anual é de 8,6°C, com a média de temperatura mínima de 0,2°C e a temperatura máxima de 17,2°C (BOTTNER et al., 2006).

O Planalto Sul tem uma precipitação pluvial média anual de 216 mm, precipitação essa distribuída entre os meses de Dezembro a Março, porém, 60% delas concentram-se no mês de Janeiro. A ausência de nuvens determina o aquecimento do ar no dia e a perda rápida de calor por irradiação à noite, fator que influencia diretamente nas variações diárias de temperatura. Assim, a temperatura média mínima extrema foi observada no mês de Julho (-10,2°C) e a temperatura média máxima foi observada no mês de Novembro (19,6°C) (INDA, 2010).

2.1.2 Características dos solos do Planalto da Bolívia

A paisagem da região Sul da Bolívia, próximo ao Salar de Uyuni, é o resultado dos processos vulcânicos que originaram serras, montanhas e planícies da cordilheira ocidental. Segundo o estudo realizado por Fautapo (2008), os solos do Sul são constituídos por materiais ígneos, embora tenham ocorrido também processos pluviais lacustres, produzindo terraços, planícies aluviais e colinas. Os solos das colinas estão numa altitude de 3.900 até 4.200 metros, sendo muito

pedregoso, o que dificulta a utilização de máquinas e implementos agrícolas, destinados para o pastoreio de ovelhas e lhamas. Estes solos variam de ligeiramente ácidos a neutros, com baixa condutividade elétrica. De acordo com a Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2006) são classificados como Torriorthens e Calciorthids. Os solos do Planalto Central da Bolívia, devido ao relevo e a textura, são suscetíveis à erosão eólica. Esses solos apresentam predominância de fragmentos rochosos, pouca cobertura vegetal e a declividade usualmente encontrada varia de 10 a 40%. Os solos localizados nas planícies possuem elevada quantidade de areia e são classificados como Haplosalids e Psamments (SOIL SURVEY STAFF, 2006). Estes solos têm origem pluvial lacustre, com a paisagem apresenta relevo topográfico relativamente plano, declividades que variam entre 1 a 4% (FAUTAPO, 2007).

2.2 O cultivo da quinua (*Chenopodium quinoa* Willd)

2.2.1 Distribuição

A produção comercial da quinua está concentrada quase que exclusivamente na América do Sul (Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Argentina e Chile), principalmente nas proximidades do lago Titicaca (TAPIA, 1979). A quinua é uma planta herbácea, com características particulares na sua morfologia, coloração e comportamento dependendo das zonas ecológicas onde se desenvolve. Apresenta grande capacidade de adaptação às condições ambientais extremas, sendo encontrada desde altitudes ao nível do mar até em zonas tropicais úmidas (MUJICA et al., 2001; BERTI, et al., 1997). A Bolívia possui o maior banco de germoplasma de quinua, com grande diversidade, e com aproximadamente 3.120 variedades.

Na última década aumentou significativamente a participação da quinua no volume de exportações bolivianas, principalmente devido à qualidade nutricional do grão. Segundo o Instituto Nacional de Estatística Boliviano (PROMUEVE, 2011), a exportação da quinua dobrou em volume desde 2004, o volume total exportado em 2004 foi de 3.435 Mg, com um valor comercial de US\$ 4,27 milhões de dólares. No ano de 2007, foi exportado um volume 8.672 Mg, resultando em um valor comercial de US\$ 13,03 milhões de dólares, principalmente para os Estados Unidos, Japão e

Europa. No ano de 2009 foi exportado um volume de 14.375 Mg, atingindo US\$ 43,15 milhões de dólares.

Na Bolívia a quinua é cultivada nos Estados de La Paz, Oruro e Potosí. A região mais produtora é o Sul da Bolívia, que compreende a região de Salinas de Garci Mendoza. Até os anos 80, a produção de quinua estava concentrada nas encostas das colinas ou em áreas marginais do Planalto da Bolívia, mas devido ao aumento na demanda do mercado e o alto valor de comercialização, este cultivo se estendeu às zonas mais planas.

Nas regiões relativamente planas, o sistema de plantio usualmente utilizado é o cultivo mecânico do solo com a remoção de toda a cobertura vegetal natural do terreno, minimizando o aparecimento de plantas invasoras durante o cultivo da quinua, pois não é recomendado o uso de herbicidas e a disponibilidade de mão de obra é reduzida para o controle manual das plantas invasoras. Dessa forma, a superfície do solo fica muito vulnerável à ação erosiva dos ventos, os quais superam, em muitos casos, a velocidade de 15 km h⁻¹. Nessa região, as precipitações pluviais são escassas, mal distribuídas e quando ocorrem, apresentam altas intensidades, potencializando os efeitos negativos da erosão superficial do solo.

2.2.2 Exigências ambientais do cultivo da quinua

A quinua, segundo Mujica et al. (2001), desenvolve-se melhor em solos francos, com uma boa drenagem e com alto teor de matéria orgânica, sendo uma planta exigente em nitrogênio e cálcio. Estes mesmos autores relatam que, a quinua é uma planta de metabolismo fotossintético C3, apresentando mecanismos morfológicos, anatômicos, fenológicos e bioquímicos que propiciam resistência às condições adversas de déficit hídrico. A temperatura ótima para o desenvolvimento da cultura está entre 12 e 20°C, podendo suportar temperaturas inferiores a 8°C em determinados estádios fenológicos, sendo mais tolerante a baixas temperaturas no estágio de ramificação e mais susceptível no estádios de floração e grão leitoso.

Em relação ao pH do solo, a cultura se desenvolve relativamente bem em solos com pH próximo de 4,5 (Região de Cajamarca, Peru) até solos com pH próximos a 9 (Salar de Uyuni, Bolívia). Segundo Bosque et al. (2000; 2003), a

quinua é uma planta halófito, que pode crescer e desenvolver-se em solos com altos conteúdos de sais; no entanto, essa característica depende da variedade utilizada.

A quinua possui diferentes mecanismos para contornar os efeitos de deficiência hídrica, apresentando mecanismos de escape e de tolerância à seca, para crescer e desenvolver-se em situações de elevado potenciais de água no solo. Esses mecanismos são caracterizados por modificações morfológicas, fisiológicas, anatômicas, bioquímicas e fenológicas (MUJICA, et al., 2001), atuando como defesa para evitar danos severos e irreversíveis as plantas.

2.2.3 Descrição botânica da quinua

A quinua é uma espécie granífera (SPEHAR; SANTOS, 2002). A quinua é uma planta anual, com caule ereto, vermelho ou verde com estrias vermelhas, inflorescência diferenciada e terminal, com ciclo variável em função da latitude e altitude de origem/local, sendo classificada como planta de dia curto. No Brasil Central seu ciclo pode variar de 80 a 150 dias (SPEHAR; SANTOS, 2002). A quinua possui doze fases fenológicas facilmente distinguíveis: germinação, duas folhas verdadeiras, quatro folhas verdadeiras, seis folhas verdadeiras, ramificação, início de emissão da panícula, emissão da panícula, prefloração, floração, grão leitoso, grão pastoso e maturação fisiológica. O ciclo fenológico depende da variedade, sendo comum um período de 180 dias.

A quinua é uma planta que pertence à família das Chenopodiaceas, a mesma da beterraba e espinafre. Apresenta raiz pivotante, vigorosa, profunda, bastante ramificada. Segundo Gandarillas (1979) a raiz pode chegar a mais de 30 cm de profundidade, com ramificações primárias, secundárias e terciárias. Mujica et al. (2001) mencionam que, dependendo do genótipo, a raiz pode alcançar profundidades de até 50 cm. De acordo com Dizès e Bonifacio (1992), o sistema radicular da quinua é menos profundo do que várias gramíneas tropicais, porém, muito ramificado e capaz de explorar de maneira satisfatória o solo e absorver a água (ainda que o potencial de água no solo seja muito baixo). Na figura 2 são apresentados detalhes do sistema radicular da quinua.



Figura 2 – Sistema radicular da quinua com 60 cm de comprimento.

O caule é cilíndrico e tem epiderme cutinizada, com pectina e celulose (MUJICA et al., 2001). As folhas são polimorfas na mesma planta e pode ter diferentes cores (verde, vermelha e púrpura). As folhas mais jovens contêm glândulas de oxalato de cálcio (Figura 3) e os botões florais se organizam em inflorescências típicas, com pontos centrais, secundários até terciários.

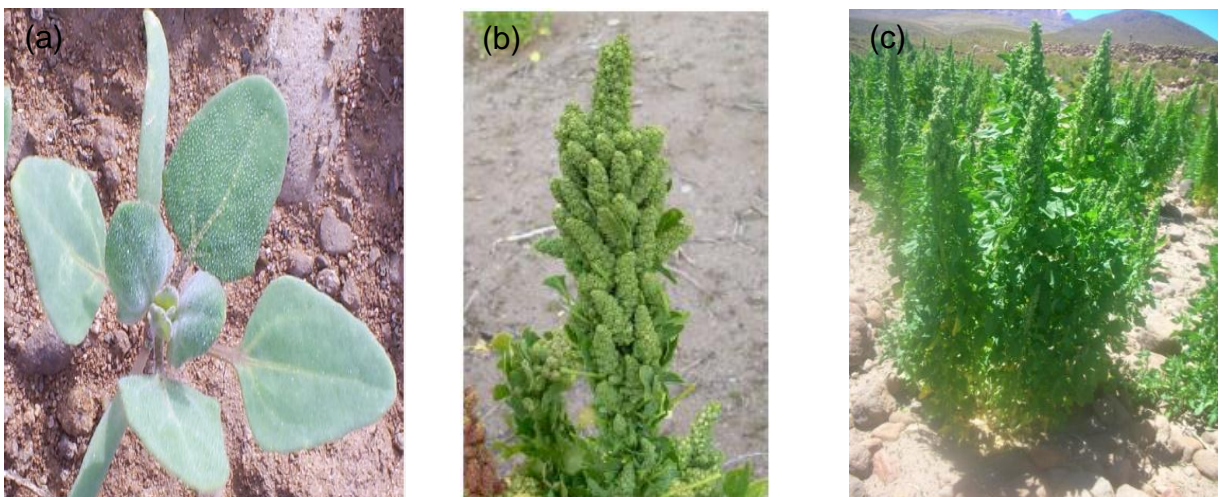


Figura 3 – Características da cultura de quinua. (a) glândulas de oxalato de cálcio (cristais brancos) sob a superfície da folha; (b) panícula de quinua, variedade Real Branca; (c) cultura da quinua produzida nas encostas do Sul da Bolívia.

A inflorescência pode estar em forma isolada (amarantiforme) ou compacta (glomerulada). As flores são incompletas, autógamias ou alógamas; a porcentagem de alogamia é diferente entre variedades e pode ser encontrado entre zero e 80%. A assincronia floral é observada nessa espécie e pode ser considerado um mecanismo

para minimizar os efeitos negativos de estresse abiótico. A floração dura entre 12 a 15 dias (ERQUINIGO, 1970) e o fruto tem forma de grão e apresenta, no ponto de colheita aproximadamente 15% de umidade (MUJICA et al., 2001).

2.2.4 Descrição nutritiva da quinua

A quinua é considerada um cultivo agrícola com múltiplos usos: podendo ser utilizada para a alimentação humana, forragem animal e, com menor frequência, é utilizada para propósitos medicinais (BERTI et al., 1997). A quinua pode ser consumida como grão, farinha, sucos, biscoitos e bolachas. Em alguns locais as folhas dessa planta são consumidas em saladas, podendo também em algumas situações substituir parcialmente o uso de carnes, devido ao seu elevado conteúdo de proteína. Calderon et al. (2010) reportam valores de proteína de até 17,5% em algumas variedades, tal como a quinua preta. Segundo Bhargava et al. (2003), este grão é o único alimento vegetal que contém dez aminoácidos essenciais para o consumo humano (isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, tirosina, triptófano, treonina, valina e histidina), apresentando teores próximos dos ideais estabelecidos pela FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação). Em síntese, apresenta características nutritivas equivalentes as do leite (PROINPA, 2002).

2.3 Adubação orgânica na produção da quinua

Devido à restrição de utilização de fertilizantes minerais para a produção de quinua no Planalto Boliviano, a adição de adubos orgânicos ao solo a ser cultivado é fundamental para a qualidade e quantidade de produção. Esses adubos orgânicos, caracterizando-se pela liberação gradativa de nutrientes, o qual pode reduzir as perdas de nutrientes pelos processos como lixiviação, fixação e volatilização, embora dependa essencialmente da taxa de decomposição, controlada pela temperatura do solo, umidade do solo, textura e mineralogia do solo, além da composição química do material orgânico utilizado (LEITE et al., 2003). É sabido que a matéria orgânica promove a retenção de cátions e fornecimento de nutrientes, além de melhorar a estrutura e a aeração, reduzindo a compactação do solo e aumentando a atividade microbiana (PRIMO et al., 2012). Segundo Geerts (2008),

para o crescimento e desenvolvimento a cultura da quinua, a exemplo de praticamente todas as culturas de elevado valor comercial, necessita de uma razoável quantidade de água disponível no solo, em especial durante alguns subperíodos do desenvolvimento das plantas, o qual pode ser preservado e armazenado no solo com incremento considerável dos níveis de matéria orgânica do solo.

O esterco do rebanho de ovelha e lhama, devido a sua disponibilidade e composição química, pode ser considerado o adubo orgânico mais importante nos sistemas de produção agrícola do Planalto Boliviano, onde a agricultura sem a utilização de agroquímicos está usualmente associada ou integrada com a criação desses animais. Também está bem documentado na literatura que a qualidade do esterco depende da espécie animal (ovino, camelídeos, suínos, etc.), da idade dos animais e das características de alimentação. Segundo Osco (2007), avaliações do esterco de ovelhas no Planalto da Bolívia indicaram um conteúdo de nitrogênio total de 0,55 a 1,95%; 0,01 a 0,31% de fósforo e entre 0,15 a 1,26% de potássio. No entanto, quando esse mesmo esterco está exposto às condições ambientais desfavoráveis, este pode perder rapidamente suas qualidades nutritivas, mesmo nas condições climáticas do Planalto Boliviano (principalmente baixa temperatura e umidade do solo).

Nesses locais onde é praticada a agricultura orgânica, não somente pela recomendação do mercado internacional de quinua, mas também pela capacidade de investimento dos agricultores, a recomendação de um manejo adequado do esterco nos estabelecimentos rurais apresenta várias vantagens, como o potencial aumento da produtividade da cultura, da fertilidade e da qualidade do solo, bem como de uma melhor sustentabilidade dos ecossistemas e a necessária preservação do meio ambiente. No entanto, é necessário levar também em consideração que grande parte dos nutrientes presentes nos fertilizantes orgânicos tornam-se assimiláveis para as plantas, somente após os processos de mineralização (YAGODIN, 1986).

A fermentação da matéria orgânica de origem animal presente no esterco é realizada para reduzir ou inativar os microrganismos patogênicos e a toxicidade desses resíduos, antes que sejam aplicados ao solo. Evidentemente, a utilização de esterco “novo”, que não está estabilizado, possibilita a ocorrência de processos fermentativos após a sua aplicação no campo, porém, isso ocasionará incrementos

na temperatura no interior dos resíduos, o que poderá inibir a germinação das sementes e o crescimento das raízes, além de possuir potencial de contaminação humana durante o processo de manipulação, ou de ser uma fonte poluente no solo (SEDIYAMA et al. 2008). Por outro lado, em praticamente todas as situações onde o mesmo for empregado, mesmo no caso de elevada altitude do Planalto Boliviano, o uso do esterco “maduro”, após os processos de fermentação e estabilização, usualmente possuem um efeito estimulador no crescimento das plantas, em função da existência de nutrientes minerais, principalmente aumentando a produção de enzimas do solo, que são catalisadores biológicos de relações específicas que desempenha um papel chave na decomposição da matéria orgânica e transformação de nutrientes (FIOREZE, 2010). Ortuño et al. (2010) propõem o uso de bioinsumos para fertilizar os solos e conseguir maiores rendimentos.

De acordo com Huanca (2008), a aplicação de esterco no momento da semeadura não incrementa diretamente a produtividade da quinua, mas, pode resultar em aumento no rendimento, devido à melhoria das condições físicas do solo. CONDORI (2007), em experimento conduzido nas condições de Planalto Sul boliviano, encontrou rendimentos de grão de quinua que não superaram os 210 kg de grão ha⁻¹, quando o autor aplicou até 2 Mg ha⁻¹ de esterco ovino. Por outro lado, em trabalhos realizados por Osco (2007) no Planalto Norte Boliviano, o rendimento da quinua foi de 1.565 kg ha⁻¹ nas condições de produção sem a adição de esterco, comparados com rendimento de grãos de 2.849 kg ha⁻¹ de quinua quando foi aplicado ao solo 12 Mg ha⁻¹ de esterco, sendo 74% maior do que a testemunha. Estes resultados experimentais sugerem que, para a produção da quinua no Planalto Boliviano é necessário monitorar os aspectos de clima e umidade do solo, além de utilizar informações do conteúdo de nitrogênio mineral do solo e da planta, pela adição de diferentes quantidades de esterco de llamas e/ou ovinos.

No Planalto Boliviano, segundo Catari (2002), a fertilização orgânica é utilizada para melhorar as condições físicas e químicas dos solos. Os agricultores utilizam usualmente de 2 a 8 Mg ha⁻¹, quando a aplicação do esterco for realizada em linhas. No entanto, quando for aplicado em covas, no momento da semeadura, poderá ser utilizado até 300 gramas cova⁻¹ (equivalente a 30 Mg ha⁻¹). Trabalhos de Fautapo (2007), mencionam que, para obter um rendimento de 2.566 kg ha⁻¹ de grão, a quinua necessita de 283 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 48 kg ha⁻¹ de fósforo e 598 kg ha⁻¹ de potássio. Por outro lado, segundo Schulte et al. (2005), o rendimento da

quinua chegaria até 3.500 Mg ha^{-1} quando são aplicados ao solo 120 kg ha^{-1} de nitrogênio. Neste caso, o índice de colheita não foi afetado pelo uso do nitrogênio, porém, o conteúdo de nitrogênio no grão aumentou. Em um trabalho conduzido por Murillo (2006), onde foi aplicado 80 kg ha^{-1} de nitrogênio, na semeadura da quinua, obteve-se um aumento significativo da produtividade, entretanto, quando as plantas foram submetidas a irrigação suplementar, a absorção desse elemento pelas plantas foi incrementada, devido principalmente, ao maior suprimento hídrico. No Chile e ao nível do mar, Berti et al. (1997), aplicaram até 225 kg ha^{-1} de nitrogênio e obtiveram rendimentos de aproximadamente 3.500 kg ha^{-1} , apresentando uma resposta quadrática da produção dessa cultura, diminuindo a eficiência do uso do nitrogênio para aplicações maiores que $225 \text{ kg de N ha}^{-1}$. Delatorre e Herrera (2003) encontraram rendimentos da quinua próximos a 5.000 Kg ha^{-1} quando combinaram a fertilização nitrogenada com irrigação por gotejamento. Neste sentido, é possível afirmar que, para obter elevados rendimentos da quinua, a exemplo de inúmeros outras culturas também é necessário possuir uma boa distribuição das chuvas e/ou da irrigação durante o ciclo de crescimento e desenvolvimento das plantas, para que a umidade no solo contribua diretamente para a mineralização do nitrogênio orgânico e a absorção pela planta. Estes trabalhos sugerem que nas condições do Planalto Boliviano e em outras regiões onde a quinua tem sido cultivada experimentalmente, para a obtenção de elevados rendimentos de grãos, além de contar com condições ambientais favoráveis, é necessário garantir níveis adequados de nitrogênio e de água no solo.

2.3.1 Dinâmica do nitrogênio e do carbono

Historicamente algumas práticas de manejo do solo são realizadas para regular a disponibilidade de nitrogênio às plantas ao longo do ciclo de desenvolvimento das mesmas. Existe um contínuo interesse científico de conhecer os efeitos das práticas agrícolas sobre a disponibilidade de nitrogênio para a grande maioria das plantas e, principalmente das culturas de potencial valor econômico (ALVAREZ, 2006). A prática do pousio, usualmente utilizada nas comunidades de produção agropastoril do Planalto Boliviano, permite assimilar nitrogênio pela vegetação natural de um ecossistema agrícola e recuperar a fertilidade natural do solo perdida ou exaurida por cultivos anteriores (ORTUNO, 2010). Ao aumentar a

prática do pousio, aumenta-se a quantidade de nitrogênio mineral no solo, o qual favorece aumentos nos processos combinados de decomposição e mineralização. O sistema de manejo do solo afeta a dinâmica da matéria orgânica, do nitrogênio e da água. É comum encontrar em diversas partes do mundo níveis mais elevados de nitrato em solos cultivados em sistemas intensivos, onde se utiliza arado de disco para o revolvimento do solo, os quais podem ser atribuídos à incorporação de resíduos no solo, realizada pela aração. Além disso, estes manejos favorecem a uma rápida decomposição e liberação de nitrogênio durante o pousio.

No planalto Boliviano, alguns equipamentos manuais de cultivo do solo (“*liukanas*”¹), têm sido ainda utilizados para revolver o solo nos cultivos em encostas. Enquanto isso, em solos de planície se utiliza implementos agrícolas atuais como o arado de disco e grade para o preparo do solo, diminuindo a cobertura vegetal e aumentando a porosidade, resultando numa mineralização mais rápida da matéria orgânica do solo. Segundo Catari (2002), os adubos orgânicos usualmente utilizados no Planalto Boliviano, são formados basicamente por uma mistura de palha e dejetos de llamas e ovinos (sólidos ou líquidos) e sua decomposição é resultado da fermentação. Yagodin (1986) relata que, a qualidade do esterco depende do tipo de alimento, do nível da decomposição, da velocidade de mineralização e das condições ambientais do solo, como aeração, atividade dos microrganismos e das condições de manejo.

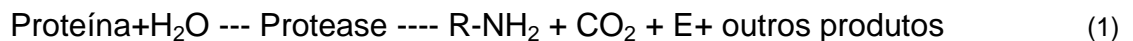
2.3.2 Mineralização, imobilização e nitrificação do nitrogênio

O nitrogênio no solo e nas plantas deve ser sempre estudado e avaliado para incrementar o potencial produtivo e a qualidade dos produtos agrícolas. Giacomini (2005) indica que, este nutriente deve ser pesquisado, sobretudo em sua dinâmica de nitrificação, desnitrificação, mineralização e imobilização. Na Bolívia, o número de trabalhos de mineralização é limitado. Salm (1983) reporta que, no Planalto Central Boliviano, a taxa de mineralização de nitrogênio mineral é de $48 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o que equivale a $0,13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Em estudo realizado por Herve et al. (2002), também no Planalto Central, foram encontradas quantidades deficientes de nitrogênio para a cultura da batata e que a aplicação do esterco somente resultou em um incremento

¹Liukanas: ferramentas manuais que servem para revolver o solo e que são ainda utilizadas no preparo do solo do Planalto Boliviano (ALANOCA et al., 2008)

significativo na disponibilidade de nitrogênio às plantas a partir do segundo ano de aplicação.

A transformação da forma orgânica para uma forma inorgânica dos nutrientes é um processo crítico. Esta conversão é realizada pelos microrganismos do solo que liberam ou mineralizam nutriente como resultado de sua atividade nutricional. Os microrganismos têm o objetivo de aproveitar o carbono e a energia presente nos compostos orgânicos. A mineralização é definida como a transformação do nitrogênio orgânico das formas orgânicas às formas inorgânicas (DA CAS, 2009). Na mineralização se produzem enzimas em diferentes processos, a fim de quebrar as ligações das proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos etc. As reações apresentadas nas equações 1 e 2 ilustram os possíveis passos no processo de mineralização (CANTARELLA, 2007):



A mineralização converte a amônia em nitrato, portanto, o amônio é produzido naturalmente na mineralização da matéria orgânica (CANTARELLA, 2007). Quando o resíduo orgânico não possui muito nitrogênio (por exemplo, os resíduos de espécies gramíneas), então, os microrganismos utilizam o nitrogênio presente no solo para sintetizar compostos nitrogenados orgânicos. Esse processo é denominado de imobilização e origina a diminuição do nitrogênio disponível para as plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). A nitrificação é um processo que consiste na oxidação do íon amônia em nitratos. O processo é aeróbico e é realizado pelas bactérias da família Nitrobacteriácea (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002).

A adição de resíduos orgânicos ao solo estimula o crescimento e a atividade da população microbiana do solo, em função da presença de energia e de carbono. Em consequência disso, a demanda de nutrientes pelos microrganismos decompositores é aumentada. A taxa de liberação de CO_2 do solo aumenta rapidamente e os nutrientes minerais, como NH_4^+ e NO_3^- são absorvidos, tornando-se imobilizados na biomassa microbiana. Porém, a evolução do C- CO_2 não pode ser considerada equivalente à decomposição, pois somente uma fração do C

decomposto é mineralizado, enquanto outra fração é assimilada pela biomassa microbiana (DA LUZ, 2007).

Há fatores que determinam a decomposição da matéria orgânica, tais como a relação carbono/nitrogênio (C/N) dos resíduos orgânicos presentes no solo. A relação C/N é um dos principais fatores controladores da velocidade do processo de decomposição, contudo, este indicador não explica isoladamente a biodegradabilidade dos resíduos vegetais (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). Outros fatores que também afetam a decomposição dos materiais orgânicos é a composição bioquímica dos mesmos, tendo em vista que os constituintes carbonados necessitam ser atacados inicialmente por enzimas extracelulares da microflora. Algumas destas enzimas são produzidas por um grande número de microrganismos, enquanto outras são produzidas por um número restrito de espécies microbianas.

2.3.3 Eficiência de uso do nitrogênio

O uso eficiente de um nutriente (EUN) representa o ganho em produção por unidade de nutriente aplicado (LOPES; GUILHERME, 2000). Segundo Ma e Dwyer (1998) a EUN é o nitrogênio recuperado do fertilizante aplicado, no entanto, outros autores comparam quanto de nitrogênio é removido do solo e acumulado no grão (BERTIN; GALLAIS, 2000). Outra situação é expressar a EUN como a assimilação de carbono ou a taxa de crescimento por unidade de nitrogênio (SAGE; PEARCY, 1987). Os dois componentes principais da EUN são a eficiência de absorção de nitrogênio e a eficiência de utilização. Sendo a segunda definida como a razão entre o rendimento da cultura e o conteúdo de nitrogênio na planta (URIBELARREA et al., 2004).

Usualmente para alcançar a sustentabilidade de um sistema de manejo em longo prazo procura-se aumentar da eficiência de uso dos nutrientes. No entanto, a sustentabilidade é determinada pelas perdas de nutrientes que ocorrem no solo (ZAGAL et al., 2010). A produtividade das culturas aumenta com a aplicação de fertilizantes, porém, a eficiência do uso dos fertilizantes deve ser considerada, devido aos altos custos e impactos ambientais da adubação. Para ter uma alta eficiência do uso do nitrogênio, é necessário observar a absorção do nitrogênio e que a sua utilização fisiológica seja eficaz para a produção de grãos. O aumento da

eficiência de utilização de nitrogênio pode ser conseguido através da seleção dos genótipos específicos (SCHULTE et al., 2005). Estes mesmos autores realizaram um estudo na Alemanha avaliando o uso eficiente do nitrogênio na cultura de quinua, testando aplicações de 0, 80 e 120 kg de nitrogênio, em duas variedades por dois anos consecutivos, encontrando valores respectivamente de 20, 23 e 21 kg de grão por kg⁻¹ de nitrogênio aplicado. Porém, na Bolívia, ainda não foram desenvolvidos trabalhos que investigassem a eficiência de uso do nitrogênio em condições de irrigação suplementar e de diferentes níveis de esterco aplicado ao solo. Há pouca pesquisa sobre a eficiência de uso do nitrogênio na cultura da quinua, mas em outros cereais, como a aveia branca, a aplicação de níveis de nitrogênio como adubo aumentou as produções de massa seca e de grãos, reduzindo a eficiência de absorção do nitrogênio, mas sem afetar a eficiência de utilização de nitrogênio (KOLCHINSKI; SCHUCH, 2003).

2.4 Irrigação suplementar e armazenamento de água no solo

A irrigação suplementar é definida como um sistema de manejo da água, baseada na aplicação de irrigação em determinados momentos do desenvolvimento da cultura ou críticos para o crescimento da cultura, complementar às chuvas (PETRY, 2000). Segundo Oweis e Hachum (2006), a irrigação suplementar é uma aplicação da água ao cultivo, quando a distribuição das chuvas durante o crescimento da cultura não atende os requerimentos hídrico das plantas. A irrigação suplementar pode ser usada satisfatoriamente em regiões onde as chuvas são mal distribuídas, como acontece no Planalto da Bolívia, sendo essa técnica recomendada na região andina (RAMOS, 2000). Em algumas regiões de produção agrícola, existem diversas restrições e/ou limitações a atividade agrícola com impacto no meio ambiente especialmente com relação à disponibilidade de água às plantas. Nestas condições, a irrigação deficitária ou suplementar pode ser utilizada como uma ferramenta para alcançar elevadas produções e produtividades (PEREIRA, et al., 2002). Quando as plantas são submetidas a condições de déficit hídrico, suas características morfológicas e fisiológicas são afetadas, porém, quando as plantas são submetidas de forma gradual ao déficit hídrico, ocorre uma adaptação nos processos morfofisiológicos das plantas (SANTOS; CARLESSO, 1998). O déficit hídrico acelera a senescência das folhas, pois o solo seco não supre as

necessidades de água e especialmente de nitrogênio, entre outros fatores, ao crescimento da cultura. Nas plantas submetidas a déficit hídrico o nitrogênio é usualmente translocado das folhas mais velhas para os pontos de crescimento.

Em condições de boa disponibilidade de água no solo, as etapas consideradas ideais para a aplicação de irrigação suplementar na quinua são as fases fenológicas de estabelecimento, pré-floração, floração e grão leitoso (GEERTS, 2008). Segundo Jensen et al. (2000), a quinua tem vários mecanismos de resistência ao déficit hídrico, que por sua vez, quando utilizados pelas plantas, resultam em manter algum nível de produtividade, o qual invariavelmente é baixa ou reduzida. No Planalto da Bolívia há reduzidos mananciais hídricos para a irrigação, não sendo possível programar a realização de irrigação durante todo o ciclo de crescimento e desenvolvimento da cultura. Alguns estudos têm demonstrado que a aplicação de água em uma ou algumas etapas críticas durante o desenvolvimento de uma cultura pode incrementar e estabilizar os rendimentos da quinua, principalmente em anos onde as chuvas são pouco frequentes (GARCIA et al., 2006; PEREIRA et al., 2002; GEERTS, 2008).

A presença de uma boa umidade do solo durante o crescimento e o desenvolvimento das plantas é importante para muitos processos físicos, químicos e biológicos que se desenvolvem no solo e nas plantas. O fato de a água ser um fator limitante para o desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, para a produtividade das mesmas, justifica a prática da irrigação. O armazenamento de água está relacionado com o espaço poroso e profundidade do solo, enquanto a disponibilidade esta associada a fatores intrínsecos do solo e da capacidade das plantas em extrair água. Na agricultura não irrigada, o aspecto mais importante está associado com a época de semeadura no período de maior disponibilidade hídrica às culturas, além da utilização de variedades resistentes a períodos de deficiência hídrica (PETRY, 2000). Uma das maneiras de avaliar a disponibilidade de água do solo às plantas é a partir de dados de capacidade de campo e do ponto de murcha permanente, sendo que estes indicadores somente devem ser utilizados como uma indicação do armazenamento de água no solo e não como da disponibilidade de água no solo às plantas. A disponibilidade de água às plantas é um dos fatores de produção que limita a produtividade com maior frequência nos cultivos agrícolas, portanto, o correto manejo desse recurso é decisivo para ter sucesso agrícola (KNIES, 2010).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para atender os objetivos propostos neste trabalho foram conduzidos quatro experimentos: um experimento foi conduzido no Planalto Sul da Bolívia, dois experimentos no Planalto Central Boliviano e um experimento no laboratório da Faculdade de Agronomia da Universidad Mayor de San Andres, cidade de La Paz. Além disso, avaliou-se pontualmente o conteúdo de água no solo nos experimentos conduzidos em nível de campo e posteriormente fez-se a simulação da lâmina de água armazenada utilizando o modelo AquaCrop (STEDUTO, 2009).

3.1 Experimento 1: Avaliação da produtividade, nitrogênio na quinua e no solo

Esse experimento foi conduzido na comunidade de Irpani, Planalto Sul da Bolívia no ano 2007/2008. Neste primeiro trabalho se utilizaram as condições de produção do produtor local, em termos de quantidade de adubo incorporado, e com irrigação suplementar somente no momento da floração das plantas de quinua.

A área está situada em Latitude 19° 38' 15" S e Longitude de 67° 40' 27" W, com altitude de 3.672 metros. O clima da região, conforme Fautapo (2008), é denominado semiárido (Ecossistema dos Planaltos), com montanhas de origem vulcânica, substrato de relictos procedentes de lagoas antigas "Inter-andinos", com forma de vida adaptadas para estas condições. A temperatura neste ecossistema varia de forma extrema, apresentando a maior variação térmica entre os meses de Maio a Agosto (Figura 4a), registrando valores que oscilam entre -10°C e 15°C durante o dia e noite, respectivamente. A precipitação pluvial média anual da região varia de 200 a 250 mm, os quais se distribuem principalmente nos meses de Dezembro até Março (Figura 4b).

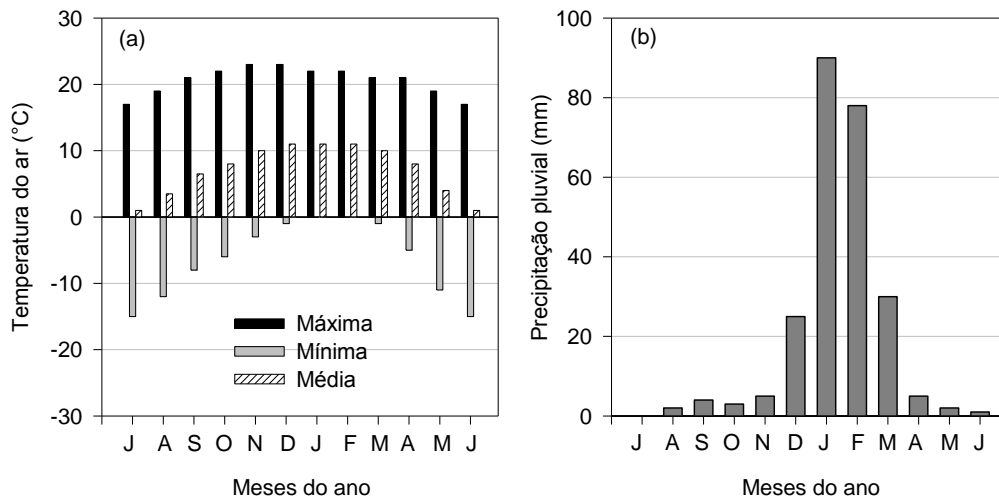


Figura 4 – Normais climatológicas da temperatura máxima, mínima e média (a) e distribuição mensal da precipitação pluvial ao longo dos meses do ano (b), no Planalto Sul da Bolívia. (Adaptado de SENAMHI, 2004).

O solo do local está classificado como Psamments (SOIL SURVEY STAFF, 2006). Apresenta 80% de areia e baixos conteúdos de matéria orgânica (0,7 – 0,1%), e o nitrogênio total varia entre 0,01 a 0,03% (Tabela 1).

Tabela 1 – Características químicas e físicas do solo do Planalto Sul Boliviano, comunidade de Irpani.

Horizonte	Profundidade	Ca	Mg	K	Na	SB	CTC	MO	Nt
	cm								
Ap	0 – 20	2,20	0,66	0,28	0,37	3,51	3,52	0,78	0,03
C1	20 – 38	2,22	1,40	0,32	0,38	4,32	4,32	0,50	0,03
C2	> 38	3,47	1,94	0,28	0,44	6,13	6,12	0,10	0,01

Horizonte	Profundidade	Areia	Argila	Silte	Classe Textural	pH: água	P
	cm						
Ap	0 – 20	64	14	22	Franco arenoso	7,51	21,00
C1	20 – 38	82	7	11	Areia Franca	7,45	12,00
C2	> 38	85	6	9	Areia Franca	7,43	3,11

Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; Na: sódio; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; MO: matéria orgânica; Nt: nitrogênio total e P: fósforo.

As características do esterco utilizado no experimento estão apresentadas na tabela 2, sendo que o conteúdo de água médio do esterco de ovelha foi de 46,25%.

Tabela 2 – Características químicas do esterco utilizado no experimento conduzido no Planalto Sul Boliviano, comunidade de Irpani.

Parâmetro	MO	CO	Nt	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	C/N
	%								
Conteúdo	27,3	15,85	1,17	1,14	0,55	2,30	0,44	0,11	13,5

MO: matéria orgânica; CO: carbono orgânico; Nt: nitrogênio total; P₂O₅: fósforo; K₂O: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Na: sódio; C/N: relação carbono/nitrogênio.

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, bifatorial 2x4, com quatro repetições. O fator A foi constituído pelo manejo de irrigação, (IS: com irrigação suplementar; SI: sem irrigação suplementar) e o fator B por diferentes níveis de adubação orgânica (0, 4, 8 e 12 Mg ha⁻¹ de esterco de ovelha em massa úmida).

A semeadura foi realizada no dia 23 de novembro de 2007, a densidade de plantas foi de aproximadamente 25.000 plantas por hectare, espaçadas em 0,5 metros entre plantas e 0,8 metros entre linhas. Cada unidade experimental apresentava área superficial de 40 m², totalizando uma área total de 1.470 m². Utilizou-se a cultivar “Toledo”, a qual apresenta um ciclo de desenvolvimento de aproximadamente 180 dias. O controle de doenças foi realizado com *Succes* (produto biológico antifúngico), na dosagem de 67 ml ha⁻¹, dissolvidos em 20 litros de água, aplicado no mês de Fevereiro, quando as plantas estavam no estágio de floração.

Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura houve um total 250 mm de precipitação pluvial, sendo que, 159 mm destes foram concentrados no mês de Janeiro. Irrigações suplementares foram realizadas a partir do início da floração da cultura (20 de Fevereiro). Foram aplicados 66 mm de irrigação, divididos em três irrigações de 22 mm, em intervalos de três dias. As irrigações foram realizadas através de bacias de contenção (as bacias foram construídas antes da irrigação, sendo uma bacia de contenção para cada planta). A água utilizada para irrigação foi retirada de um poço localizado aproximadamente 5 km da área experimental e armazenada em uma cisterna móvel até o momento da irrigação. Logo após a semeadura foi realizada uma irrigação de 30 mm, em todas as parcelas, elevando o conteúdo de água do solo próximo à capacidade de campo (0,20 g g⁻¹).

O esterco de ovelha foi obtido da mesma comunidade, em um curral, onde o material foi acumulando durante o período de um ano. A profundidade de coleta foi

de 40 cm. Após sua retirada, o esterco foi homogeneizado com uma pá. O esterco foi aplicado em níveis de 0, 4, 8 e 12 Mg ha⁻¹ de massa úmida, representando 0; 2,28; 4,56 e 6,54 Mg ha⁻¹ de esterco seco, respectivamente, e de 0; 27; 66 e 98 kg ha⁻¹ de nitrogênio total, considerando-se porcentagem de nitrogênio total no esterco de 1,17% (Tabela 2).

Para a determinação do nitrogênio total do solo foram instalados dois tubos de PVC de 10 cm de diâmetro e 25 cm de comprimento, na linha de semeadura, entre as plantas de quinua (Figura 5), para coletar amostras do solo sem a influência do sistema radicular das plantas, seguindo a metodologia utilizada por Joffre (1990). Um tubo de PVC foi mantido com a extremidade superior aberta, para que o solo no seu interior sofresse a influência das chuvas enquanto que, o outro tubo de PVC foi fechado na extremidade superior, para evitar o ingresso da água. Em cada parcela foram retiradas amostras de solo em três situações: (i) a 10 cm no interior do tubo (com a influência das chuvas e das raízes); (ii) amostras de solo do interior do tubo fechado (sem influência das chuvas e das raízes) e; (iii) amostras de solo do interior do tubo aberto (com influência das chuvas, mas sem influência das raízes das plantas).

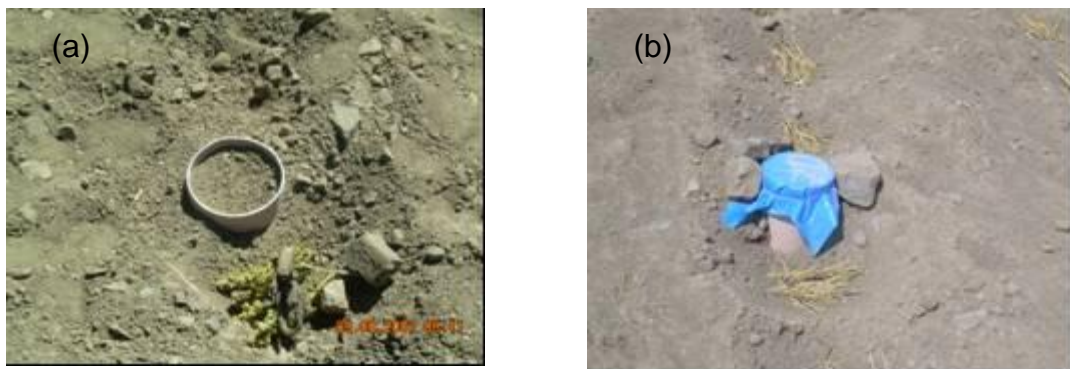


Figura 5 – Tubos de PVC de 10 cm de diâmetro e 25 cm de comprimento, instalados próximo às plantas de quinua, (a) tubo aberto na parte superior; (b) tubo fechado para evitar o ingresso da água da chuva e as raízes, em experimento conduzido no Planalto Central Boliviano, comunidade de Irpani.

A amostragem do solo foi realizada em três datas: antes da semeadura (22 de Novembro); durante o desenvolvimento da cultura (119 dias após de semeadura - DAS, no dia 18 de Março de 2008) e, após a colheita (209 DAS, no dia 14 de Junho 2008). As amostras foram enviadas ao laboratório do Instituto Boliviano de Tecnologia e Energia Nuclear (IBTEN) para a determinação de nitrogênio total do

solo, utilizando-se o método de Kjeldahl (SALAZAR-SOSA et al., 2003), sendo os resultados expressos em porcentagem.

Neste experimento avaliou-se a produtividade da quinua, matéria seca total, índice de colheita, teor de nitrogênio no grão e na planta, nitrogênio total no solo, acumulação de nitrogênio no grão e na planta, rendimento de nitrogênio e eficiência de utilização de nitrogênio (EUN).

A colheita foi realizada em 25 de Abril (aos 155 DAS), quando a cultura estava no estágio de final de enchimento de grãos, não atingindo a maturação fisiológica (que ocorreria próximo dos 180 DAS). A colheita teve que ser realizada antecipadamente devido à ocorrência de temperaturas negativas e geadas que estavam danificando a cultura e impedindo que a mesma completasse seu ciclo de desenvolvimento. A produtividade de grãos da quinua foi avaliada coletando-se todas as plantas de uma área de 2 m² (de 4 a 5 plantas), sendo os grãos limpos e secos e corrigidos para a umidade de 10% e, então, pesados. Os resultados foram expressos em kg ha⁻¹.

Para a determinação da matéria seca total utilizou-se as mesmas plantas que foram coletadas para a determinação do rendimento de grãos. As diferentes partes da planta foram isoladas em grãos, caule e folhas, colocadas em envelopes de papel e levadas para estufa a 65 °C por 48 horas. Após a secagem, realizou-se a pesagem em balança de precisão, sendo os resultados expressos em kg ha⁻¹.

O índice de colheita (IC) foi determinado pela relação entre o rendimento de grãos e a matéria seca total das plantas, desconsiderando-se as raízes e as folhas senescentes. Este parâmetro foi determinado conforme a equação a seguir:

$$IC = \frac{\text{Rendimento de grãos (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Matéria seca (kg ha}^{-1}\text{)}} \quad (3)$$

Para a determinação do nitrogênio nos grãos utilizou-se amostras de grãos de todas as parcelas com níveis de esterco e irrigação suplementar. A análise de nitrogênio foi realizada nos laboratórios do IBTEN (Instituto Boliviano de Tecnologia e Energia Nuclear).

A extração de nitrogênio no grão e na planta foi calculada através da produtividade de grãos e de matéria seca total (kg ha⁻¹) e multiplicada pela

concentração de nitrogênio no grão e na planta (%). Os dados foram expressos em kg ha^{-1} .

A eficiência do uso do nitrogênio (EUN) corresponde à quantidade de grãos produzida por unidade de nitrogênio absorvido (ALVAREZ, 2006). O requerimento de nitrogênio é o inverso desta eficiência e representa a quantidade de nitrogênio que a cultura absorve para formar uma megagrama de grão ha^{-1} . Para determinar estes parâmetros utilizou-se as seguintes equações:

$$EUN_g = \frac{\text{Rendimento de grãos (kg grão ha}^{-1}\text{)}}{\text{Assimilação de nitrogênio pelo grão (kg N ha}^{-1}\text{)}} \quad (4)$$

$$EUN_{MS} = \frac{\text{Rendimento de massa seca (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Extração de Nitrogênio pela massa seca (kg N ha}^{-1}\text{)}} \quad (5)$$

$$RN = \frac{\text{Extração de Nitrogênio pelos grãos (kg N ha}^{-1}\text{)}}{\text{Rendimento de grãos (Mg grãos ha}^{-1}\text{)}} \quad (6)$$

Onde: EUN_g representa a eficiência de uso do nitrogênio pelo grão (kg de grão por kg de N^{-1}); EUN_{MS} representa a eficiência de uso do nitrogênio da matéria seca (kg de matéria seca por kg de N^{-1}); RN é o requerimento de nitrogênio (kg de nitrogênio por Mg de grão⁻¹).

3.2 Experimento 2: Efeito da época e níveis de aplicação de esterco de ovelhas na cultura da quinoa

Através do projeto QuinAgua, da Faculdade de Agronomia da cidade de La Paz, Bolívia, são desenvolvidas pesquisas no Planalto Sul e Central desde o ano 2006, aplicando adubo orgânico no momento da semeadura na cultura da quinoa. Avaliando vários resultados desses experimentos previamente conduzidos, verificou-se que em alguns casos, a testemunha (sem a aplicação de adubação orgânica ou mineral) apresentava maiores rendimentos que os tratamentos onde se aplicava o adubo orgânico. Baseado nestes antecedentes, decidiu-se aplicar o esterco de ovelha alguns meses antes da semeadura, avaliando-se as épocas de aplicação do esterco na produtividade da quinoa, com aplicações de 15 e 30 Mg ha^{-1} de esterco.

O experimento foi conduzido no Planalto Central Boliviano, na estação experimental de Patacamaya, da “Universidad Mayor de San Andrés”, localizada na

província Aroma, no Estado de La Paz. A área esta situada em Latitude de 17° 15' 57" S, Longitude de 67° 56' 7" W, e altitude de 3.799 metros (HERVE; BECK, 2006). As temperaturas mínimas extremas podem atingir até -10° C e as precipitações pluviais atingem valores médios de 350 a 400 mm anuais, ocorrendo normalmente entre os meses de novembro à fevereiro (Figura 6).

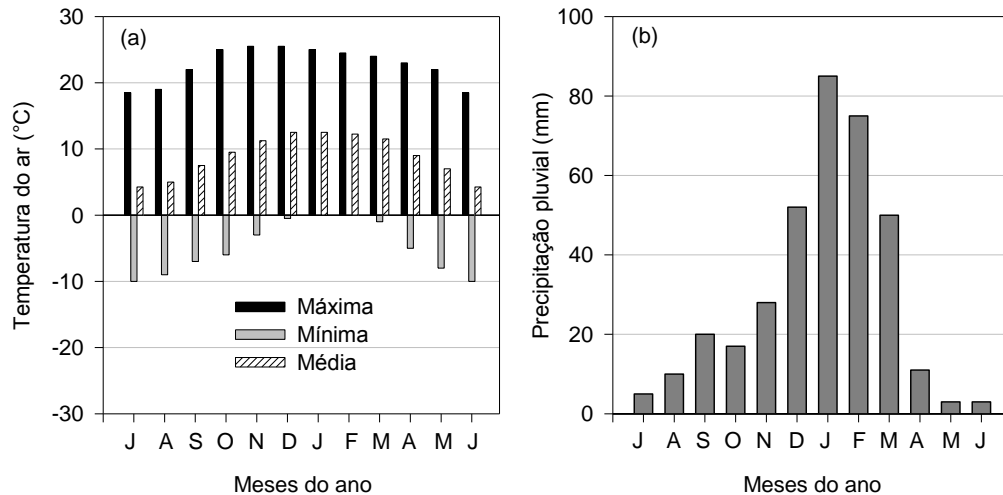


Figura 6 – Normais climatológicas da temperatura máxima, mínima e média (a) e distribuição mensal da precipitação pluvial ao longo do ano (b), no Planalto Central da Bolívia (Adaptado de SENAMHI, 2004).

O solo do local onde foi instalado o experimento está classificado como Inceptisol, segundo a Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2006) e apresenta uma camada argilosa, sendo suas características físicas e químicas descritas na tabela 3. O esterco de ovelha utilizado apresentava 37,8% de matéria orgânica, 21,9% de carbono, 0,95% de nitrogênio total e uma relação C/N de 23,1 (Tabela 4).

O delineamento experimental utilizado foi o blocos ao acaso, trifatorial 3x2x3 (épocas de aplicação do esterco x manejo da irrigação x nível de esterco), com três repetições, totalizando 18 tratamentos e um total de 54 unidades experimentais. O fator A foi constituído pela época de aplicação do esterco (Maio, primeira aplicação; Julho, segunda aplicação e Setembro, terceira aplicação). O fator B foi constituído pelo manejo de irrigação (SI: sem irrigação e IS: com irrigação suplementar). O fator C foi constituído de níveis de esterco de ovelha aplicado ao solo (0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de esterco seco). Cada unidade experimental apresentava área superficial de 60 m².

Tabela 3 – Características químicas e físicas do solo do local do experimento no Planalto Central Boliviano, Comunidade de Patacamaya.

Horizonte	Profundidade	Ca	Mg	K	Na	SB	CTC	MO	Nt
	cm								
Ap	0 – 15	2,92	0,79	0,61	0,18	4,50	4,62	0,72	0,06
Bt	15 – 48	10,08	3,10	0,89	0,50	14,57	14,69	0,83	0,10
C	> 48	17,65	4,47	1,60	1,28	25,00	25,00	0,60	0,07

Horizonte	Profundidade	Areia	Argila	Silte	Classe Textural	pH água	P
	cm					%	
Ap	0 – 15	59	25	16	Franco Arenoso	5,65	40,74
Bt	15 – 48	32	64	4	Argilosa	6,34	7,87
C	> 48	22	76	2	Argilosa	7,29	6,76

Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; Na: sódio; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; MO: matéria orgânica; Nt: nitrogênio total e P: fósforo.

Tabela 4 – Características químicas do esterco de ovelha utilizado no experimento conduzido no Planalto Central Boliviano, comunidade de Patacamaya.

Parâmetro	MO	C.O.	Nt	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	C/N
	%								
Esterco Ovino Patamacaya	37,8	21,94	0,95	0,25	0,90	0,72	0,18	0,07	23,1

MO: matéria orgânica; CO: carbono orgânico; Nt: nitrogênio total; P₂O₅: fósforo; K₂O: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Na: sódio; C/N: relação carbono/nitrogênio.

A semeadura da quinua foi realizada em 20 de Outubro de 2009, com densidade de plantas de 40.000 plantas ha⁻¹, utilizando-se distância entre sulcos de 0,5 metros e 0,5 metros entre plantas, com sementes da variedade “Blanquita”, que apresenta ciclo desenvolvimento médio de 180 dias. O controle de doenças foi realizado como o produto *Succes*, aplicados nos meses de fevereiro e março. A colheita foi realizada em 01 de Maio de 2010.

O adubo orgânico foi obtido de ovelhas da comunidade de Romero Pampa e possuía teor de umidade entre 20 e 25%. Os valores de umidade foram levados em consideração para que fossem efetivamente aplicados ao solo 15 e 30 Mg de esterco ha⁻¹. O esterco foi aplicado ao solo nos meses de Maio, Julho e Setembro, sendo incorporado em sulcos até uma profundidade de 0,20 metros. As quantidades de nitrogênio total incorporado ao solo com a dose de 15 e 30 Mg ha⁻¹ foram de aproximadamente 142 e 284 kg ha⁻¹, respectivamente.

Antes da semeadura da quinua (20 de Outubro) foi realizada uma primeira irrigação por sulcos, com lâmina de água de 30 mm, em todas as parcelas, elevando

o conteúdo de água do solo próximo à capacidade de campo ($0,20 \text{ g g}^{-1}$). A capacidade de campo e o ponto de murcha foram determinados utilizando-se o programa AquaCrop, a partir dos dados de textura do solo. Nas parcelas submetidas ao tratamento com irrigação suplementar, além desta irrigação, foram aplicados 37 mm de água na etapa de floração e 30 mm na etapa de grão leitoso, totalizando 67 mm, seguindo a recomendação de Geerts (2008), que trabalhou com laminas de água e irrigação deficitária nesta comunidade no ano 2006 e 2007.

Avaliou-se o rendimento de grãos, produção de matéria seca, índice de colheita, teor de nitrogênio no grão, no caule e na folha, desconsiderando-se o nitrogênio da raiz. Com esses dados calculou-se a extração de nitrogênio no grão e na planta, requerimento de nitrogênio e eficiência de uso de nitrogênio.

3.3 Experimento 3: Avaliação do nitrogênio mineral em dois tipos de solo com diferentes tipos de cobertura com resíduos vegetais

Este trabalho foi realizado com objetivo de avaliar os conteúdos de nitrogênio mineral (NH_4^+ e $NO_2^-+NO_3^-$) em um solo com 5% de argila (areia franca) e em um solo com 20% de argila (franco argilo arenoso), com dois tipos de cobertura. A pesquisa foi realizada no Planalto Central da Bolívia, em Patacamaya, no ano de 2011. A área experimental está situada na Latitude $19^\circ 38' 15''$ S, Longitude $67^\circ 40' 27''$ W e altitude de 3.672 metros, com clima seco (FAUTAPO, 2008). A precipitação pluvial média anual é de 409 mm, com estação seca nos meses de Abril e Novembro e época com chuvas de Dezembro a Março. A temperatura media anual é de 10°C , mas a região é influenciada pelas temperaturas mínimas extremas.

O experimento foi conduzido em dois tipos de solo (Tabela 5) e dois tipos de cobertura vegetal na superfície. Ambos os solos foram classificados conforme o sistema da Soil Taxonomy, como Inceptisols (SOIL SURVEY STAFF, 2006).

Tabela 5 – Características físicas e químicas de dois tipos de solos onde foi conduzido o experimento no Planalto Central Boliviano, comunidade de Patacamaya.

Classe Textural	Areia	Silte	Argila	pH	CTC	MO	Nt
	%				cmol _c kg ⁻¹	%	
Areia Franca	82	13	5	6,4	6,1	0,70	0,025
Franco argilo arenoso	66	14	20	6,9	10,4	0,82	0,060

CTC: capacidade de troca de cátions; MO: matéria orgânica; Nt: nitrogênio total;

Os quatro tratamentos consistiram de duas classes de textura do solo: areia franca (AF) e solo franco argilo arenoso (FarA) e; dois tipos de cobertura (solo AF+resteva de quinua e solo AF+festuca; solo FarA+resteva de batata e solo FarA+festuca). A análise estatística feita por comparação de médias.

A amostragem do solo foi realizada na linha de cultivo, a cada dois metros, sendo coletadas três amostras de solo na profundidade de 0,10 metros, utilizando-se um trado helicoidal (Figura 7).



Figura 7 – Ilustração da amostragem nos dois tipos de solo para a determinação de nitrogênio mineral no Planalto Central Boliviano, no ano 2011.

As épocas de amostragem foram: 10 de Maio, 12 de Julho, 06 de Setembro e 07 de Novembro de 2011. Em cada parcela foram coletadas amostras compostas, retirando-se os restos vegetais sobre o solo, as quais foram colocadas em sacolas e transportadas para o laboratório para serem imediatamente peneiradas em malha de 2 mm. Realizou-se a determinação da umidade do solo no momento da coleta das

amostras e, na mesma amostra, foi também determinado o teor de nitrogênio mineral (amônio e nitratos) seguindo a metodologia de Tedesco et al. (1995).

Foram coletadas amostras para a determinação do nitrogênio total no início e no final do período experimental, com a finalidade de correlacionar o nitrogênio mineral e nitrogênio total para as duas classes de textura do solo. O teor de nitrogênio mineral do solo franco arenoso foi comparado com o teor do solo franco argilo arenoso pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro.

Os teores de nitrogênio mineral do solo (NH_4^+ , $NO_2^-+NO_3^-$) foram determinados nos Laboratórios da Faculdade de Agronomia de La Paz, na Bolívia, utilizando-se o método Kjeldhal, a partir de uma amostra de 25 gramas de solo, previamente peneirada em malha de 2 mm e homogeneizada. A amostra foi umedecida até a capacidade de campo ($0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e foi adicionado 100 ml de KCl 1N, para a extração do nitrogênio mineral, com agitação por 30 minutos. Após a agitação, o material permaneceu em repouso por 30 minutos, sendo então retirada uma alíquota de 20 ml de sobrenadante, na qual foram adicionadas 0,2 g de óxido de magnésio para a determinação no nitrogênio amoniacal em destilador de vapores do tipo semimicro Kjeldhal. O destilado (35 – 50 ml) foi recolhido em frasco onde previamente foram adicionados 5 ml de ácido bórico. Após o resfriamento da amostra, adicionou-se 0,2 g de Liga Devarda, para nova destilação e novamente recolhido em frasco com 5 ml de ácido bórico, para posterior determinação do nitrogênio na forma de $NO_2^-+NO_3^-$. O nitrogênio mineral foi determinado utilizando a seguinte fórmula:

$$Nm = \frac{(A - B) \times 14 \times 1000}{S} \quad (7)$$

Onde: A é o gasto de H_2SO_4 para titular a amostra (ml); B é o gasto de H_2SO_4 para titular o teste em branco (ml); N é a normalidade de H_2SO_4 ; 14 representam os mili equivalentes do nitrogênio; 1000 é um fator de correção para transformar as gramas de solo em quilogramas e, S é o peso da amostra, em gramas. Para comparar o teor de nitrogênio mineral do solo entre os tratamentos foi realizado o teste t, em nível de 5% de probabilidade de erro.

3.4 Experimento 4: Mineralização de nitrogênio e carbono

O quarto experimento foi desenvolvido no Laboratório da Faculdade de Agronomia da Universidade Maior de San Andrés, no ano 2010/11. Ele constou de uma incubação em condições de laboratório e foi conduzido para avaliar a

mineralização do nitrogênio e do carbono do esterco de ovelha no solo, através da determinação dos teores de N mineral do solo (NH_4^+ e NO_3^-) e da evolução de CO_2 , respectivamente.

O solo na incubação foi coletado na comunidade de Patacamaya, no Planalto Central, sendo suas características físicas e químicas apresentadas na tabela 6. O solo do local está classificada como Inceptisol (SOIL SURVEY STAFF, 2006).

Tabela 6 – Características físicas e químicas da camada superficial do solo franco arenoso, coletado no Planalto Central boliviano e utilizado no trabalho de laboratório.

Horizonte	Profundidade	Argila	Areia	Silte	pH em água	MO	Nt	P
	cm	%			1:5	%		mg kg ⁻¹
Ap	0 – 20	60	17	23	6,75	0,9	0,04	15

MO: matéria orgânica; Nt: nitrogênio total; P: fósforo disponível

O esterco de ovelha foi coletado em um curral da comunidade de Callapa, no Planalto Central. Após o peneiramento em malha de diâmetro 3,5 mm o esterco foi submetido à secagem e analisado. As características químicas do esterco utilizado estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 – Características químicas do esterco de ovelha utilizado no experimento conduzido em laboratório.

Parâmetro	MO	C.O.	Nt	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	C/N	CE
	%									mS cm ⁻¹
Conteúdo	14,1	8,14	0,84	0,2	0,69	0,77	0,12	1,53	9,7	4,87

MO: matéria orgânica; C.O.: carbono orgânico; Nt: nitrogênio total; P₂O₅: fósforo; K₂O: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Na: sódio; C/N: relação carbono/nitrogênio; CE: condutividade elétrica

Os tratamentos constaram de doses de esterco de ovelhas (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 30 Mg ha⁻¹) e o delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com três repetições, totalizando 168 unidades experimentais (Figura 8). As unidades experimentais foram constituídas por frascos de acrílico com capacidade de 110 ml. Para a avaliação da mineralização do N, foram adicionados três frascos de acrílico no interior de frascos de vidro com capacidade de 1.500 ml, com rosca e tampa plástica (Figura 8a). As unidades destinadas à avaliação de CO_2 foram acondicionadas individualmente em potes de vidro com tampa de pressão,

que apresentava capacidade de 750 ml (Figura 8b). Todas as unidades experimentais foram mantidas em incubadora, na ausência de luminosidade e a uma temperatura que variava de 13 a 15°C. A avaliação do nitrogênio mineral foi realizada após 1, 15, 22, 29, 43, 57 e 71 dias do início da incubação, enquanto que a evolução do CO₂ foi avaliada após 1, 8, 16, 23, 34, 48, 62, 76 e 92 dias.

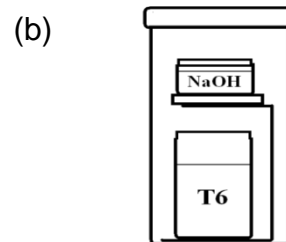
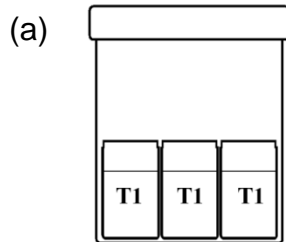


Figura 8 – Preparação de amostras de solo em frascos de vidro: (a) para determinação de nitrogênio mineral; (b) determinação do CO₂, no experimento conduzido no laboratório da Faculdade de Agronomia da Universidad Mayor de San Andres, La Paz, Bolívia, 2010.

O solo da incubação foi coletado na camada 0 a 10 cm de uma área cultivada com quinua. Após a coleta, o solo foi transportado para o laboratório em embalagens plásticas, peneirado em peneira com malha de 2 mm, homogeneizado, acondicionado em embalagens plásticas pretas e, posteriormente, armazenado em temperatura ambiente por aproximadamente uma semana, até o momento da incubação.

Da mesma forma, o esterco foi obtido de um curral de ovelhas e transportado ao laboratório, onde foi peneirado numa malha de 3.5 mm. Logo o esterco foi misturado com o solo em frascos de 110 ml, em doses de 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 30 Mg ha⁻¹. Simultaneamente foi preparado outro frasco somente com esterco, somente para comparar os resultados. Os tratamentos foram acondicionados em incubadora,

na ausência de luz e sob temperatura de 13 a 15°C. A umidade do solo foi corrigida para aproximadamente 80% da capacidade de campo ($0,204 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e mantida neste nível através da adição periódica de água. Os frascos foram abertos a cada 2 a 3 dias por 15 minutos, aproximadamente, para que fossem possíveis as trocas gasosas entre o solo e atmosfera e, assim, favorecer a oxigenação. Em cada data de amostragem foram analisados o nitrogênio mineral amoniacal (NH_4^+) e nitritos mais nitratos ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$), sendo os resultados expressos em mg kg^{-1} de solo.

Foram avaliados os teores de amônio, nitratos (TEDESCO, 1995), taxa de mineralização do nitrogênio, mineralização do carbono e a relação carbono nitrogênio.

Os teores de nitrogênio mineral do solo foram determinados após a montagem dos tratamentos. Foram retirados 12,5 gramas de solo úmido homogeneizado em 50 ml de KCl 1 N e posterior agitação durante 30 minutos em um agitador. Após a agitação, a solução ficou em repouso por 30 minutos, sendo retirada uma alíquota de 20 ml do sobrenadante, na qual se acrescentou 0,2 gramas de óxido de magnésio para determinação do nitrogênio amoniacal em destilador de vapores do tipo semimicro Kjeldhal. Após o resfriamento da amostra, adicionou-se 0,2 gramas de Liga de Devarda, para nova destilação e determinação do nitrogênio nítrico que era recebido num frasco que continha 5 ml de ácido bórico e titulado com H_2SO_4 0,005 N.

A taxa de mineralização foi avaliada a partir da variação nas quantidades de amônio e nitratos no solo em cada data. Os valores positivos foram considerados como liberação de nitrogênio mineral e valores negativos como imobilização. A taxa de nitrificação foi determinada entre o dia 57 e 71 após a incubação, (data em que se observou a mineralização), sendo calculada pela seguinte expressão:

$$TN = \frac{N_2 - N_1 \text{ (mg kg}^{-1} \text{ de N)}}{t_2 - t_1 \text{ (dias)}} \quad (8)$$

Onde: TN é a taxa de nitrificação ($\text{mg de nitrogênio mineral kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). N_1 e N_2 representam as quantidades de nitrogênio mineral no início e no final de cada período de avaliação; t_1 e t_2 representam o período de tempo, em dias.

Para a determinação do CO_2 , o gás liberado em cada tratamento foi capturado em 10 ml de uma solução de NaOH 1N, colocada em frascos de vidro com capacidade de 50 ml, suspenso na parte superior de cada frasco. O excesso de

NaOH em cada intervalo de coleta foi titulado com uma solução de HCl 0,5 N, após precipitação do carbonato com uma solução de BaCl₂ 1M. A quantidade de carbono mineralizada foi calculada em cada data de avaliação através da equação:

$$CO_2 = (B - V) \times N \times E \quad (9)$$

Sendo: B o volume (mililitros) de ácido necessários para titular o NaOH na prova em branco; V o volume de ácido necessário para titular o NaOH do tratamento; N é a normalidade do ácido e E é o peso equivalente do CO₂ (12+16*2) = 44/2 = 22.

A velocidade de mineralização do C (V_{mc}) foi calculada, em cada data de avaliação, através da seguinte equação:

$$V_{mc} = \frac{CO_{2ro} - CO_{2s}}{C_{ad} \times t} \times 100 \quad (10)$$

Sendo: V_{mc} a velocidade de mineralização do C (% do C adicionado dia⁻¹); CO_{2ro} e CO_{2s} as quantidades de CO₂ emitidas (mg kg⁻¹) nos tratamentos com uso do resíduo orgânico (esterco de ovelha) e no tratamento testemunha (apenas com solo), respectivamente; C_{ad} é o C adicionado (mg kg⁻¹) com os resíduos orgânicos em cada tratamento e, t o tempo, em dias.

3.5 Simulação da variação do conteúdo de água no solo usando o modelo AquaCrop

A umidade do solo foi determinada nos experimentos instalados a campo no Planalto Sul e Central da Bolívia, sendo que, no experimento instalado no Planalto Sul utilizou-se uma sonda TDR, o qual esteve instalado na camada de 0 - 0,2 m. As determinações foram realizadas ao longo do ciclo da cultura. No experimento instalado no Planalto Central da Bolívia (na localidade de Patacamaya), o teor de umidade do solo foi determinado pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 1997) na camada de 0 – 0,20 m de profundidade, em 12 épocas de avaliação.

Realizou-se a modelagem do conteúdo de água no solo utilizando-se o modelo AquaCrop (STEDUTO, 2009) correlacionando os valores simulados pelo modelo com os dados de umidade volumétrica observados no campo. Os dados de entrada do modelo, para a adequada simulação dos resultados são constituídos de parâmetros de solo, clima e cultivo. Os dados de temperatura e precipitação pluvial foram obtidos do Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia (SENAMHI, 2004) e

diretamente das estações meteorológicas instaladas nos locais onde os experimentos de campo foram instalados. A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pela equação de Penman Montith (ALLEN et al., 2006). A densidade do solo foi determinada com o método do cilindro volumétrico (EMBRAPA, 1997), para transformar os valores de umidade gravimétrica em umidade volumétrica do solo. Os valores do conteúdo de água na capacidade de campo e o ponto de murcha permanente foram estimados pelo modelo AquaCrop através dos dados de textura do solo.

3.6 Análise estatística

Os resultados da matéria seca, produtividade de grãos, índice de colheita, nitrogênio total no grão e solo, nitrogênio mineral e carbono do solo foram submetidos a análise de variância ($p < 0,05$) e as médias dos tratamentos foram comparados utilizando-se o teste de Tukey e análise de regressão em nível de 5% de probabilidade de erro, utilizando-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento 1: Produtividade de grãos da quinua, produção de massa seca e acúmulo de nitrogênio com aplicação de diferentes quantidades de esterco de ovelha

4.1.1 Produtividade de grãos de quinua

As condições meteorológicas verificadas em Irpani, durante o ano 2007/08, apresentaram um comportamento atípico, com ocorrência de chuvas no mês de Janeiro e fortes geadas no mês de Março. Em alguns dias, a temperatura mínima esteve abaixo de zero grau (Figura 9), fato que motivou a antecipação da colheita, de 20 de Maio para 25 de Abril. A antecipação da colheita resultou em uma adicional redução no rendimento de grãos.

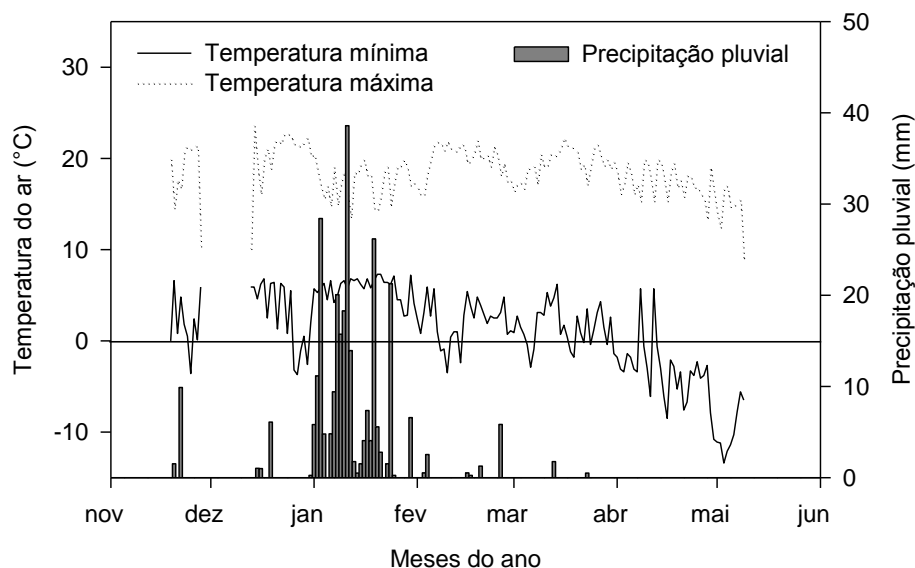


Figura 9 – Precipitação pluvial, temperaturas máxima e mínima do ar durante o ciclo do cultivo da quinua (Novembro – Abril) no Planalto Sul Boliviano, ano agrícola de 2007/08.

A utilização de esterco de ovelha promoveu um incremento na produtividade dos grãos da quinua. O rendimento da quinua apresentou diferenças significativas com a utilização de irrigação e das doses de adubação orgânica aplicadas, porém, não houve interação entre o manejo de irrigação e as doses de adubação orgânica

utilizadas. Os resultados do quadrado médio para a variável produtividade, matéria seca e índice de colheita são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados do quadrado médio da análise da variância para a produtividade, massa seca e índice de colheita de plantas de quinua submetidas a dois manejos de irrigação e quatro níveis de adubo orgânico.

Causas da variação	Produtividade	Massa seca	Índice de colheita
Irrigação	94.517*	114.377*	0,0630*
Dose	58.749*	520.302*	0,0550*
Linear	157.155*	38.484 ^{ns}	0,1066*
Quadrático	2.625*	384.973*	0,0258*
Irrigação x Dose	8.629 ^{ns}	58.634 ^{ns}	0,0044 ^{ns}
Erro	2.954	70.963	0,0049
CV (%)	26,67	27,7	32,31

(*) Significativo ($P \leq 0,05$); (^{ns}) não significativo ($P \leq 0,05$).

Os valores médios do rendimento de grãos, massa seca e índice de colheita para o manejo de irrigação são apresentados na tabela 9. Apesar do baixo rendimento de grãos obtido, houve diferença significativa para os níveis de irrigação. O tratamento sem irrigação apresentou menor produtividade que o tratamento que recebeu irrigação suplementar (149 e 258 kg ha⁻¹, respectivamente), resultando em um incremento de 73% no rendimento de grãos. Não houve diferença estatística na produção de massa seca para os tratamentos sem irrigação e irrigação suplementar. O tratamento sem irrigação suplementar apresentou menor índice de colheita (44%) em relação ao tratamento que recebeu irrigação suplementar e diferentes doses de adubo orgânico.

Tabela 9 – Valores médios do rendimento de grãos, produção de massa seca e índice de colheita da quinua cultivada em diferentes níveis de adubação orgânica em condições de irrigação suplementar, no Planalto Sul, no ano agrícola de 2007/08.

Variável	Níveis de manejo de irrigação	
	Sem irrigação	Irrigação suplementar
Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)	149,45 b	258,16 a
Massa seca (kg ha ⁻¹)	902 a	1022 a
Índice de colheita	0,174 b	0,250 a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na horizontal, não diferem pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$)

Na figura 10 são apresentados os resultados do rendimento de grãos da quinua em função das diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas. O rendimento de grãos da quinua aumentou linearmente com o aumento da dose de esterco de 0 para 12 Mg ha⁻¹, incrementando-se o rendimento em quase três vezes em relação à testemunha, sem adubação. Através da equação de regressão linear pode-se estimar que, para cada 4 Mg ha⁻¹ de incremento na dose de adubo orgânico ocorreu um aumento de 63 kg ha⁻¹ (40%) no rendimento de grãos da cultura. Esta diferença deve-se à irrigação e aos níveis de fertilização utilizados em forma independente, pois não houve interação entre os níveis de adubação com a utilização de irrigação suplementar.

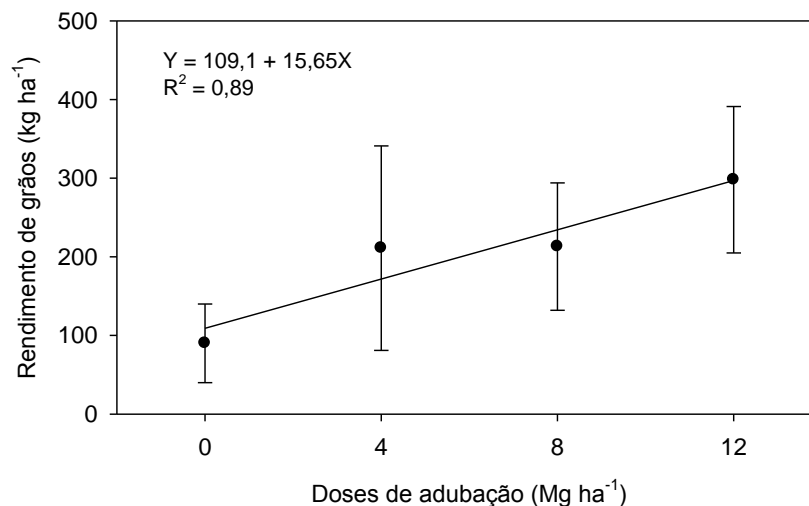


Figura 10 – Rendimento de grãos da quinua para diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo no Planalto Sul boliviano.

Apesar de obter uma produtividade de 298 kg ha⁻¹ de grãos com a aplicação de 12 Mg ha⁻¹ de esterco, a produtividade da quinua ficou abaixo das expectativas de bom desempenho, que, conforme estudos realizados por Fautapo (2008), indicam que os rendimentos nessa região geralmente são de 450 a 560 kg ha⁻¹. Condori (2007), trabalhando com 2 Mg ha⁻¹ de esterco e irrigação suplementar na comunidade de Mejillones (Planalto Sul), obteve rendimento de grãos de 203 a 210 kg ha⁻¹. Entretanto, Osco (2007), em outra situação climática, no Planalto Norte da Bolívia, encontrou rendimentos acima de 1.565 kg ha⁻¹, quando foram aplicados 12 Mg ha⁻¹ de esterco. Estes valores podem ser atribuídos ao fato do solo onde se realizou o trabalho encontrar-se em pousio e, também, pela maior disponibilidade de

água no solo, devido às condições de precipitações pluviométricas características do Planalto Norte (800 mm anuais).

A elevada umidade do esterco de ovelha aplicado (47%) pode ter influenciado no rendimento de grãos da cultura. A aplicação do esterco, no Planalto Sul, foi realizada no momento da semeadura (23 de Novembro). Também foi realizada uma primeira irrigação com uma lâmina de irrigação de 15 mm, considerando-se as condições próprias do Planalto Sul, de baixas temperaturas. O maior efeito do esterco pode ter sido no melhoramento das condições físicas do solo, como o incremento na porosidade. A baixa densidade das plantas (25.000 plantas ha⁻¹) possivelmente também tenha influenciado negativamente na produtividade da cultura. No presente trabalho se tentou avaliar a produtividade da quinua quase nas mesmas condições de manejo do solo e da cultura utilizadas tradicionalmente pelos produtores da região, incrementando-se uma irrigação suplementar. Em nível de produtor, a densidade de plantas normalmente utilizadas é de 10.000 plantas por hectare.

A produção de massa seca não foi influenciada pela aplicação da irrigação suplementar na cultura da quinua (Tabela 8), mas sim, pelos níveis de adubação (Figura 11), apresentando um comportamento quadrático com o aumento nas doses de esterco de ovelha.

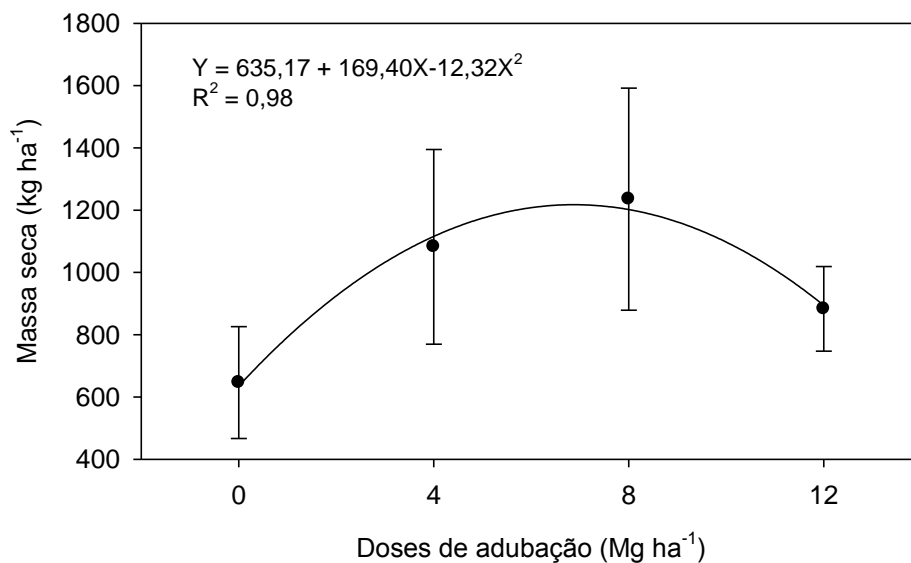


Figura 11 – Produção de massa seca da cultura de quinua para diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo no Planalto Sul boliviano.

A maior produção de massa seca (1.217 kg ha^{-1}) foi obtida com a aplicação de $6,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de esterco (91% maior que na testemunha). No entanto, a produção de massa seca, para o tratamento que recebeu maior quantidade de esterco, apresentou um incremento de apenas 36% quando comparado à testemunha, possivelmente devido à translocação do nitrogênio das folhas para os grãos, resultando em menor produção de biomassa. Condori (2007), também trabalhando em outras comunidades do Planalto Sul, não encontrou diferenças significativas entre condições de irrigação, níveis de adubação orgânica e interação irrigação x dose, no entanto, o comportamento foi linear. Salas (2004), em uma pesquisa realizada no Planalto Central, aplicando 60 e 120 kg de nitrogênio mineral, alcançou produção de matéria seca de 4 e 6 Mg ha^{-1} , respectivamente, com rendimentos de grão de 1000 a 1300 kg ha^{-1} , encontrando diferença estatística significativa entre as aplicações de fertilizante. Segundo Ceretta et al. (2005), a produção de matéria seca é normalmente um reflexo do maior acúmulo de nitrogênio.

Observou-se um comportamento quadrático em função das doses de adubo orgânico para o índice de colheita (Figura 12), indicando que esse parâmetro foi mais influenciado pela irrigação (Tabela 9) do que pelos níveis de esterco. No entanto, os valores obtidos estiveram abaixo daqueles relatados em outros estudos (GEERTS, 2008; HUANCA, 2008). Somente o tratamento com 12 Mg ha^{-1} de esterco (98 kg Nt ha^{-1}), apresentou um índice de colheita similar aos dados do segundo experimento realizado no Planalto Central (0,31) (GEERTS, 2008; HUANCA, 2008).

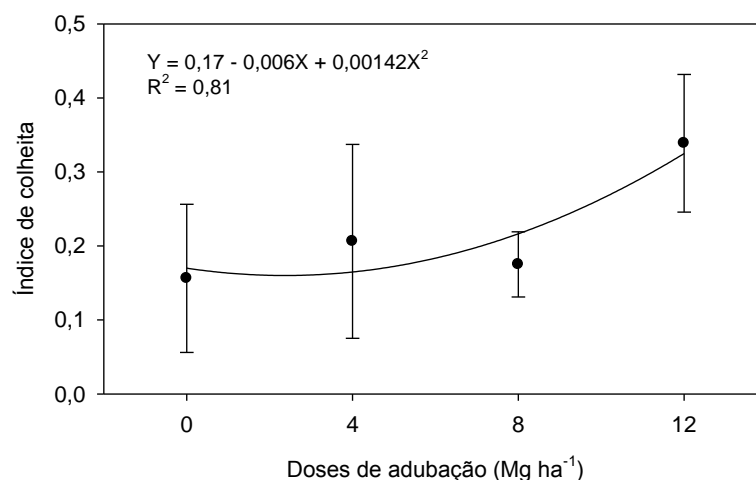


Figura 12 – Valores do índice de colheita da quinua para diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo no Planalto Sul boliviano.

4.1.2 Conteúdo de nitrogênio total nos grãos da quinua e acumulação de nitrogênio pela cultura

Na tabela 10 são apresentados os resultados do quadrado médio da análise da variância para a acumulação de nitrogênio no grão e na planta, requerimento e eficiência de uso do nitrogênio. Houve diferença significativa para a aplicação de irrigação e dose de esterco aplicado ao solo, mas não houve resposta à interação entre irrigação e dose.

Tabela 10 – Resultados do quadrado médio da análise da variância para a extração de nitrogênio no grão, na planta, requerimento de nitrogênio (RN) e eficiência de utilização de nitrogênio (EUN).

Causas da variação	Acumulação N-grão	Acumulação N-planta	RN	EUN
Irrigação	26,01*	162,90 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,14 ^{ns}
Dose	15,59*	823,49*	0,28 ^{ns}	3,50 ^{ns}
Linear	41,68*	432 ^{ns}	0,71 ^{ns}	7,66 ^{ns}
Quadrática	0,816*	2007*	0,13 ^{ns}	2,81 ^{ns}
Irrigação x Dose	2,83 ^{ns}	132,30 ^{ns}	1,35 ^{ns}	29,93 ^{ns}
Erro	0,63	118,67	1,52	22,53
CV (%)	23,98	27,57	7,52	7,76

(*) Significativo ($P \leq 0,05$); (^{ns}) não significativo ($P \leq 0,05$).

A aplicação de esterco proporcionou um incremento na acumulação de nitrogênio nos grãos de quinua (Tabela 11). A porcentagem de nitrogênio nos grãos da quinua oscilou entre 1,62 a 1,67% (dados não apresentados), para todos os tratamentos, com média geral de 1,64%. Estes valores são ligeiramente abaixo dos encontrados por Huanca (2008), no Planalto Central, onde aplicou 0, 5 e 10 Mg ha⁻¹ de esterco de ovino em condições de irrigação suplementar, encontrando valores de 1,5 a 2,02%. No entanto, a acumulação de nitrogênio nos grãos e na planta dependente da produtividade e de outros fatores, como a variedade (SCHULTE et al., 2005), manejo, fertilidade do solo, etc. A maior acumulação de nitrogênio nos grãos de quinua foi de 4,85 kg ha⁻¹, superando em 300 vezes os valores observados no tratamento testemunha.

A planta de quinua acumulou 37,2 e 41,7 kg ha⁻¹ de nitrogênio, para uma produção de matéria seca de 901 e 1.021 kg ha⁻¹, respectivamente, para os

tratamentos sem irrigação e com irrigação suplementar, não havendo diferenças significativas entre os níveis de manejo de irrigação. Nestas mesmas condições, a acumulação de nitrogênio no grão foi de 2,41 e 4,21 kg ha⁻¹, para um rendimento de grãos de 149 e 258 kg ha⁻¹, respectivamente.

Tabela 11 – Conteúdo de nitrogênio no grão e na planta de quinua, no experimento conduzido no Planalto sul Boliviano, comunidade de Irpani, ano agrícola de 2008/09.

Variável	Níveis de manejo de irrigação	
	Sem irrigação	Irrigação suplementar
Acumulação de N no grão (kg ha ⁻¹)	2,41b	4,21a
Acumulação de N na planta (kg ha ⁻¹)	37,2 a	41,7a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na horizontal, não diferem pelo teste de Tukey (P≤0,05)

O incremento nos níveis de adubação orgânica ocasionou uma resposta linear na acumulação de N no grão das plantas de quinua e uma resposta quadrática para a acumulação de N na planta (Figura 13).

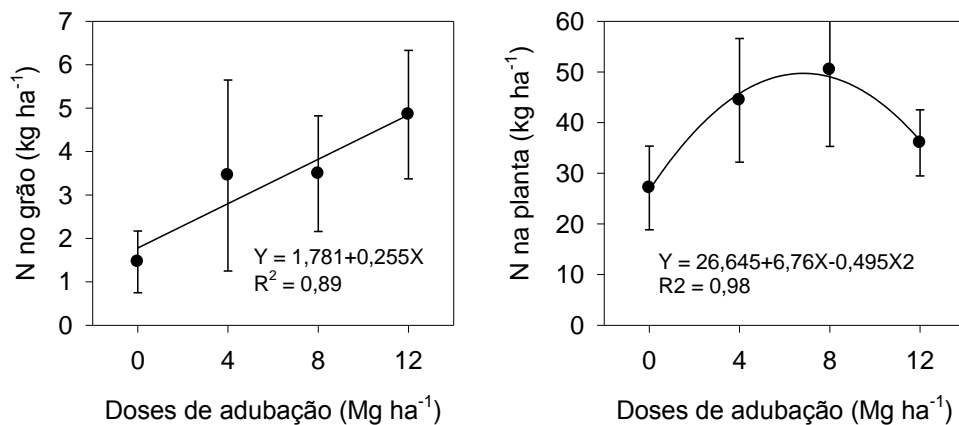


Figura 13 – Acumulação de N no grão e na planta de quinua em função de diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo no Planalto Sul boliviano.

Aumentando a dose de adubação orgânica em 4 Mg ha⁻¹ ocorreu um incremento de 1,02 kg ha⁻¹ de N no grão. O acúmulo de N na planta apresentou decréscimo com a aplicação de 8 e 12 Mg ha⁻¹ de esterco de ovelha. Utilizando os resultados da equação de regressão foi possível estimar o ponto de máxima eficiência técnica (PMET), 49,7kg de N ha⁻¹, para uma dose de esterco de ovelha de

6,7 Mg ha⁻¹. A menor acumulação de massa seca observada nos tratamentos de 0 (27 kg ha⁻¹ de nitrogênio) e 12 Mg ha⁻¹ (36,5 kg ha⁻¹ de nitrogênio) pode ter sido ocasionada pela translocação do nitrogênio das folhas para os grãos, diminuindo a produção de massa seca e conseqüentemente o acúmulo de nitrogênio.

4.1.3 Requerimento de nitrogênio e eficiência do uso de nitrogênio na cultura da quinua em condições de irrigação e níveis de adubação orgânica

O requerimento de nitrogênio indica a quantidade de nitrogênio (kg) que é necessário acumular no grão do cultivo para produzir uma megagrama de grãos, enquanto que, a eficiência de utilização do nitrogênio (EUN) refere-se à quantidade de grão produzido por cada quilograma de nitrogênio acumulado em seus tecidos.

Na tabela 12 são apresentados os valores de requerimento do nitrogênio e a EUN para as plantas de quinua, do experimento conduzido na comunidade de Irpani. Não foram encontradas diferenças significativas entre as condições de cultivo da quinua sem irrigação e com irrigação suplementar e os diferentes níveis de adubação orgânica para esses dois parâmetros avaliados. O requerimento de nitrogênio foi de 16 kg Mg⁻¹ de grão, indicando que, para a produção de uma Megagrama de grãos necessita-se de 16 kg de nitrogênio. A EUN foi de 61 kg de grão de quinua produzido por kg N⁻¹, a qual é considerada alta quando comparada com a EUN de outras culturas, como a aveia branca, a qual tem um valor de 43 a 49 kg de grão por kg de nitrogênio na planta (KOLCHINSKI; SCHUCH, 2003).

Tabela 12 – Requerimento de nitrogênio (RN) e eficiência de utilização do nitrogênio (EUN) das plantas de quinua cultivadas em condições de irrigação suplementar e de diferentes níveis de esterco de ovelha no experimento conduzido no Planalto Sul Boliviano, na comunidade Irpani.

Variável	Níveis de manejo de irrigação	
	Sem irrigação	Irrigação suplementar
RN (kg N Mg grão ⁻¹)	16,49 a	16,49 a
EUN (kg grão kg N ⁻¹)	61,15 a	61,28 a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na horizontal, não diferem pelo teste de Tukey (P≤0,05)

4.1.4 Conteúdo do nitrogênio total em solos cultivados com quinua com diferentes níveis de adubação orgânica.

O nitrogênio total (Nt) das amostras de solo indicou que este parâmetro não foi um indicador sensível às variações do conteúdo de Nt no tempo e nas condições de irrigação suplementar e de diferentes níveis de adubação orgânica. Isso se deve ao fato de que este parâmetro considera o Nt tanto na forma orgânica como na forma inorgânica e o nitrogênio incorporado ao solo (em relação ao estoque do solo) é considerado pequeno (1,3% de nitrogênio total). O teor do nitrogênio no solo, no tubo fechado e no tubo aberto indicou que a irrigação suplementar e a dose de esterco de ovelha aplicado ao solo não modificou o conteúdo de Nt nos solos, mesmo quando o solo não foi influenciado pelas raízes da quinua e das chuvas (tubo fechado e aberto - Tabela 13).

Tabela 13 – Variação do teor de nitrogênio total do solo, em condições de irrigação suplementar, chuva natural e diferentes quantidades de esterco de ovelha, em três pontos diferentes (no solo, interior do tubo aberto e interior do tubo fechado), no experimento conduzido no Planalto Sul Boliviano, comunidade de Irpani.

Nitrogênio total no solo	Níveis de manejo de irrigação	
	Sem irrigação	Irrigação suplementar
No solo (%)	0,028a	0,031a
Tubo aberto (%)	0,033a	0,034a
Tubo fechado (%)	0,038a	0,038a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na horizontal, não diferem pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

4.2 Experimento 2: Épocas de aplicação de esterco de ovino na produção de quinua no Planalto Central boliviano, Patacamaya

4.2.1 Produtividade da quinua

No experimento conduzido em Patacamaya se incorporou o esterco ao solo no mês de Maio, Julho e Setembro (primeira, segunda e terceira época, respectivamente), antes da semeadura da cultura. Na tabela 14 são apresentados os resultados do quadrado médio da análise da variância para o rendimento de grãos, produção de massa seca e índice de colheita da quinua, para as três épocas

de aplicação do esterco de ovelha, níveis de manejo da água de irrigação e doses de esterco aplicadas.

Tabela 14 – Resultados do quadrado médio da análise da variância para o rendimento de grãos, massa seca e índice de colheita da quinua, no experimento conduzido no Planalto Central boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola de 2009/10.

Causas da variação	Rendimento de grãos	Massa seca	Índice de colheita
Época	1.060.004,28*	9.147.543,04*	0,0170 ^{ns}
Irrigação	2.724.020,67*	12.847.852,04*	0,0411*
Dose	1.101.911,17*	492.488,87 ^{ns}	0,0309*
Linear	16.270,15*	4.864,10 ^{ns}	0,0076 ^{ns}
Quadrática	5.768,07 ^{ns}	4.985,66 ^{ns}	0,0542*
Época x Irrigação	171.775,74 ^{ns}	5.307.043,17*	0,0097 ^{ns}
Época x Dose	1.717,75 ^{ns}	3.715.197,26*	0,0118 ^{ns}
Irrigação x Dose	281.978,28 ^{ns}	937.361,69 ^{ns}	0,0059 ^{ns}
Época x Irrigação x Dose	8.682,28*	950.139,99 ^{ns}	0,0135 ^{ns}
Erro	138.380,55	535.311,68	0,0080
CV (%)	35,6	20,46	27,91

(*) Significativo ($P \leq 0,05$); (^{ns}) não significativo ($P \leq 0,05$).

O rendimento de grão da quinua foi influenciado pela época de aplicação do adubo, irrigação e dose de esterco de ovelha. As diferentes doses de esterco não influenciaram a produção de massa seca da quinua e, a época de aplicação do esterco de ovelha não resultou em alterações estatisticamente significativas no índice de colheita. Não foi observada interação significativa entre a época de aplicação do esterco, níveis de irrigação e doses de adubo para a produção de massa seca e índice de colheita da cultura da quinua. Entretanto, avaliando a época de aplicação e níveis de manejo de irrigação com relação ao rendimento de grãos e produção de massa seca da quinua, observou-se interação significativa, evidenciando uma maior influência da irrigação no aumento do rendimento de grãos e massa seca, do que em relação à época de aplicação do esterco de ovelha. A interação entre a época de aplicação e doses de esterco apresentou diferença significativa para a produção de massa seca da quinua.

Na tabela 15 são apresentados os valores médios do rendimento de grãos, produção de massa seca e índice de colheita da quinua para as três épocas de aplicação de esterco de ovelha e níveis de manejo de irrigação, em experimento

conduzido no Planalto Central boliviano. O rendimento de grãos da quinua foi menor quando o esterco de ovelhas foi aplicado no mês de Setembro, possivelmente devido à ocorrência de baixas temperaturas do período de aplicação do esterco até a semeadura da cultura.

Tabela 15 – Valores médios do rendimento de grãos, massa seca e índice de colheita da quinua submetida a diferentes níveis de adubação orgânica, época de aplicação do adubo e níveis de manejo de irrigação, em experimento conduzido no Planalto Central boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola de 2009/10.

Tratamentos	Rendimento de grãos	Massa seca	Índice de colheita
	Kg ha ⁻¹		
Época de aplicação de esterco			
Maio	1.214 ba	4.089 a	0,29 a
Julho	1.412 a	3.874 a	0,35 a
Setembro	929 b	2.761 b	0,32 a
Níveis de manejo de irrigação			
Sem irrigação	960 b	3.087 b	0,29 b
Irrigação Suplementar	1.410 a	4.063 a	0,34 a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na vertical, não diferem pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

O maior rendimento de grãos da cultura da quinua foi obtido quando se aplicou o esterco no mês de Julho, sendo este 51% maior em relação à aplicação de esterco no mês de Setembro e 16% maior à aplicação do adubo no mês de Maio. Esta diferença de resposta da cultura pode ser devido à maior mineralização do esterco de ovelha, uma vez que os rendimentos de grãos foram incrementados quando se associa aplicação de esterco no mês de Maio com a irrigação (efeito da interação época de aplicação e irrigação). Também houve um incremento de 46% no rendimento de grãos da quinua nos tratamentos que receberam irrigação suplementar (67 mm no subperíodo de floração e grão leitoso) comparado ao tratamento que não foi irrigado.

A produção de massa das plantas de quinua foi 48% maior quando o esterco de ovelha foi aplicado em Maio, em relação à aplicação em Setembro, não sendo observadas diferenças na produção de massa seca das plantas de quinua para a aplicação de esterco nos meses de Maio e Julho. Para o fator irrigação, o tratamento onde foi aplicada uma lamina de água de 67 mm durante os subperíodos de floração e grão leitoso, apresentou produção de massa total das plantas de quinua 45% superior ao tratamento que não recebeu irrigação suplementar. A ocorrência de

interação significativa entre a época de aplicação do esterco e níveis de manejo de irrigação evidencia que, a aplicação de lâminas de irrigação nos estádios de floração e grão leitoso incrementou a produção de massa seca de quinua quando se aplicou o esterco nos meses de Maio e Julho.

O rendimento de grãos da quinua não foi influenciado pelas baixas temperaturas no mês de Fevereiro e Março, possivelmente devido às precipitações pluviais que ocorreram nesses períodos (Figura 14), atenuando os efeitos das baixas temperaturas. As baixas temperaturas após a floração favoreceram o enchimento dos grãos. A precipitação pluvial foi de 371 mm durante todo o ciclo de cultivo.

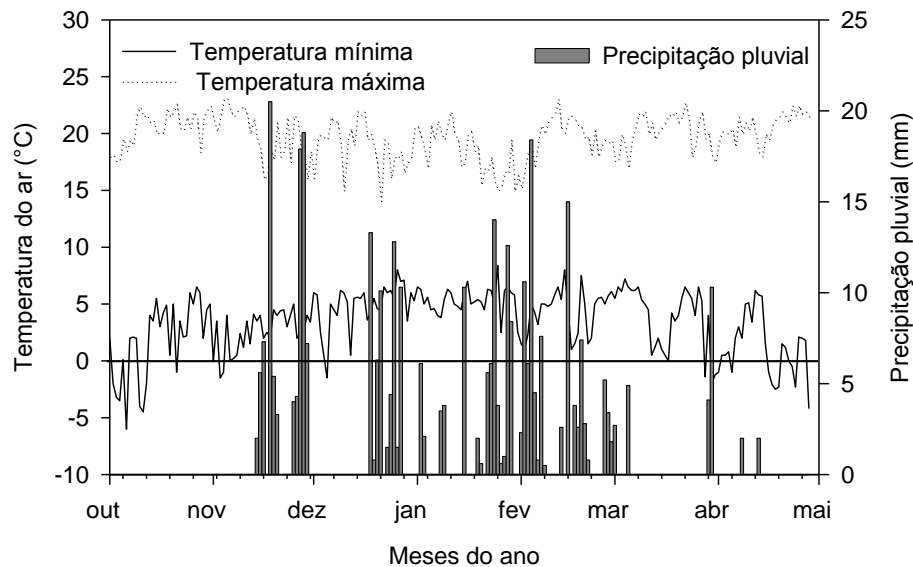


Figura 14 – Precipitação pluvial e temperatura máxima e mínima durante o ciclo de desenvolvimento das plantas de quinua (Setembro a Abril) no Planalto Central boliviano, no ano agrícola de 2009/10.

Na figura 15 são apresentados os resultados do rendimento de grãos e índice de colheita das plantas de quinua em relação às diferentes doses de esterco de ovelha utilizadas. O rendimento de grãos da quinua apresentou uma resposta linear em relação ao aumento nas doses de esterco utilizadas, indicando um pequeno incremento no rendimento de grãos com o aumento nas doses de esterco de 0 a 30 Mg ha⁻¹. A reduzida resposta do rendimento de grãos das plantas de quinua ao aumento nas doses de esterco de ovelha, possivelmente foi devido ao mecanismo de imobilização de nitrogênio. Segundo Arns, 2004, o esterco quando aplicado ao solo em forma isolada pode causar imobilização de nitrogênio; em contrapartida, quando aplicado combinado com outros insumos aumenta a disponibilidade de

nitrogênio ou baixos teores de materiais recalcitrantes, apresentam rápida disponibilidade. Por outro lado, as vantagens do uso do adubo orgânico na agricultura são atribuídas, entre outras, ao aumento da umidade do solo em períodos secos, à preservação do solo contra a erosão, o que melhora os indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, e ao aumento da permeabilidade do mesmo (PRIMO et al., 2012).

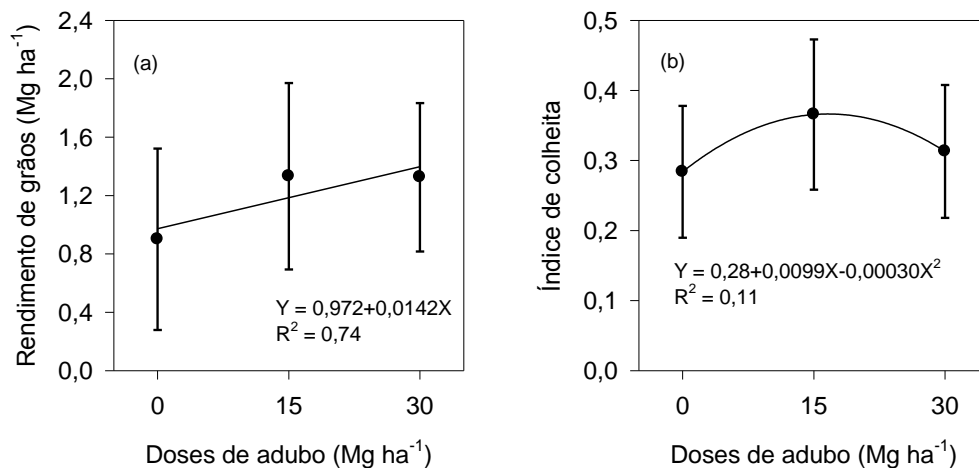


Figura 15 – Rendimento de grãos (a) e índice de colheita (b) da quínia com aplicação de diferentes doses de esterco de ovelha, no Planalto Central boliviano, no ano agrícola de 2009/10 (as barras verticais representam o desvio padrão das médias).

O índice de colheita das plantas de quínia não foi influenciado pelas épocas de aplicação do esterco de ovelha, mas a utilização de irrigação suplementar e os níveis de adubação aumentaram significativamente o índice de colheita, 17 e 32 %, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha (Figura 15 e Tabela 15). Estes valores do índice de colheita são similares aos reportados por Schulte et al. (2005), mas inferiores aos reportados por Geerts (2008).

Na figura 16 são apresentados os resultados do desdobramento para o fator época de aplicação de esterco de ovelha, níveis de irrigação e doses de esterco para o rendimento de grãos da quínia e análise de desdobramento da época de aplicação e doses de esterco para a produção de massa seca das plantas de quínia. Para o mês de Setembro, houve uma resposta linear na produção de matéria seca, sendo esta maior para a aplicação de 30 Mg ha⁻¹ de esterco (Figura 16a).

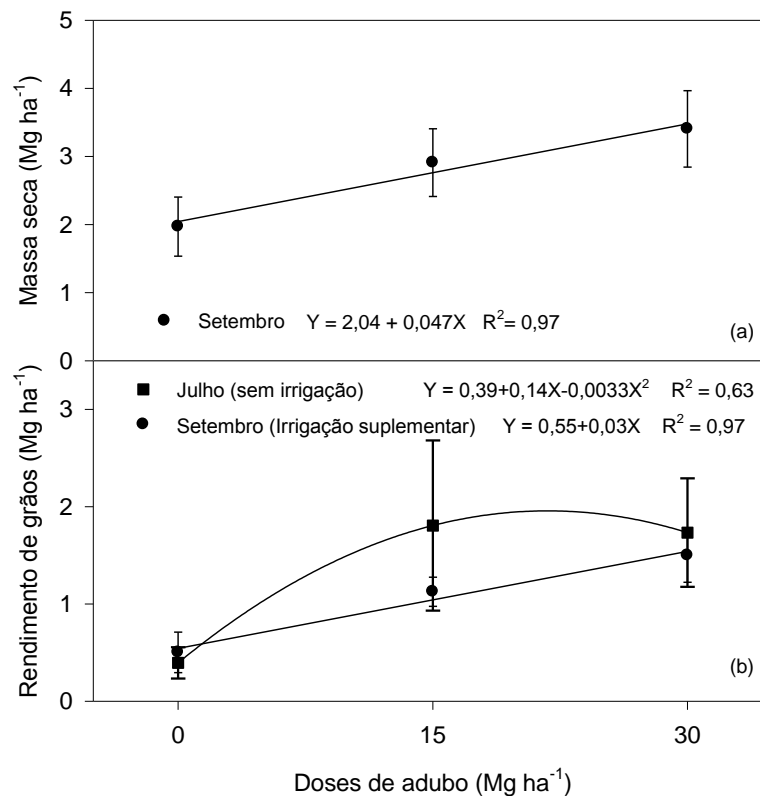


Figura 16 – Variação da produção de massa seca das plantas de quinua em função da época de aplicação e doses de esterco (desdobramento do fator época dentro das doses de esterco) (a) e rendimento de grãos (desdobramento do fator época dentro dos níveis de manejo de irrigação e doses de esterco) (b) no Planalto Central boliviano no ano agrícola de 2008/09 (as barras verticais representam o desvio padrão entre as médias).

Os resultados do rendimento de grãos da quinua apresentaram comportamento significativo para a aplicação de esterco no mês de Julho e sem irrigação, apresentando uma resposta quadrática (Figura 16b). Pelo modelo ajustado foi possível estimar que o rendimento de grãos máximo da quinua foi de 1,96 Mg ha⁻¹, para uma dose de 20,8 Mg ha⁻¹ de esterco de ovelha e sem irrigação. Para a aplicação de esterco em Setembro e com irrigação (Figura 16b), a resposta ao aumento das doses de esterco foi linear, aumentando o rendimento de grãos da quinua em 0,45 Mg ha⁻¹, quando se aumentou a dose de adubação em 15 Mg ha⁻¹. Os resultados indicam que o aumento na umidade do solo, em função da aplicação de irrigação suplementar, possivelmente tenha influenciado positivamente a liberação do N, melhorando a resposta da cultura da quinua aos níveis de esterco aplicados no incremento do rendimento de grãos.

4.2.2 Conteúdo de nitrogênio na quinua e eficiência de utilização do nitrogênio

Os resultados do teor de nitrogênio nos grãos, para as três épocas de aplicação de esterco de ovelha, são apresentadas na tabela 16. Para determinar o conteúdo de nitrogênio na planta foram considerados os resultados de nitrogênio total na folha, caule, talo e no grão das plantas de quinua. Não foi considerada a massa seca da raiz, nem seu conteúdo de nitrogênio. Verificou-se um valor de N total no caule de 0,92%, enquanto que, no talo, foram encontrados valores de 0,56%, para a dose de 0 Mg ha⁻¹ de esterco e 0,86% para aplicações de 15 e 30 Mg ha⁻¹ de esterco. Na folha das plantas de quinua, observou-se um teor de 0,86% de nitrogênio no tratamento sem aplicação de esterco e de 1,25% quando foi aplicada esterco de ovelha. Na Alemanha, Schulte et al. (2005) utilizaram níveis de 0, 80 e 120 kg de nitrogênio disponível para a cultura da quinua e observaram valores de 2,06; 2,18 e 2,34% de Nt nos grãos, respectivamente. Os resultados de Nt observados por esses autores não apresentaram diferenças significativas, porém, quando compararam o teor de Nt nos grãos entre os anos agrícolas de 1994 (2,09%) com o ano de 1995 (2,30%) observaram incrementos significativos no Nt. Da mesma maneira, estes autores, encontraram diferenças significativas, no teor de Nt dos grãos, quando comparam as variedades “Faro” (2,25%) com a variedade “Cochabamba” (2,15%).

Tabela 16 – Conteúdo de nitrogênio nos grãos da quinua, com diferentes níveis de adubação orgânica e épocas de aplicação do esterco de ovelha e níveis de manejo de irrigação, em experimento conduzido no Planalto Central boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola de 2009/10.

Época/ Irrigação	Maio		Julho		Setembro	
	Irrigação suplementar	Sem irrigação	Irrigação suplementar	Sem irrigação	Irrigação suplementar	Sem irrigação
Dose	Nitrogênio total no grão (%)					
0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9
15	2,0	1,8	1,7	1,9	1,7	1,7
30	2,2	1,9	1,5	1,7	1,6	1,8

Avaliou-se também o nitrogênio acumulado no grão, na planta e a eficiência de uso de nitrogênio. Os resultados do quadrado médio da análise da variância para esses parâmetros são apresentados na tabela 17.

Tabela 17 – Resultados do quadrado médio da análise da variância para a acumulação de nitrogênio no grão, na planta e eficiência de utilização de nitrogênio (EUN) pelas plantas de quinua, em função das épocas de aplicação do esterco de ovelha, níveis de manejo de irrigação e doses de esterco aplicadas no Planalto Central Boliviano.

Causas da variação	N-grão	N-planta	EUN
Época	395*	1.034*	158,0*
Irrigação	870*	1.636*	0,5 ^{ns}
Dose	367*	622*	311,9*
Linear	549*	1.139*	389*
Quadrática	185 ^{ns}	105 ^{ns}	234*
Época x Irrigação	444*	825*	85,7*
Época x Dose	65 ^{ns}	117 ^{ns}	42,5*
Irrigação x Dose	94 ^{ns}	145 ^{ns}	76,7*
Época x Irrigação x Dose	320*	398*	44,5*
Erro	66	85	1,9
CV (%)	38,15	25,7	2,5

(*) Significativo ($P \leq 0,05$); (^{ns}) não significativo ($P \leq 0,05$).

Os resultados de acumulação de N no grão, na planta e a EUN foram significativos para as épocas de aplicação, níveis de manejo de irrigação e doses de esterco de ovelha, com exceção da EUN para o fator irrigação. Houve interação significativa entre época de aplicação do esterco de ovelha e níveis de manejo de irrigação para o nitrogênio acumulado no grão, na planta e a EUN. Também foi observado efeito significativo da interação época de aplicação, níveis de manejo de irrigação e doses aplicadas para todas as variáveis analisadas. A EUN foi significativa para todas as interações analisadas.

Os valores médios da acumulação de N no grão, na planta e a EUN da quinua são apresentados na tabela 18. A aplicação de esterco de ovelha ao solo no mês de Maio e Julho aumentou a acumulação de nitrogênio no grão e na planta. Quando o esterco foi aplicado nos meses de Maio e Julho houve um incremento de 45 a 55% no rendimento de grãos e massa seca da quinua, em relação à aplicação realizada no mês de Setembro. Murillo (2006) encontrou uma acumulação de nitrogênio nos grãos da quinua de 42 kg de nitrogênio ha^{-1} em um trabalho conduzido no Planalto da Bolívia para um rendimento de grãos de 2.436 kg ha^{-1} . Segundo Fautapo (2008), na produção de 2.566 kg de grão ha^{-1} , a cultura da quinua necessita de 283 kg de nitrogênio. Este mesmo autor afirma que no Peru, para produzir 5.000 kg de massa

seca, as plantas de quinua extraem 65 kg de nitrogênio. A variação nestes resultados demonstra a importância de conduzir trabalhos desta natureza, nessa região da Bolívia.

Tabela 18 – Resultados de acumulação de nitrogênio no grão e na planta de quinua e eficiência de utilização de nitrogênio (EUN), do experimento conduzido no Planalto Central Boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola de 2009/10.

Tratamentos	N-grão	N-planta	EUN
	kg ha ⁻¹		kg grão kg N ⁻¹
Época de aplicação de esterco			
Maio	23,7a	41,0a	50,2b
Julho	24,6a	39,7a	55,6a
Setembro	16,1b	27,3a	55,0a
Níveis de manejo de irrigação			
Sem irrigação	17,4b	30,5b	53,7a
Irrigação suplementar	25,5a	41,5a	53,5a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na vertical, não diferem pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

O fator época de aplicação de esterco, também influenciou na eficiência de utilização de nitrogênio das plantas de quinua, sendo necessário 1 kg de nitrogênio para produzir 50 kg de grão para aplicações de esterco de ovelha realizadas no mês de Maio. Em contrapartida, para aplicações de esterco realizadas nos meses de Julho e Setembro, com 1 kg de nitrogênio foram produzidos 55 kg de grãos de quinua, indicando uma maior eficiência na utilização do nitrogênio para essas épocas. A eficiência de utilização do nitrogênio no trigo, em experimento conduzido na Argentina (ALVAREZ, 2006), foi de 33 kg de grão de trigo por kg de nitrogênio. Esses resultados possibilitam inferir que a quinua apresenta uma elevada eficiência de utilização de nitrogênio, em relação ao trigo. Segundo Huggins et al. (2010), estes indicadores demonstram relações entre o conteúdo de proteína (nitrogênio no grão) com um incremento do nitrogênio aplicado, portanto, é necessário utilizar estratégias de manejo do nitrogênio para melhorar sua eficiência de uso.

Os resultados indicaram que a utilização de irrigação suplementar proporcionou extração de 50% a mais de N pelos grãos das plantas de quinua, comparado ao tratamento sem irrigação e, observou-se também um incremento de produção de 31% na massa seca da quinua com aplicação de irrigação. Nessas

condições, a eficiência de utilização de nitrogênio foi de 53 kg de grão por kg de nitrogênio, sendo estatisticamente similares.

Os resultados observados de nitrogênio nos grãos e na planta de quinua também foram influenciados pelas doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo (Figura 17). Tanto para o N no grão como para o N na planta, observou-se um efeito linear positivo, aumentando a acumulação de N com o incremento de 15 Mg ha⁻¹ de esterco. Na planta de quinua, o incremento de nitrogênio acumulado foi de 5,5 kg ha⁻¹ aumentando-se a dose de esterco de ovelha em 15 Mg ha⁻¹, representando um acréscimo de 15% (Figura 17b). O acúmulo de N no grão foi percentualmente maior quando comparado ao da planta, apresentando resposta linear positiva, com um incremento de 3,7 kg ha⁻¹ para um aumento de 15 Mg ha⁻¹ de esterco, representando 17% de aumento (Figura 17a). Ceretta et al. (2005) encontraram um acréscimo linear no nitrogênio acumulado nas culturas de aveia preta e milho, quando aplicaram doses de 20, 40 e 80 m³ ha⁻¹ de dejetos de suínos.

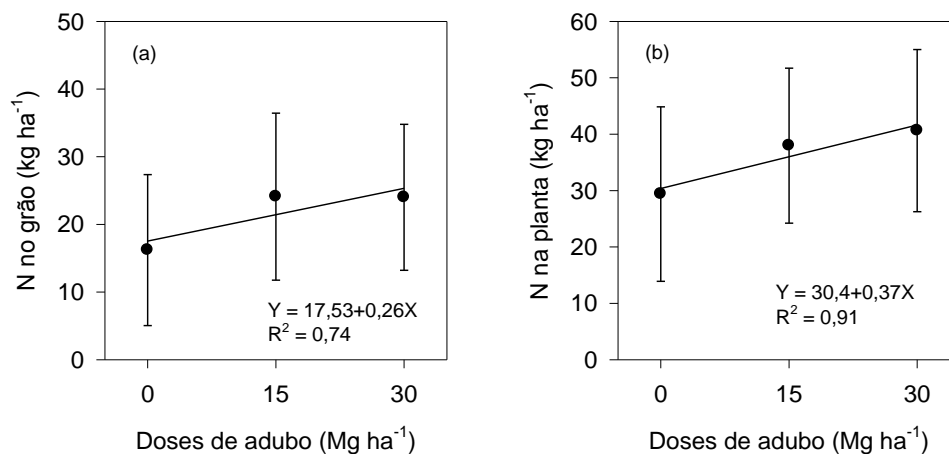


Figura 17 – Nitrogênio acumulado no grão (a) e na planta (b) de quinua em função de diferentes doses de esterco de ovelha aplicadas ao solo, no Planalto Central Boliviano, no ano agrícola de 2008/09. As barras verticais representam o desvio padrão entre as médias.

No Planalto Norte, os produtores usualmente semeiam a quinua depois do cultivo da cultura da batata, a qual é normalmente fertilizada com esterco de ovelhas. Entretanto, quando a semeadura é feita logo após o trigo, é recomendada a aplicação de uma adubação de 80 kg de nitrogênio (MUJICA, et al., 2001). No Planalto Sul da Bolívia, a quinua usualmente é produzida em até dois anos

consecutivos em uma mesma área, devendo-se fazer a rotação de cultura após esse período, com a área permanecendo em pousio.

A eficiência de utilização de nitrogênio pelas plantas de quinua também foi influenciada pelas doses de esterco de ovelha (Figura 18), apresentado uma resposta quadrática com o incremento das doses de esterco aplicadas. O PMET do modelo quadrático foi de 57,15 kg grão kg N⁻¹ para uma dose de 21 Mg ha⁻¹. Resultados de pesquisas têm demonstrado que a eficiência de utilização diminui com a incorporação de nitrogênio, ou seja, há uma melhor utilização do nitrogênio quando o adubo se encontra em níveis baixos, mas esta situação se modifica quando o nitrogênio se encontra em forma disponível (URIBELARREA et al., 2004). Por outro lado, Schulte et al. (2005), na Alemanha, encontrou valores de 21, 23 e 21 quando aplicou doses de 0, 80 e 120 kg de nitrogênio, respectivamente, resultados esses bem baixos, e sem diferenças entre as doses de esterco utilizadas.

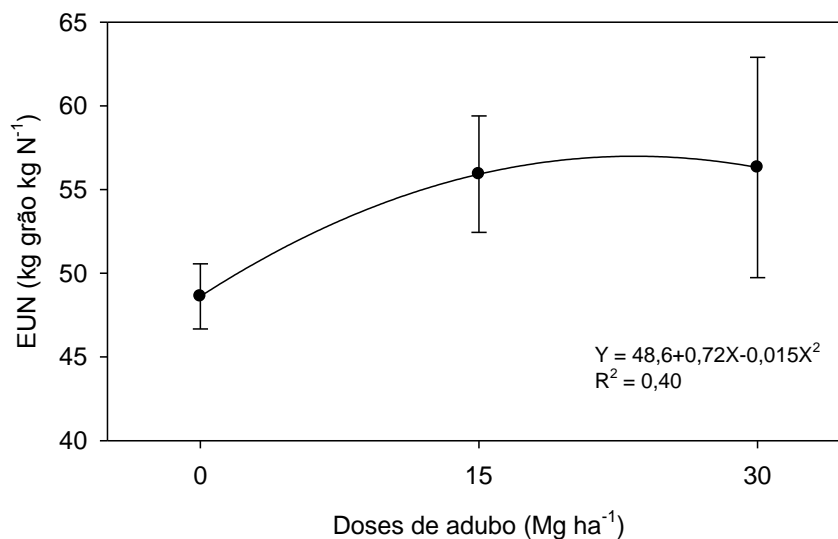


Figura 18 – Eficiência de utilização do nitrogênio (EUN) de plantas de quinua em função de diferentes doses de esterco de ovelha ao solo, no Planalto Central Boliviano no ano agrícola 2008/09 (as barras verticais representam o desvio padrão entre as médias).

A aplicação do esterco de ovelha no mês de Maio e Setembro resultou em maior acúmulo de nitrogênio no grão da quinua quando se aplicou irrigação suplementar, com menos acúmulo de N no tratamento sem irrigação. Isso possivelmente tenha ocorrido devido à interação entre a água com a disponibilidade

de nutrientes. O nitrogênio nas plantas de quinua teve maior acumulação quando o esterco foi aplicado no mês de Maio e com irrigação, sendo 92% superior à aplicação realizada em Maio, sem irrigação, não se obtendo efeito significativo entre os níveis de manejo de irrigação quando o esterco de ovelha foi aplicado em Julho e Setembro (Tabela 19).

Tabela 19 – Valores médios da análise de desdobramento do fator época de aplicação de esterco de ovelha dentro do fator níveis de manejo de irrigação para o acúmulo de N no grão e na planta de quinua e EUN, em experimento conduzido no Planalto Central Boliviano, comunidade de Patacamaya, no ano agrícola 2009/10.

Níveis de manejo de irrigação	Épocas de aplicação		
	Maio	Julho	Setembro
	N-grão (kg ha ⁻¹)		
Irrigação suplementar	33,4aA	25,54aAB	17,41aB
Sem irrigação	13,9bB	23,67aA	14,69bAB
	N-planta (kg ha ⁻¹)		
Irrigação suplementar	54,2aA	42,66aB	27,64aC
Sem irrigação	27,85bB	36,72aA	26,92aB
	EUN (kg grão kg N ⁻¹)		
Irrigação suplementar	47,82Bb	57,32aA	55,98aA
Sem irrigação	52,59aA	56,87aA	54,11aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e, maiúscula, na horizontal, na diferem pelo teste de Tukey (P≤0,05).

A eficiência de utilização do nitrogênio para a aplicação do esterco de ovelha no mês de Maio foi menor quando a cultura da quinua foi irrigada na floração, em relação ao tratamento sem irrigação. A diminuição da EUN com os incrementos na disponibilidade de nitrogênio foi também apresentado por Moll et al. (1982).

A EUN foi influenciada pelas épocas de aplicação de esterco, níveis de manejo de irrigação e doses de esterco de ovelha aplicadas, apresentando um comportamento quadrático em relação às doses de esterco aplicadas, com e sem irrigação, quando o esterco foi aplicado em Julho e Setembro (Figura 19). Isso evidencia que as épocas de aplicação de esterco e os níveis de manejo de irrigação afetaram mais a EUN do que o aumento nas doses de esterco de 0 para 30 Mg ha⁻¹. Entretanto, no tratamento com aplicação de irrigação suplementar e quando o esterco foi aplicado em Julho, observou-se uma resposta linear da EUN em relação às doses de esterco aplicadas. Isso pode ter ocorrido em função da maior

mineralização do N, aumentando a disponibilidade desse nutriente, de acordo com estudos conduzidos por Moll et al. (1982).

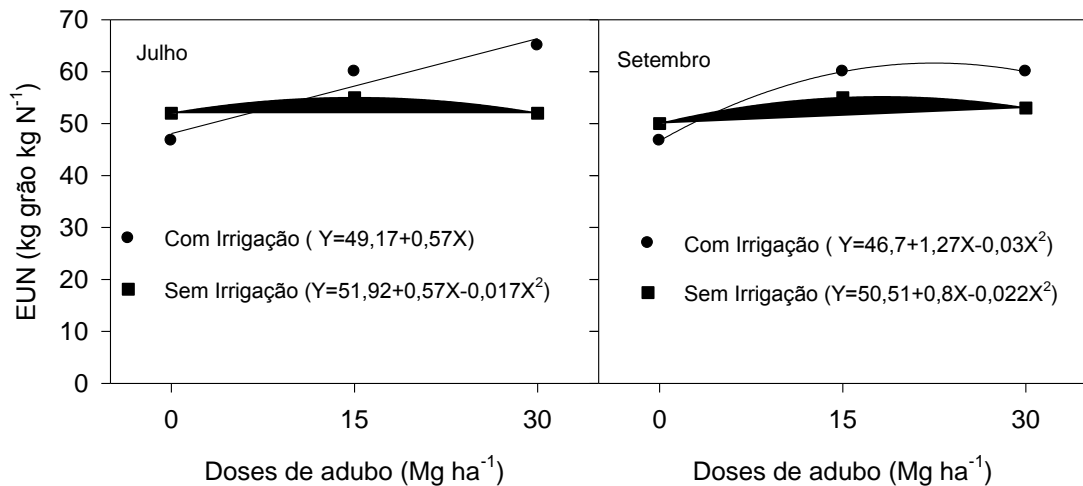


Figura 19 – Eficiência de utilização de nitrogênio das plantas de quinua para os níveis de manejos de irrigação, épocas de aplicação de esterco e doses de aplicação de esterco de ovelha, no Planalto Central Boliviano no ano agrícola de 2008/09.

4.3 Experimento 3: Nitrogênio mineral e total em dois tipos de solo no Planalto Central.

A eficiência de absorção de nitrogênio por plantas não leguminosas, como a quinua, depende da presença de nitrogênio mineral na solução do solo, na quantidade e na época adequada. Essa eficiência nutricional será tanto maior quanto maior for o sincronismo entre a liberação do nitrogênio pelo processo de mineralização e a demanda pelas plantas. Variáveis como a composição dos materiais, taxa de aplicação, atividade microbiana e o tipo de solo afetam a mineralização do nitrogênio e, portanto, os teores de nitrogênio mineral no solo (FIOREZE et al., 2012).

Os dois tipos de solo utilizados para determinar o teores de nitrogênio, foram classificados como solos de textura franco argilo arenoso (FarA) e areia franca (AF). O primeiro solo (FarA+B) tinha como cultura antecessora a cultura de batata e outra parcela com vegetação nativa de Festuca, à que foi denominada (FarA+F). O solo de textura areia franca, por sua vez, apresentava-se com resteva de quinua (AF+Q) e outra parcela com festuca (AF+F).

Nos solos de textura areia franca e solo de textura franco argilo arenosa, associado com festuca, houve maior conteúdo de amônio e nitratos, em relação a solos da mesma textura e com cultura de quinua e batata, respectivamente (Tabela 20). Além disso, também houve diferença significativa nos conteúdos de nitrogênio mineral com a textura do solo, sendo que a textura areia franca, independente da cobertura, apresentou menores teores de nitrogênio mineral. Vários estudos publicados na literatura demonstraram que os solos com maiores teores de argila retêm mais matéria orgânica e, portanto, mais nitrogênio que solos arenosos, devido à proteção das partículas de argila ou presença de microagregados que mantêm a matéria orgânica fora do alcance dos microrganismos (HASSINK, 1994; MATUS; MAIRE, 2000).

Tabela 20 – Resultados do conteúdo de amônio e nitratos para um solo de textura areia franca e franco argilo arenosa, para a avaliação realizada no Planalto Central de Bolívia, em quatro épocas de aplicação de esterco, em Patacamaya, no ano de 2011.

Tratamento	Maio	Julho	Setembro	Novembro
Amônio (mg kg solo ⁻¹)				
AF+F	1,00a	0,51a	0,59a	0,77a
AF+Q	0,38b	0,34b	0,25b	0,40b
FarA+F	1,34a	0,80a	0,71a	1,08a
FarA+B	0,48b	0,45b	0,52b	0,67b
Nitrato (mg kg solo ⁻¹)				
AF+F	0,62a	0,72a	0,83a	0,96a
AF+Q	0,46a	0,31a	0,40b	0,41b
FarA+F	0,85a	0,56a	0,74a	0,97a
FarA+B	0,57b	0,42a	0,57b	0,54a
Nitrogênio mineral (mg kg solo ⁻¹)				
AF+F	1,62a	1,22a	1,42a	1,73a
AF+Q	0,84b	0,65b	0,66b	0,81b
FarA+F	2,19a	1,36a	1,45a	2,05a
FarA+B	1,05b	0,87b	1,09b	1,21b

Onde: AF+F (areia franca + festuca); AF+Q (areia franca + quinua); FarA+B (franco argilo arenoso + resíduos de batata) e FarA+F (franco argilo arenoso + festuca). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical, não diferem pelo teste t (P≤0,05).

A mineralização do nitrogênio é muito mais intensa em solos mais arenosos, especialmente se ocorrer revolvimento do solo (FIOREZE et al., 2012), produzindo uma menor acumulação de nitrogênio mineral nestes solos. O uso agrícola provoca

uma diminuição dos níveis de matéria orgânica do solo. Nesse sentido, os solos com vegetação natural, apresentam maior conteúdo de carbono orgânico e nitrogênio nos macroagregados e agregados desenvolvidos nesses sistemas. De acordo com Giacomini e Aita, (2008), em solos de textura arenosa, a ausência de agregados reduz a proteção da matéria orgânica.

Nos resultados obtidos nesse experimento pode-se observar que, a quantidade de nitrogênio mineral decresceu nos meses de Julho e Setembro devido às baixas temperaturas e ocorrência de maior quantidade de chuvas nestes meses no Planalto boliviano (Figura 20). Por outro lado, os conteúdos de nitrogênio mineral forma maiores ao final da época das chuvas (Maio) e no início da estação das chuvas (Setembro), coincidindo com a semeadura das culturas. No entanto, os valores de nitrogênio mineral foram inferiores a 2 mg kg^{-1} de solo.

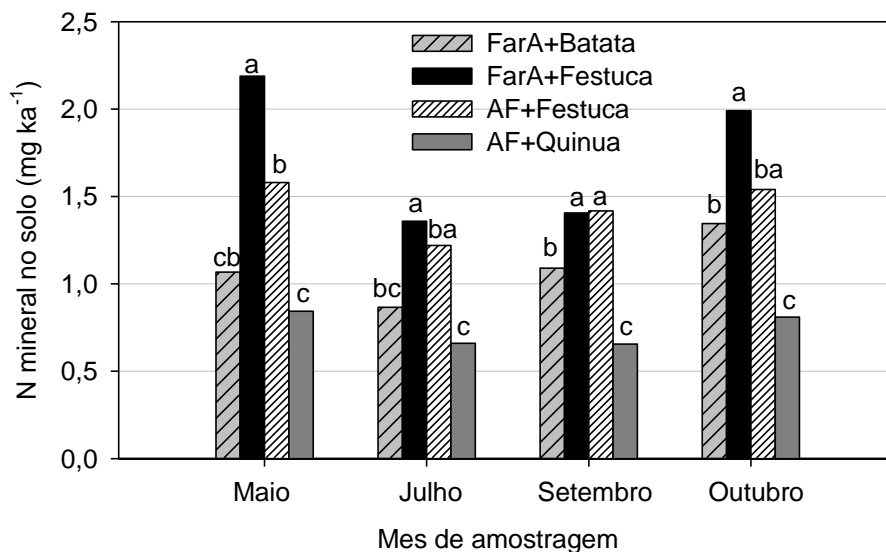


Figura 20 – Resultados do nitrogênio mineral em dois tipos de solo (franco argilo arenoso e areia franca) e duas coberturas vegetais no solo, no Planalto Central Boliviano, no ano de 2011. Médias seguidas da mesma letra no mês não diferem pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$)

Os valores da umidade no solo, no momento da extração das mostras para a avaliação do nitrogênio mineral, estão apresentados na figura 21. Observou-se um maior conteúdo de água no solo no mês de Novembro, porém, não chegando a atingir valores próximos ao da capacidade de campo ($0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o solo com textura franco argila-arenosa e $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o solo de textura areia franca).

Nos solos com maior teor de argila, têm-se maiores retenções de água, em função da melhor estruturação das partículas e maior retenção de água no solo. No solo com textura areia franca com festuca e quinua, os valores do conteúdo de água no solo foram menores nos meses de Julho e Setembro e maiores no mês de Maio e Novembro. O conteúdo de água no solo apresentou um valor de $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, conteúdo esse bem abaixo do valor da capacidade de campo para estes solos. Segundo Sedyama et al. (2008), quando a umidade do solo se encontra abaixo de $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, a atividade microbiana diminui, limitando os processos de mineralização, embora NAVARRO (2003) menciona que os eventos de secagem e umedecimento constituem um fator ambiental que tem importância na mineralização do nitrogênio.

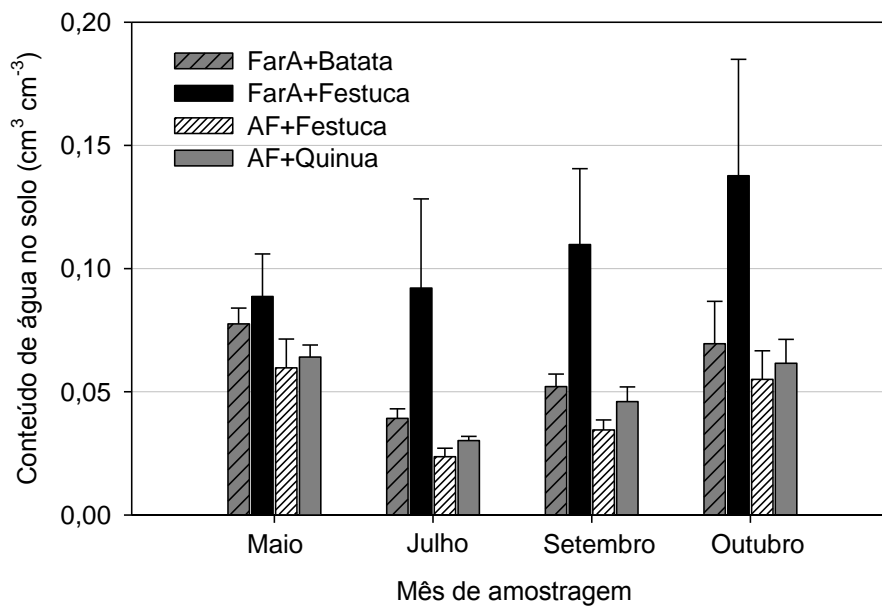


Figura 21 – Resultados do conteúdo de água no solo no momento da extração das amostras para avaliação do nitrogênio mineral no Planalto Central Boliviano, no ano de 2011.

No Planalto Central, em solos cultivados com quinua, os valores do nitrogênio mineral do solo são inferiores a 3 mg kg^{-1} de solo, sendo que, após dois ciclos de cultivo, o solo poderá ficar totalmente degradado, reduzindo sua capacidade nutritiva, com teores muito mais baixos de nutrientes. Por isso, nessa região é necessário estabelecer estratégias de manejo do solo, manejo da matéria orgânica e

da cultura para possibilitar o aumento da matéria orgânica e a manutenção de teores adequados no solo.

Os resultados observados da relação entre o conteúdo de nitrogênio total com o mineral do solo é apresentada na figura 22. Pode-se observar que, no solo de textura areia franca, o conteúdo de nitrogênio total foi duas vezes inferior aos observados no solo franco argilo arenoso. No entanto, no solo com textura areia franca houve uma maior correlação entre o conteúdo de nitrogênio mineral e Nt. Os teores de nitrogênio mineral e do nitrogênio total foram muito baixos, encontrando-se valores de 0,27 a 0,28% do nitrogênio total.

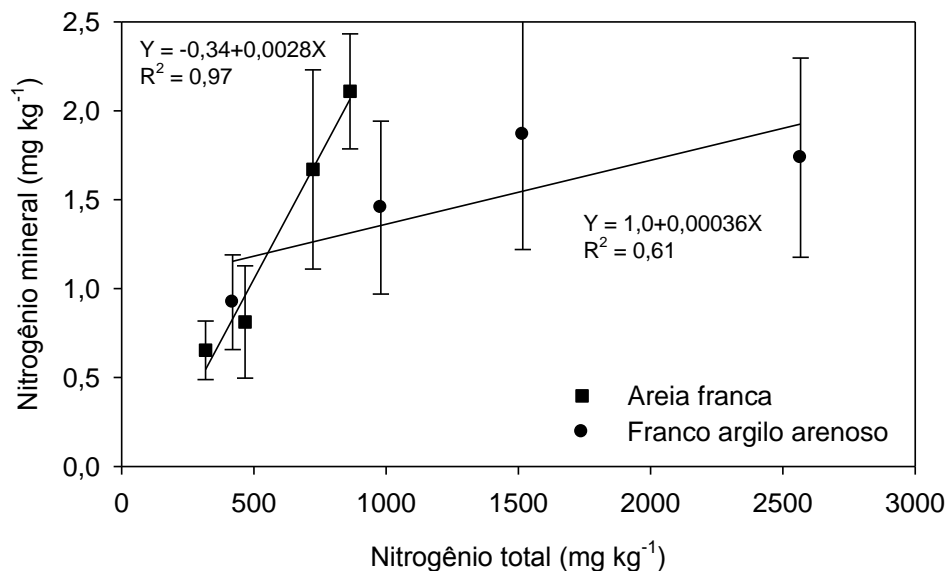


Figura 22 – Resultados da correlação entre o nitrogênio mineral e o nitrogênio total em um solo de textura franco argilo arenosa e areia franca, no Planalto Central Boliviano, no ano de 2011 (as barras verticais representam o desvio padrão entre as médias). Dados de quatro meses de avaliação.

4.4 Experimento 4: Avaliação do nitrogênio mineral e CO₂ do solo em condições controladas de laboratório

4.4.1 Dinâmica do nitrogênio

A mineralização proveniente dos resíduos orgânicos (esterco) pode ser estimada a partir da variação dos conteúdos de NH_4^+ e $NO_2^- + NO_3^-$ do solo em um determinado período de tempo. Por outro lado, a nitrificação é influenciada por uma

série de fatores, tais como, o conteúdo de água no solo, temperatura e manejo dos resíduos orgânicos. Com relação ao nitrogênio na forma de amônio, este tende a diminuir seu conteúdo com o tempo (Figura 23a). Para o primeiro dia de incubação, foram observados maiores conteúdos de NH_4^+ nos tratamentos com maiores quantidades de esterco de ovelha ($10,1 \text{ mg kg}^{-1}$ de NH_4^+), em relação ao solo que não submetido a incorporação de esterco, o qual apresentou $2,26 \text{ mg kg}^{-1}$ de NH_4^+ . Para os dias 15 e 22, o conteúdo de amônio diminuiu de $3,57 \text{ mg kg}^{-1}$ a $1,79 \text{ mg kg}^{-1}$ para o tratamento com aplicação de 30 Mg ha^{-1} de esterco de ovelha. Este mesmo comportamento foi também observado os tratamentos onde forma aplicados 16, 20, e 24 Mg de esterco ha^{-1} , indicando uma rápida mineralização ou imobilização.

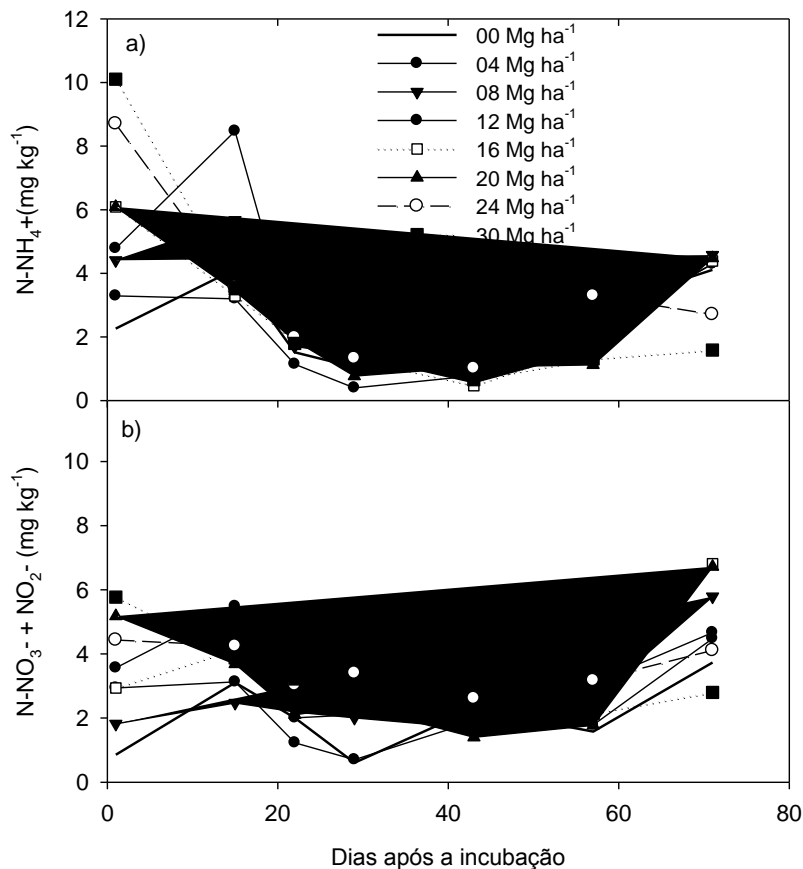


Figura 23 – Resultados da variação do conteúdo das diferentes formas de nitrogênio mineral no solo: a) amônio e b) nitritos + nitratos para diferentes níveis de esterco de ovelha aplicados ao solo, em função do tempo de incubação, Altiplano Central Boliviano, no ano de 2010.

A partir do dia 22, os resultados dos conteúdos de amônio apresentaram oscilações com tendência a manter um valor constante. Segundo DA CAS (2009),

estas oscilações podem ser influenciadas pela intensidade dos processos de mineralização e nitrificação no solo. Para o tratamento testemunha e nas aplicações de 4, 8 e 12 Mg de esterco de ovelha por hectare, se observou um incremento do conteúdo de NH_4^+ até o dia 22, posteriormente, observa-se um comportamento similar nos demais tratamentos. Isto pode ser atribuído à presença de material orgânico solúvel nestes tratamentos e menor quantidade de carbono aplicado com essas doses utilizadas. Estudos realizados no Sul do Brasil, onde as amostras de solo foram incubadas a 25°C utilizando dejetos líquidos de suínos, o conteúdo inicial de NH_4^+ foi de 400 kg ha⁻¹ (250 mg kg⁻¹), o qual diminuiu em sete dias para valores de 3 kg ha⁻¹ (1,87 mg kg⁻¹) (FIOREZE, 2010). Esse mesmo efeito foi reportado por Giacomini (2005).

Em condições do Planalto Boliviano, é possível que as mudanças extremas de temperatura (com até 20°C durante o dia e madrugadas com temperaturas inferiores a 0°C) influenciem na dinâmica do amônio. No presente estudo, as temperaturas médias flutuaram de 13 a 15°C.

Nos tratamentos onde foram aplicados 0, 4, 8, 12 e 16 Mg ha⁻¹ de esterco de ovelha, a nitrificação apresentou valores de nitrito + nitratos menores do que 4 mg kg⁻¹ para o primeiro dia de incubação, enquanto que, para os tratamentos onde foram aplicados entre 20 e 30 Mg ha⁻¹ de esterco, os valores observados de nitrogênio na forma de nitratos e nitritos foram, respectivamente, de 4 a 5 mg kg⁻¹ (Figura 23b). Nestes tratamentos foi observada uma diminuição do conteúdo de nitratos, até 22 dias após a incubação. Após esse período foi observado um incremento com o tempo de incubação. No caso dos tratamentos com aplicações menores que 16 Mg ha⁻¹ de esterco, observou-se um incremento de mineralização para o segundo período de avaliação; posteriormente observou-se uma redução e um comportamento oscilante. Este comportamento possivelmente tenha relação com os menores conteúdos de aporte de carbono e quantidade de nitrogênio no solo, o que incentivou o desenvolvimento dos microrganismos, os quais imobilizaram o nitrogênio do solo, além do nitrogênio já mineralizado, até atingir um equilíbrio, para finalmente aumentar a nitrificação. A grande variação dos teores de nitrogênio mineral e a dinâmica destas formas de nitrogênio indicam claramente que mais estudos devem ser realizados, a fim de validar estes resultados para as condições de cultivo da quinua no Planalto Boliviano.

Até a terceira data de incubação (Figura 24) existiu um decréscimo do conteúdo de amônio e um leve incremento nos nitratos. Não obstante, a partir da quarta data de avaliação, ambos apresentaram o mesmo comportamento até o final do período de incubação, o que possivelmente indica que a nitrificação está correlacionada com a amonificação. Estes resultados são contrastantes com os apresentados por Giacomini (2005) e Fioreze (2010) que, em condições tropicais do Sul do Brasil, encontraram uma tendência de incremento da nitrificação no tempo e um decréscimo de amônio.

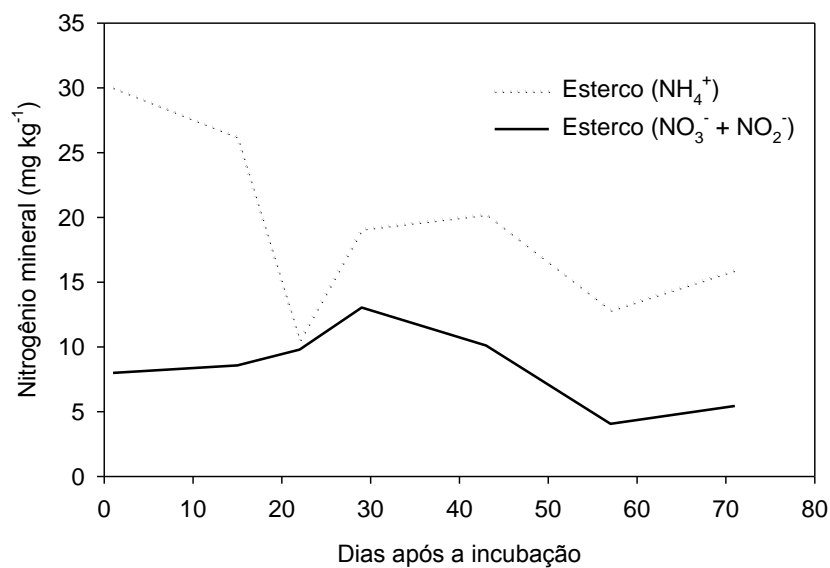


Figura 24 – Variação do nitrogênio mineral do esterco de ovelha, em função do tempo de incubação, de amostras de solo do Altiplano Central Boliviano, no ano de 2010.

Na figura 25 são apresentados os resultados da relação entre o nitrogênio na forma de amônio com o nitrogênio na forma de nitritos e nitratos, por tratamento. Observa-se que existe uma relação entre estes dois parâmetros, sendo que, em um primeiro momento, o NH_4^+ aparece em maior proporção para diminuir seu conteúdo e aumentar a proporção do nitrato a partir do dia 22 de incubação. Portanto, para um solo de textura franco arenosa, submetido à aplicação de diferentes quantidades de esterco de ovelha, pode-se afirmar que, a liberação do nitrogênio na forma de nitratos e nitritos começa aproximadamente a partir dos 57 dias, em condições de umidade do solo próximo da capacidade de campo ($0,20 \text{ g g}^{-1}$) e temperatura do solo entre 13 e 15°C. Observa-se também que, nos tratamentos em que não foi realizada

a incorporação do esterco de ovelha e nos que receberam 4 e 8 Mg ha⁻¹ de esterco de ovelha apresentaram um comportamento similar na liberação do nitrogênio, observando-se um pequeno incremento na liberação no tratamento em que foi aplicado 8 Mg ha⁻¹ de esterco. Nos tratamentos em que foram aplicados 12, 16 e 20 Mg ha⁻¹ de esterco observou-se maiores valores de amônio e nitratos, com diminuição até o dia 57, sendo que, a partir desse dia, ocorreu uma maior liberação do nitrogênio mineral, acima de 6 kg ha⁻¹ (4 mg kg⁻¹).

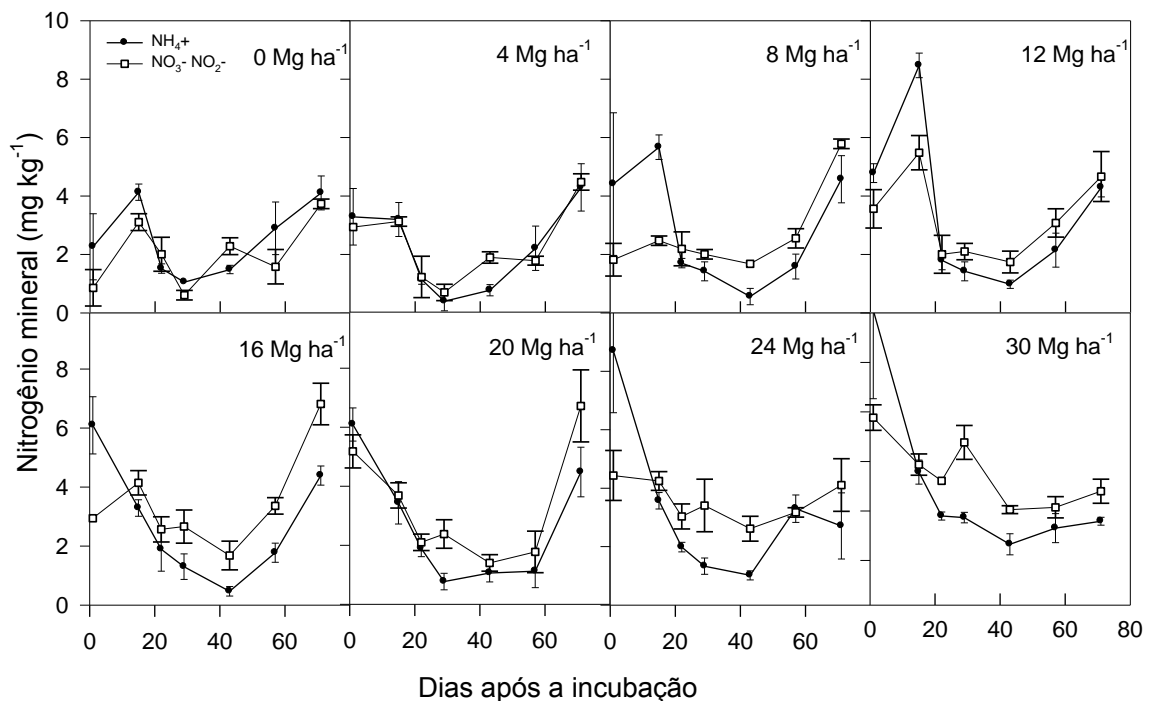


Figura 25 – Resultados da variação da concentração das diferentes formas de nitrogênio (NH_4^+ e $NO_2^+ + NO_3^+$) em um solo franco arenoso em função a diferentes níveis de aplicação de esterco de ovelha e de dias após a incubação (as barras verticais representam o desvio padrão entre as médias).

Jofre (1990), em um estudo realizado na Espanha, avaliando os conteúdos de amônio e nitratos em função do tempo e em condições de campo, encontrou resultados similares de comportamento nos valores de amônio e nitratos, ou seja, que ambos os parâmetros diminuíram e aumentaram paralelamente em função do tempo, ocorrendo maiores teores de amônio no solo.

4.4.2 Mineralização e imobilização do nitrogênio

A dinâmica do nitrogênio varia em função do tempo. Nos primeiros dias após a aplicação do esterco ocorreu mineralização até a quantidade aplicada no tratamento com 12 Mg ha⁻¹ de esterco; para quantidades maiores de esterco aplicadas, a imobilização foi o processo predominante (Figura 26).

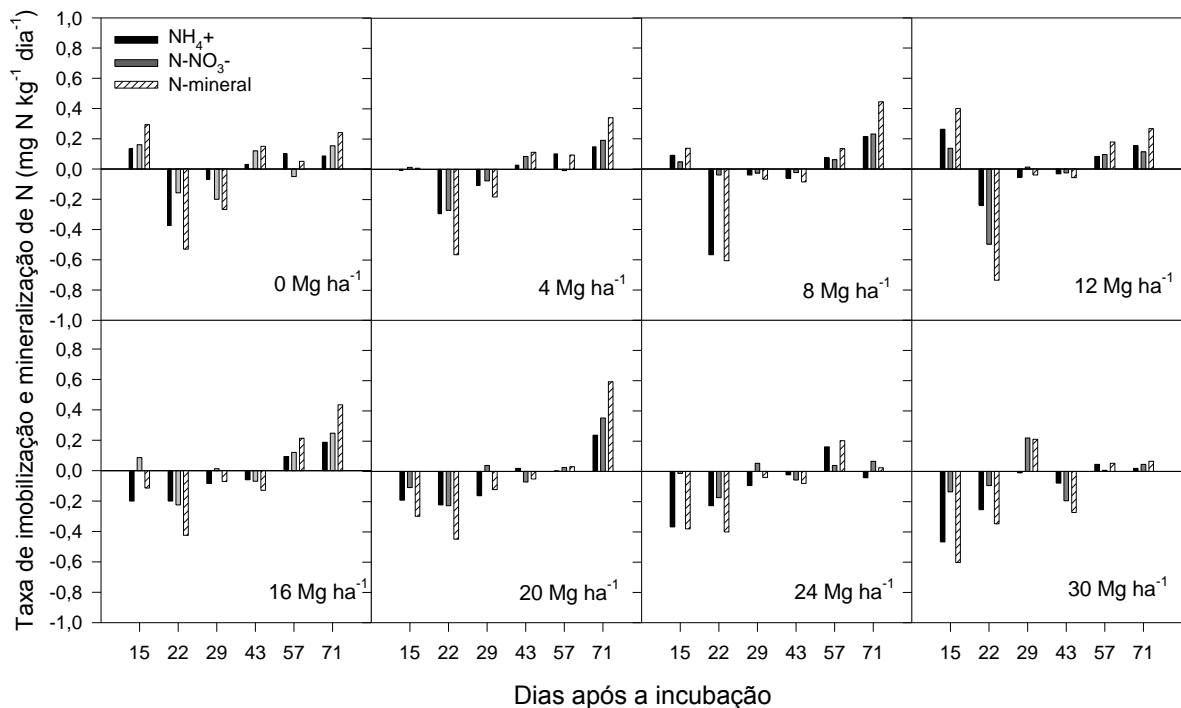


Figura 26 – Resultados da imobilização e mineralização do amônio, nitritos+nitratos e nitrogênio mineral, em solo com diferentes níveis de aplicação de esterco de ovelha. Avaliação realizada em laboratório da Faculdade de Agronomia da cidade de La Paz, com amostra de solo do Planalto Central Boliviano, no ano de 2010.

Quanto maior a aplicação de esterco, maior a imobilização por parte dos microrganismos, já que a taxa de mineralização foi negativa. A partir do dia 57 verificou-se que a mineralização foi o processo predominante, com maior intensidade nos tratamentos onde foram aplicados 8, 12, 16 e 20 Mg ha⁻¹ de esterco.

Aos 57 e 71 dias após a incubação, a mineralização do nitrogênio foi de 0,62 e 0,64 mg kg⁻¹ dia⁻¹, respectivamente, nos tratamentos onde foi aplicado 16 e 20 Mg ha⁻¹ de esterco. A mineralização do nitrogênio diminuiu com aplicações acima desses níveis. Portanto, para maiores teores de esterco aplicado ao solo, a taxa de

mineralização foi afetada, ou seja, demorou mais tempo para mineralizar-se (Figura 27).

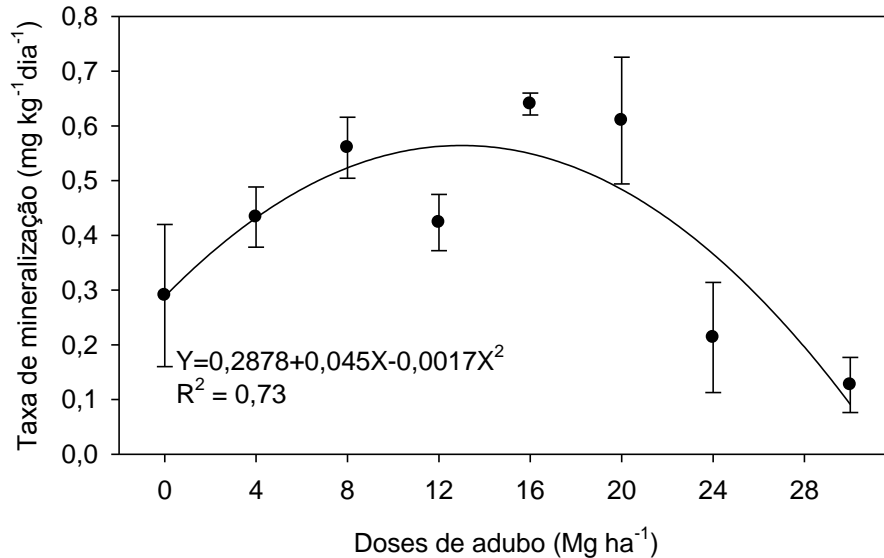


Figura 27 – Resultados da taxa de mineralização do nitrogênio mineral, entre os dias 57 e 71 após a incubação, em um solo franco arenoso do Planalto Central Boliviano, no ano de 2010. As barras verticais representam o desvio padrão entre as médias.

4.4.3 Mineralização do carbono

A velocidade de mineralização do carbono dos diferentes tratamentos foi elevada nos primeiros 10 a 15 dias após o início da incubação, variando entre 0,3 a 0,6% por dia (Figura 28). No tratamento que recebeu a aplicação de 4 Mg ha⁻¹ observou-se um comportamento diferente quanto a mineralização do carbono, que foi mais elevada entre os dias 10 e 15 após o início da incubação. Esta rápida mineralização do carbono pode ter ocorrido devido à presença de compostos fracos presentes no esterco. Compostos pouco recalcitrantes são decompostos, enquanto os elementos mais resistentes como a lignina são decompostos por organismos mais especializados como fungos e bactérias, as quais sintetizam enzimas necessárias para decompor a matéria orgânica de difícil decomposição. Na etapa final de decomposição, a velocidade de decomposição é lenta e, portanto, usualmente apresenta valores constantes (DA CAS, 2009; SYLVIA, 1998).

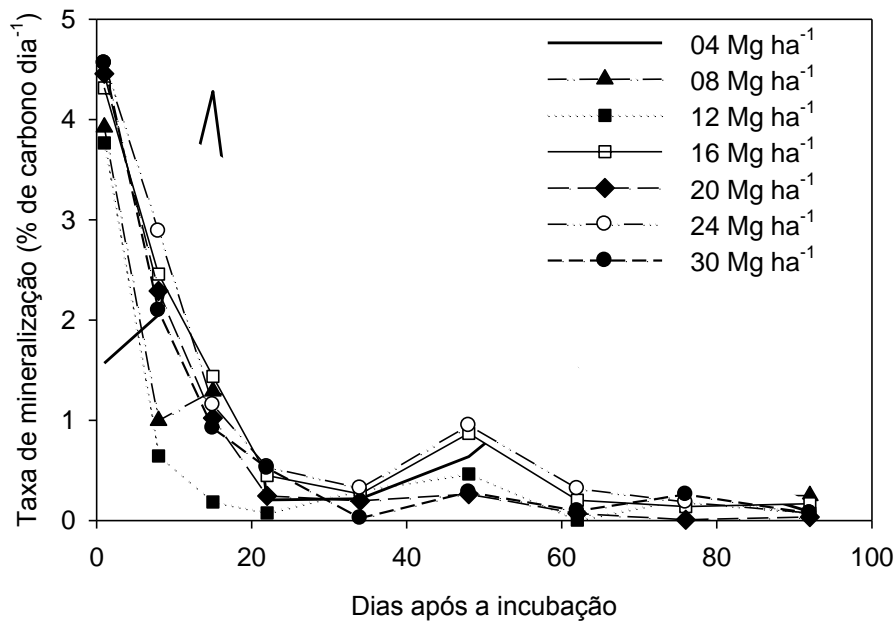


Figura 28 – Resultados da taxa de mineralização de carbono no solo submetido a diferentes níveis de aplicação de esterco de ovelha, após 92 dias de incubação em um solo franco arenoso do Planalto Central Boliviano, no ano 2010.

Observando a figura 28 verifica-se que todos os tratamentos com diferentes quantidades aplicadas de esterco de ovelha apresentaram maior velocidade de mineralização nos primeiros dias. Além disso, foi observada uma maior velocidade de mineralização nos tratamentos em que foram aplicadas as maiores quantidades de esterco de ovelha. Isso provavelmente ocorreu devido a grande quantidade de biomassa e carbono incrementado ao solo, visto que, ao aumentar o nível de esterco no solo, esta também incrementando a quantidade de carbono orgânico total no solo. Assim, ao incorporar 4, 8, 12, 16, 20, 24, e 30 Mg ha⁻¹ de esterco ao solo se está incorporando, respectivamente, carbono orgânico total ao solo nas quantidades de 579, 1.158, 1.737, 2.316, 2.895, 3.474 e 4.342,5 mg kg⁻¹ de solo.

Os resultados da mineralização do carbono acumulado (Figura 29) nos diferentes tratamentos demonstra que o tratamento sem aplicação de esterco (somente com solo) apresentou a menor mineralização em relação aos tratamentos nos quais foram aplicados maiores quantidades de esterco, sendo mais evidente nos tratamentos com mais de 16 Mg ha⁻¹ de esterco.

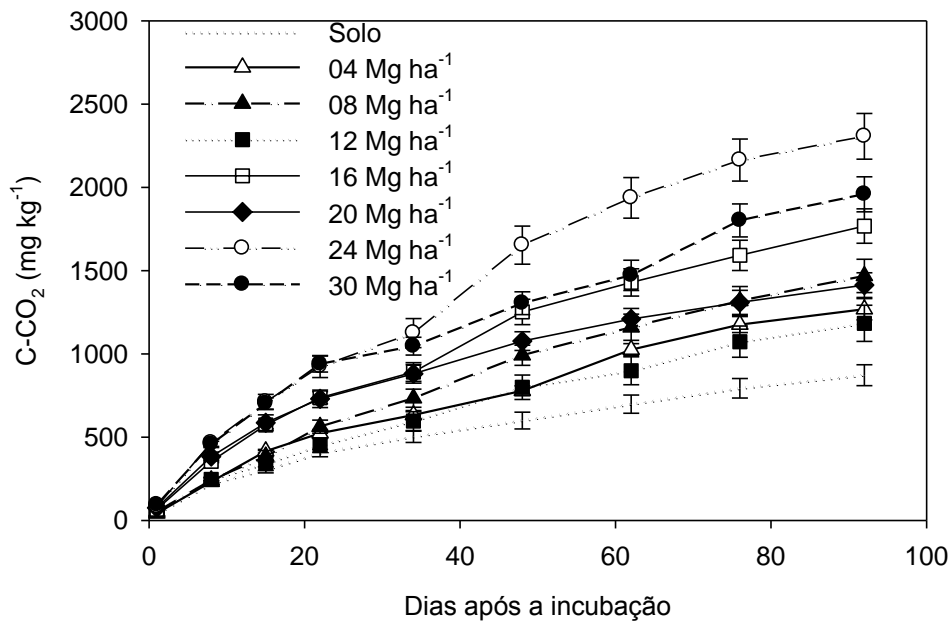


Figura 29 – Resultados dos valores acumulados de carbono mineralizado do solo com a aplicação de diferentes quantidades de esterco de ovelha em um solo franco arenoso, no Planalto Central da Bolívia, no ano de 2010. As barras verticais representam o desvio padrão entre as médias.

4.4.4 Relação carbono: nitrogênio

Na tabela 21 são apresentados os resultados de carbono, nitrogênio total e a relação C/N do tratamento sem incorporação de esterco (testemunha) e dos tratamentos que receberam 4, 12 e 30 Mg ha⁻¹ de esterco. Inicialmente o solo apresentava valores de 0,97; 1; 1,13 e 1,14% de carbono, para o tratamento testemunha (solo) e 4, 12 e 30 Mg ha⁻¹ de esterco de ovelha aplicado, respectivamente. No final da incubação, estes valores diminuíram para 0,52; 0,56; 0,6 e 0,63%, para o tratamento testemunha e 4, 12 e 30 Mg ha⁻¹ de esterco aplicado, respectivamente. Estes valores indicam uma diminuição de 45% para os diferentes tratamentos.

No caso do nitrogênio total, também houve uma diminuição de seu conteúdo em relação às condições iniciais e do final do período de incubação (Tabela 21) que, em média, representaram 36% de redução. A relação C/N também diminuiu com o passar do tempo, com valores de aproximadamente 13% para todos os casos.

Tabela 21 – Porcentagem de carbono orgânico total e nitrogênio inicial e final de quatro tratamentos, em experimento conduzido no laboratório da Faculdade de Agronomia, Bolívia, em 2010.

Tratamento	% Carbono		% Nitrogênio		Relação C/N	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Solo	0,97	0,52	0,09	0,05	11,28	10,40
4 Mg ha ⁻¹	1,00	0,56	0,08	0,06	13,33	9,33
12 Mg ha ⁻¹	1,13	0,60	0,09	0,05	12,02	12,00
30 Mg ha ⁻¹	1,14	0,63	0,09	0,06	12,67	10,50

No solo, o nitrogênio se encontra em forma orgânica e inorgânica. Apesar de ser praticamente indisponível para as plantas, a forma orgânica predomina nos compostos orgânicos, em forma de aminoácidos, proteínas, açúcares e outros compostos complexos. Para determinar a porcentagem de nitrogênio disponível foi transformado o nitrogênio total inicial dos quatro tratamentos (testemunha; solo+ 4 Mg ha⁻¹ de esterco; solo+12 Mg ha⁻¹ de esterco; solo+30 Mg ha⁻¹ de esterco e somente esterco). Também foi determinado o valor médio do nitrogênio aos 71 dias e este valor foi expresso em porcentagem (Tabela 22).

Tabela 22 – Porcentagem do nitrogênio mineral em função do conteúdo de esterco de ovelha utilizado no experimento conduzido no laboratório de Agronomia da Bolívia, em 2010.

Tratamento	N total	N mineral	N total	N mineral
	mg kg ⁻¹		%	
Solo	900	4,5	0,09	0,500
4 Mg ha ⁻¹	800	4,5	0,08	0,563
12 Mg ha ⁻¹	900	6,6	0,09	0,733
30 Mg ha ⁻¹	900	6,5	0,09	0,722

O nitrogênio mineral final expresso em porcentagem aumentou com a aplicação do esterco de ovelha ao solo, no entanto, os conteúdos foram inferiores a 1%. O nitrogênio orgânico encontrado no solo apresentava quantidades de 80 a 95%, segundo as condições de clima e de solo (CANTARELLA, 2007; ECHEVERRIA; SAINZ, 2006). Salm (1983), em um estudo sobre a mineralização do nitrogênio, realizado no Planalto Central da Bolívia, encontrou valores de nitrogênio mineral no solo entre 1 e 2%.

4.5 Conteúdo de água no solo

É conhecido que o conteúdo de água no solo influencia os processos de decomposição e mineralização (NAVARRO, 2003). Os valores de capacidade de campo e ponto de murcha foram estimados utilizando-se o modelo AquaCrop, tendo por base os resultados de textura do solo como parâmetro dessa determinação, em função da dificuldade de coleta de amostras de solo indeformadas em nível de campo, para a estimativa desses parâmetros em laboratório utilizando as placas porosas de Richards. Utilizou-se o valor de $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o ponto de murcha e de $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para a capacidade de campo (RAES, 2002). Na figura 30 são apresentadas as variações da umidade do solo na camada superficial do perfil do solo (0-20 cm de profundidade). A semeadura da quinua foi realizada no mês de Novembro, quando o solo apresentava umidade inferior ao valor da capacidade de campo. No mês de Janeiro ocorreram precipitações pluviais que elevaram o conteúdo de água no solo acima da capacidade de campo. Após esse período, ocorreu um decréscimo nos valores de conteúdo de água no solo até o mês de Março, quando foi necessário aplicar irrigações suplementares de 67 mm de água. Irrigações foram aplicadas durante os meses de Março e Abril. Os resultados do conteúdo de água no solo não foram influenciados pelas diferentes doses de esterco aplicadas.

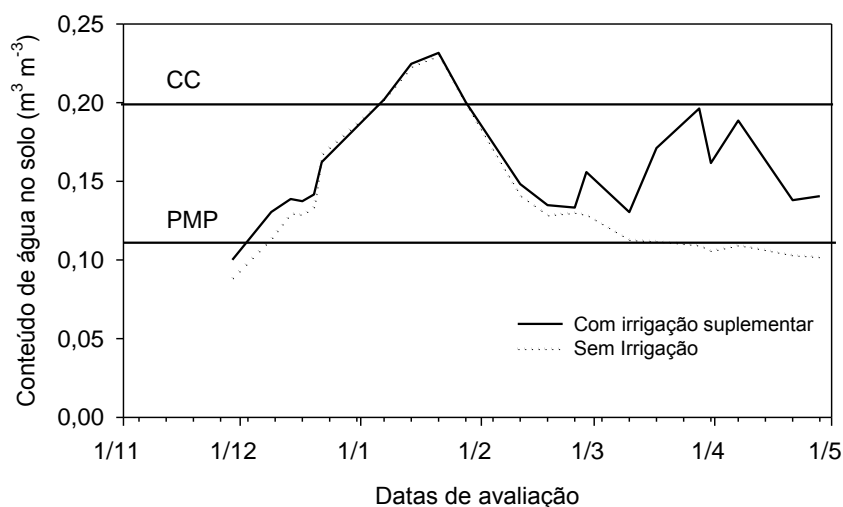


Figura 30 – Resultados medidos em nível de campo do conteúdo de água no solo, no experimento com e sem irrigação suplementar, conduzido na comunidade de Irpani, no ano agrícola de 2007/08.

Para comparar os resultados de umidade medidos em nível de campo com os estimados pelo modelo AquaCrop, a umidade do solo foi expressa em mm m^{-1} de profundidade (Figura 31). Os resultados de umidade do solo estimados pela simulação realizada pelo modelo AquaCrop foram superestimados nos primeiros dias do desenvolvimento do cultivo e subestimados na parte final do ciclo de desenvolvimento da quinua. Importante mencionar que o objetivo principal dessa simulação não foi o de calibrar o modelo, mas somente utilizar essa ferramenta e identificar a sensibilidade do modelo aos incrementos de fertilizantes orgânicos aplicados a cultura da quinua.

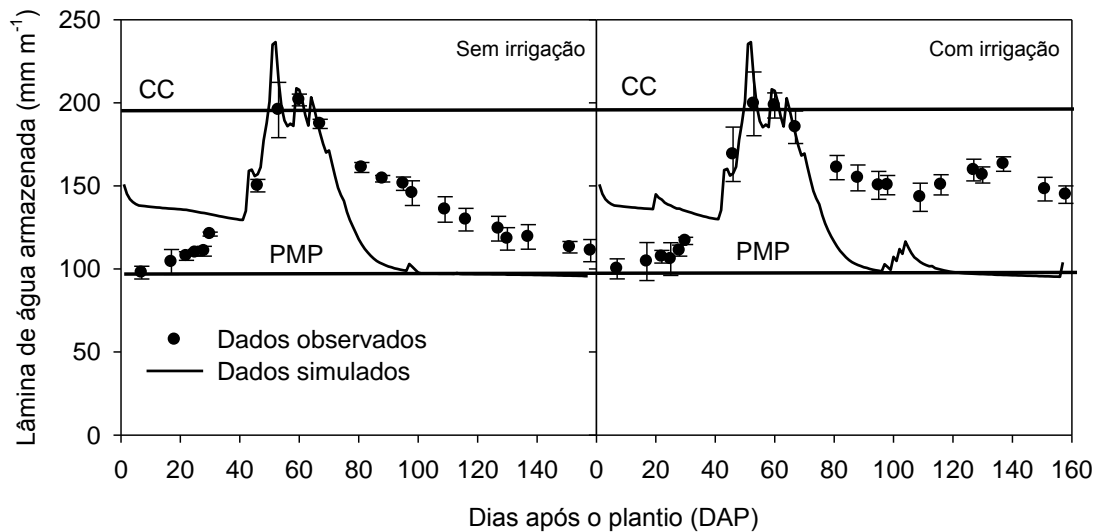


Figura 31 – Resultados de umidade do solo na camada superficial do perfil do solo medidos em nível de campo e simulados pelo modelo AquaCrop durante o ciclo de desenvolvimento da quinua. Avaliação realizada no experimento realizado no Planalto Sul Boliviano, comunidade de Irpani, no ano agrícola de 2007/08.

No experimento conduzido em Patacamaya, as aplicações de esterco de ovelha aplicadas nos meses de Maio, Julho e Setembro não resultaram em diferenças significativas nos valores de umidade do solo entre os diferentes tratamentos. A aplicação de irrigação realizada no mês de Março (floração) resultou em um ligeiro aumento nos valores medidos de umidade do solo (Figura 32).

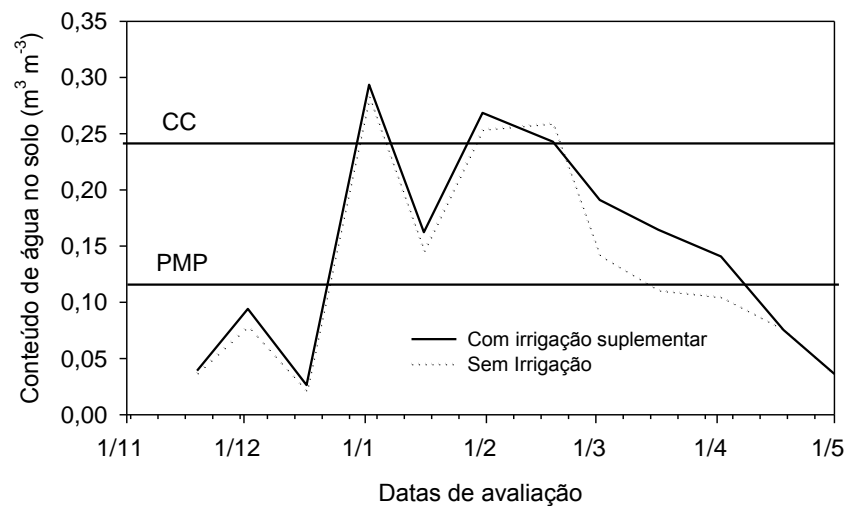


Figura 32 – Resultados medidos em nível de campo do conteúdo de água no solo, no experimento com e sem irrigação suplementar, conduzido na comunidade de Patacamaya, no Planalto Central Boliviano no ano 2009/10.

A coleta de amostras de solo para a determinação do conteúdo de água no solo, com frequência de 20 dias não foi suficiente para compreender todas as variações observadas na umidade no solo durante o ciclo de desenvolvimento da quinua. Em Patacamaya, a precipitação pluvial durante o ciclo da cultura foi de 371 mm, o que pode ser considerado elevado, considerando a média normal de precipitação pluvial da região. Além disso, nesse ano as precipitações iniciaram em Dezembro e o período de chuvas se estendeu até Abril. No caso da quinua, autores como Geerts (2008) e Patti (2009) relatam que, o período de floração é o mais sensível às baixas temperaturas e ao déficit hídrico, embora a cultura também seja sensível ao excesso de umidade do solo, especialmente no subperíodo de enchimento de grão.

Não foi possível simular resultados de umidade do solo para os diferentes níveis de esterco de ovelha utilizados, isso porque o modelo possibilita simular níveis distintos de fertilidade com relação à nutrição das plantas e não associa a aplicação de fertilizantes orgânicos como incremento de melhorias das condições físico-químicas do solo, ou ainda, da presença de salinidade nos solos. Além disso, o modelo tampouco considera o efeito das pragas e/ou doenças que podem ocorrer durante o desenvolvimento da cultura, aspectos estes importantes na quantificação da produtividade. Na figura 33 são apresentados os resultados observados de umidade do solo para as aplicações de esterco realizadas nos meses de Maio, Julho e Setembro e os resultados simulados de umidade pelo modelo AquaCrop.

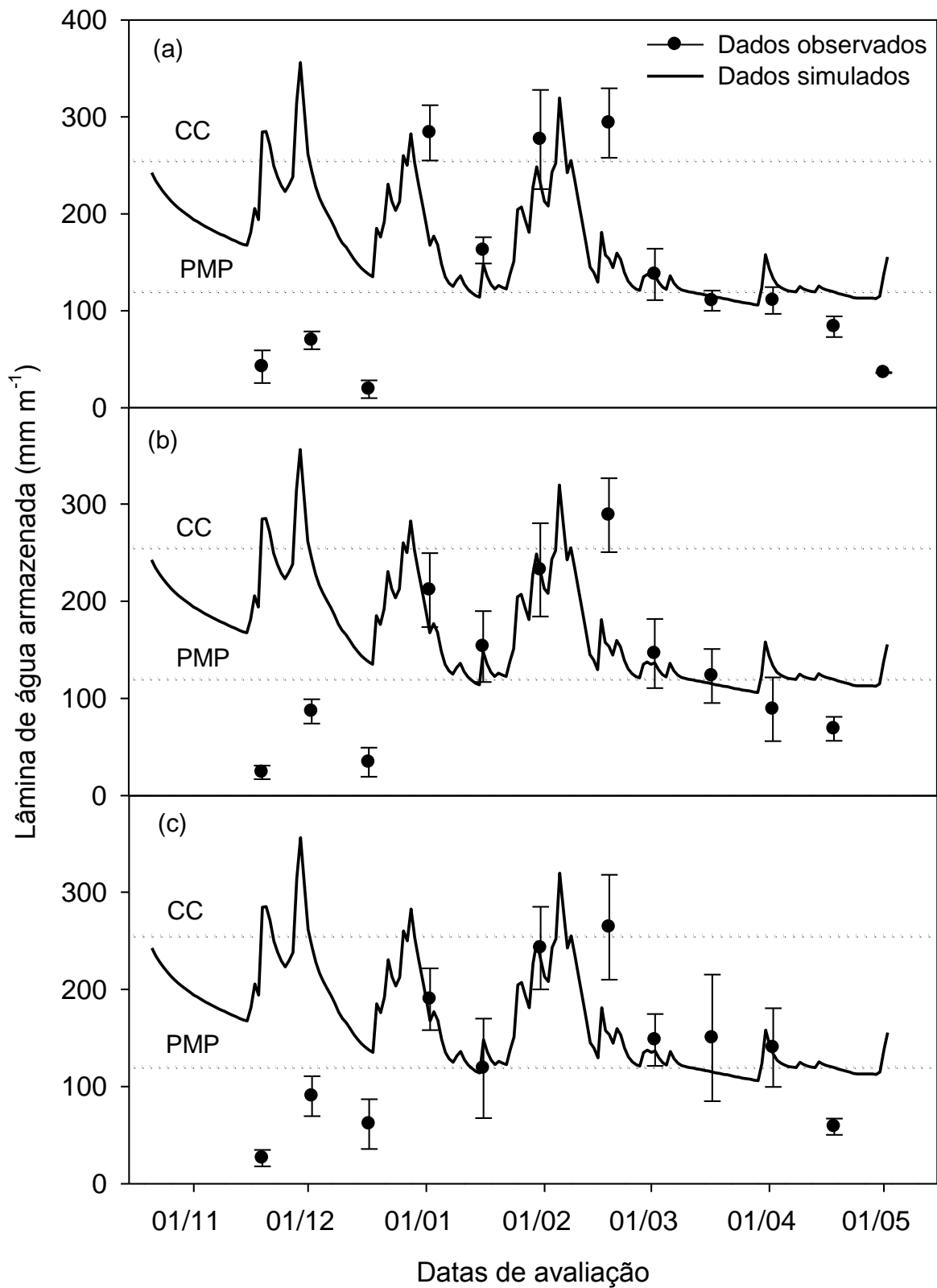


Figura 33 – Variação da umidade do solo durante o ciclo do cultivo da quinua, para três épocas de aplicação do esterco com dados reais e valores simulados pelo Modelo AquaCrop, no Planalto Central Boliviano no ano agrícola de 2009/10.

A eficiência dos resultados modelados (EM) foi de 0,57 para Patacamaya e de 0,55 para Irpani. Segundo Arbat et al., (2003), se o índice de modelação, que correlaciona os dados observados experimentalmente e os dados simulados for próximo a 1, mais semelhantes são os resultados simulados pelo modelo.

Levando em consideração as limitações descritas anteriormente, Geerts (2008) e Saavedra (2011) estimaram a produtividade da quinua variando de 200 a 800 kg de grão ha⁻¹ quando as condições de chuva são reduzidas e normais, respectivamente. São consideradas chuvas reduzidas quando o total de chuvas é de aproximadamente 100 mm e, condição normal, quando o total de chuvas é superior a 400 mm anuais. Garcia et al. (2003) menciona que, a data de início das chuvas no Planalto de Bolívia apresenta elevada variação de Norte para Sul. Quando as chuvas ocorrem tardiamente no Sul é provável que seja um ano com estiagem mais severa, ao contrario, quando as chuvas iniciam no mês de Setembro, a probabilidade de ser um ano normal (considerado úmido para a região) é maior. É importante mencionar que será necessário conduzir um maior número de trabalhos de campo, com mais sensores e equipamentos, com finalidade de calibrar e ajustar o modelo AquaCrop para as condições de cultivo no Planalto Boliviano.

5 CONCLUSÕES

No Planalto Sul Boliviano a produtividade da quinua foi influenciada pelas condições de clima e solo (200 mm anuais e 0,03% de nitrogênio total no solo). No entanto, o rendimento foi incrementado em um 300% quando foi adicionada 12 Mg de esterco e complementada com aplicações de água no momento da floração e grão leitoso.

A antecipação da incorporação ao solo do esterco de ovelha nos meses de Maio e Julho aumentou a produtividade da quinua no Planalto Central e Sul da Bolívia. O maior rendimento de grãos de quinua (máxima eficiência técnica) foi obtida com a aplicação de 15 Mg de esterco de ovelha ha^{-1} e complementadas com irrigação suplementar no subperíodo de floração das plantas.

A eficiência de utilização de nitrogênio pelas plantas de quinua, cultivadas no Planalto Central e Sul da Bolívia, aumentou com as aplicações de esterco no mês de Maio e com doses superiores a 15 Mg ha^{-1} . A eficiência de utilização de nitrogênio não foi influenciada pela irrigação suplementar aplicada nos subperíodos da floração e enchimento de grãos.

Os conteúdos de nitrogênio mineral nos solos de textura areia franca, após dois ciclos consecutivos de cultivo da quinua, foram inferiores a 2 mg de nitrogênio mineral kg^{-1} de solo. Maior acúmulo de nitrogênio mineral foi observado no solo franco argilo arenoso e com cobertura de vegetação natural.

A taxa de mineralização do nitrogênio, em experimento conduzido em condições laboratoriais controladas, foi de 0,62 a 0,64 mg $\text{kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$ para a aplicação de 16 e 20 Mg ha^{-1} de esterco de ovelha e a mineralização do carbono de 0,3 a 0,6% dia^{-1} .

O modelo AquaCrop apresentou eficiência de simulação dos resultados de umidade do solo entre 0,55 e 0,57 para o experimento conduzido em Irpani e Patacamaya. O modelo AquaCrop não simula adequadamente as variações de fertilidade do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. et al. **Evapotranspiración del Cultivo**: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2006. 299 p.

ALANOCA, C. et al. **Manejo tradicional del cultivo de La Canahua. Preparación del terreno y siembra**. La Paz. PROINPA. 2008. 8p.

ALVAREZ, R. **Materia Orgánica. Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos**. Argentina. Ed. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, 2006, 206 p.

ARBAT, G. et al. Evaluación de los modelos numéricos de flujo de agua en el suelo HYDRUS-2D y SIMDAS en riego localizado. In: ÁLVAREZ-BENEDÍ, J.; MARINERO, P. **Estudios de la zona no saturada del suelo**. Valladolid: Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (I.T.A.), 2003. v.6, p.279-288. (Actas de las VI Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo). 2003.

ARNS, A. P. **Eficiência fertilizante da cama Sobreposta de suíno**. 2004. 114f. (Dissertação de Mestrado) - Universidade de Passo Fundo, 2004.

BERTI, M. et al. Fertilización nitrogenada em Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). **Ciencia e Investigación Agraria**, Chillan. v. 27, n. 2, p. 81-90, 1997.

BERTIN, P.; GALLAIS. A. Genetic variation for nitrogen use efficiency in a set of recombinant maize inbred lines. I. Agrophysiological results. **Maydica**, n. 45, p. 53-66. 2000

BHARGAVA, A.; SHUKLA, S.; OHRI, D. Genetic variability and heritability of selected traits during different cuttings of vegetable (*Chenopodium*). **Indian Journal of Genetics Plant Breeding**, v. 63, n. 4, p. 359–360. 2003.

BOSQUE, H.; LEMEURE, R.; VAN DAMME, P. Análisis eco fisiológico del cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), en condiciones de estrés de la sequia y la salinidad. **Tropicultura**. Bruselas.v. 18, n. 2, p. 198-202, 2000.

BOSQUE, H. et al. Ecophysiological Analysis of Drought and Salinity Stress of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). **Food reviews international**. Madison. v. 19, n. 2, p. 111–119, 2003.

BOTTNER, P. et al. Modelización de la evolución de la materia orgánica en suelos en descanso (Planalto seco boliviano). **Ecología en Bolivia**, La Paz. v. 41, n. 3, p. 116 – 132, 2006.

CALDERON, I. et al. Relación de aminoácidos esenciales en 12 ecotipos de quinua real y tres variedades comerciales. In: III CONGRESO MUNDIAL DE A QUINUA, 2010, Oruro. **Anais...** Oruro Bolivia 2010.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: FERREIRA, R. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, Minas Gerais. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. p. 375-470.

CATARI, B. **Evaluación del rendimiento de cinco variedades de avena forrajera (*Avena sativa* L.) con abonamiento de estiércol de ovino en el Planalto Central**. 2002. 112f. Tesis de Licenciatura- Universidad Mayor de San Andrés, La Paz Bolivia, 2002.

CAYUELA, M. L.; SINNICCO, T.; MONDINI, C. mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil. **Science Direct**. Murcia. v. 41, p. 118-127, 2009.

CERETTA, C. A. et al. Produtividade de grãos de milho, produção de matéria seca e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio na rotação aveia preta/milho/nabo forrageiro com aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Ciência Rural**, Santa María, v.35, n.6, 2005.

CONDORI, O. **Evaluación participativa del riego deficitario y de fertilización orgánica sobre el desarrollo y rendimiento de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el Planalto Sur**. 2007. 127f. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz– Bolivia. 2007.

DA CAS, V. L. S. **Mineralização do carbono e do nitrogênio no solo com o uso de lodo de esgoto e palha de aveia**. 2009. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

DA LUZ, L. A. **Dinâmica do carbono durante a decomposição de palha de trigo marcada com ¹³C e dejetos líquidos de suínos**. 2007. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

DEL CASTILLO, C. et al. Genetic structure of quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) from the Bolivian Planalto as revealed by RAPD markers. **Genetic Resources and Crop Evolution**. v. 54, p.897–905, 2006.

DELATORRE, J.; HERRERA. Current use of Quinoa in Chile. **Food Reviews International**, v. 19, n. 1, p. 155 – 165. 2003.

DIZÈS J.; BONIFACIO A. Estudio en microscopia electrónica de la morfología de los órganos de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y de la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* A.) en relación con la resistencia a la sequía. In: Morales D. e Vacher J.J., eds. **Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos**. La Paz: IBTA/ORSTOM/CIID, 1992. 69-74 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Ministério de Agricultura e de Abastecimento, 1997. 212p.

ECHEVERRIA, H. E.; SAINZ, H. R. Nitrógeno. In: ECHEVERRIA, H. E.; GARCIA, F. O. (Eds). **Fertilidad de suelo y Fertilización de cultivo**, Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. 2006. p. 69-97.

ERQUINIGO, F. **Biología Floral de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd)**. 1970. 89f. Tesis de Licenciatura - Universidad Técnica del Planalto, Puno Perú, 1970.

FAO. **La Quinoa: Cultivo milenário para contribuir a La seguridad alimentaria mundial**. Oficina regional para el Caribe y América Latina. 2011. 66 p.

FAUTAPO. **Fertilidad, uso y manejo de suelos em la zona del intersalar, departamentos de Oruro y Potosí**. 2007. Potosí Bolivia, 101 p.

FAUTAPO. **Estudio de suelos del área productora de quinua Real Planalto sur boliviano**. 2008. Sucre – Bolivia, 153 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FIOREZE, C. **Liberação de nitrogênio em diferentes solos e épocas de cultivo sob adubação orgânica**. 2010, 117f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria. 2010.

FIOREZE, C. et al. Liberação do N em solos de diferentes texturas com ou sem adubos orgânicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42. n. 7, p. 1187-1192, 2012.

GALWEY, N. W. The potential of quinoa as multipurpose crop for agricultural diversification: a review. **Industrial Crops and products**, v. 1, p. 101–106, 1993.

GANDARILLAS, H. **Genética y origen. In: Quinoa y Cañawa. Central Internacional para el desarrollo**. Bogotá-Colombia, 1979. 45-46 p.

GARCIA, M.; RAEZ, D.; JACOBSEN, S.E. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. **Agricultural Water Management**, v. 60, p. 119–134, may. 2003.

GARCIA, M; TABOADA, C; YUCRA, E. **Evaluación de las tendencias Del balance Hídrico como indicador del Cambio Climático**. Ministerio de Planificación del Desarrollo, Reino de los países Bajos. La Paz Bolivia, 2006, 42 p.

GEERTS, S. et al. **Revisión Bibliográfica de los últimos avances en el conocimiento de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd)**. QUINAGUA, Consejo Interuniversitario Flamenco VLIR, La Paz Bolivia, 2008. 30 p.

GEERTS, S. **Deficit irrigation strategies via crop water productivity modeling: Field research of quinoa in the Bolivian Altiplano**. 2008. 211f. Tese (Doutorado em Bio-ingenieurswetenschappen) – Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica, 2008.

GIACOMINI, S. J. **A Avaliação e modelização da dinâmica de carbono e nitrogênio em solo com o uso de dejetos de suínos**. 2005. 247f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

- GIACOMINI, S. J.; AITA, C. Emissão de dióxido de carbono após aplicação de dejetos líquidos e cama sobrepost a de suínos. **Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília**, v. 43, n. 1, p. 107-114, 2008.
- HASSINK, J. Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. **Soil Biology Biochemistry**. v. 26, n. 9, p. 1221-1231, 1994.
- HERVE, D.; LEDEZMA, R.; ORSAG, V. **Limitantes y manejo de los suelos salinos y/o sódicos en el Planalto Boliviano**. Institut de recherche pour le development, CONDESAN, La Paz Bolivia, 2002. 263 p.
- HERVE, D.; BECK, E. Balance de investigaciones sobre la reconstitución de la fertilidad del suelo en el Altiplano central Boliviano. **Ecología en Bolivia**, La Paz. v. 41, n. 3, p. 1-19, 2006.
- HERVE, D.; MITA, V.; COUTEAUX, M. M. Construcción de un balance de nitrógeno en cultivos de papa bajo rotación con largo descanso. **Ecología en Bolivia**, La Paz. v. 41, n. 3, p. 133-153, 2006.
- HUANCA, R. **Evaluación de diferentes niveles de abono orgánico y riego deficitario sobre el desarrollo y rendimiento de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el Planalto Central**. 2008. 147F. Tesis de licenciatura- Universidad Mayor de San Andrés. La Paz Bolivia, 2008.
- HUGGINS, D.; PAN, W.; SMITH, J. **Yield Protein and nitrogen use efficiency of Spring Wheat: Evaluating Field – Scale Performance**. Climatic Friendly Farming. CSNR Research Report 2010 –001. Disponible em: <http://csanr.wsu.edu/publications/researchreports/CFF%20Report/CSANR2010-001.Ch17.pdf>. Acceso em: 25 jul. 2011.
- INDA, R. **Evaluación del comportamiento del nitrógeno, en parcelas con cultivo de quinua bajo diferente manejo de suelos (Municipio Salinas de Garci Mendoza)**, Oruro. 2010. 138f. Tesis de Licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz Bolivia. 138 p.
- JACOBSEN, S. E. The situation for quinua and Production in Southern Bolivia: From Economic Success to Environmental Disaster. **Journal of agronomy and Crop Science**. Berlin. v. 197, p. 390-399, 2011.
- JENSEN, C. R. et al. Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying. **European Journal of Agronomy**, n. 13, p. 11-25, 2000.
- JOFFRE, R. Plant and soil nitrogen dynamics in mediterranean grasslands: a comparison of annual and perennial grasses. **Oecologia**, Madrid. v. 85, n. 1, p. 142-149, 1990.

- KNIES, A. E. **Temperatura e umidade de um solo franco Arenoso cultivado com milho**. 2010. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, 2010.
- KOLCHINSKI, E. M.; SCHUCH, L. O. B. Eficiência no uso do nitrogênio por cultivares de aveia branca de acordo com a adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 27, p. 1033-1038, 2003.
- LEITE, L. F. C. et al. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 27, p. 821-832, 2003.
- LOPES, A. S; GUILHERME, L. R. G. Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas. Aspectos Agronômicos. São Paulo, ANDA Associação Nacional para Difusão de Adubos. 2000. 70 p.
- MA, B. L.; DWYER, M.L. Nitrogen uptake y use in two contrasting maize hybrids differing in leaf senescence. **Plant Soil**. Netherlands, v. 199, p. 283-291, 1998.
- MATUS, F. J.; MAIRE, C. R. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. **Agricultura Técnica**. Chillan, v. 60, n. 2, p. 112-126, 2000.
- MAYTA, E. **Evaluación de los recursos hídricos de la subcuenca del Río Grande de Lípez del Altiplano Sur con fines de aplicación de riego**. 2009, 112f. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz- Bolivia. 2009.
- MOLL R.H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy journal**, n. 74, p. 562-564, 1982.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2002. 625p.
- MÚJICA, A. et al. **Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Ancestral Cultivo Andino, Alimento del Presente y Futuro**. 2001. Disponível em: <<http://www.rlc.fao.org/es/agricultura/produ/cdrom/contenido/libro14>> Acesso em: 10 jan. 2010.
- MURILLO, R. **Comportamiento del nitrógeno proveniente de fertilizantes minerales en el cultivo de la quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo condiciones de riego y secano**. 2006. 132f. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andres. La Paz Bolivia. 2006.
- NAVARRO, S. **Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida**. Ed. Mundi – Prensa. Madrid, España. 2003. 457p.
- ORSAG, V.; CASTRO, E; LEON, M. L.; PACOSACA, O.; MAMANI, F.; **Evaluación de la fertilidad de los suelos en la zona intersalar**. Producción sostenible de quinoa. DANIDA, PIEB. La Paz Bolivia, 2011. 174p.

ORTUNO, N.; CLAROS, M.; ANGULO, V.; NAVIA, O.; MENESES, E. **Biofertilizantes artesanales con microorganismos rizosféricos nativos para una producción orgánica de quinua en Bolivia.** In: III CONGRESO MUNDIAL DEL A QUINUA. Oruro Bolivia. 2010, 42p.

OSCO, V. **Productividad de variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) con la aplicación de diferentes niveles de fertilización orgánica en la localidad de Tiahuanacu.** 2007. 111f. (Tesis de licenciatura). Universidad Mayor de San Andrés. La Paz Bolivia, 2007.

OWEIS, T.; HACHUM, A. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming system in West Asia and Nort Africa **Agricultural Water Management**, v. 80, p. 57-73, 2006.

PATTI, A. **Comportamiento agronómico y evaluación del periodo de maduración de granos de diez variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), en la estación experimental de Choquenaira.** 2009. 110f. Tesis de licenciatura - Universidad Mayor de San Andrés. La Paz Bolivia, 2009.

PEREIRA, L, S.; OWEIS, T,; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, v. 57, 165-206. 2002.

PETRY, M. T. **Interação solo - planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja.** 2000. 125f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

PRIMO, D. C. et al. Contribuição da adubação orgânica na absorção de nutrientes e na produtividade de milho no semiárido paraibano. **Agrária**. Pernambuco. v. 7, n. 1, p. 81-88. 2012.

PROGRAMA QUINUA. **Estudio de suelos del área Productora de quinua real. Planalto sur boliviano.** 2008. Disponível em: http://www.infoquinua.bo/filepublicacion/Estudio_Suelos_Planalto_Sur.pdf. Acesso em: 20 mar. 2010.

PROINPA. **Promoción e Investigación de productos Andinos Conservación de recursos Filogenéticos.** Revista Regional Planalto, 2002. 10p.

PROMUEVE. Perfil Producto Quinua. 2011. Disponível em: http://www.promueve.gob.bo/DocPDF/PerfilProducto/QUINUA_2011.pdf. Acesso em: 25 mar. de 2012.

RAES, D. **Water Balance of a Cropped Soil.** Department of Land Management, Faculty of Agricultural and Applied, Biological Sciences. 2002, 89p.

RAMOS, M. **Comportamiento de dos variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo riego diferenciado por fases fenológicas en el Planalto Central.** 2000. 112f. (Tesis de Licenciatura). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz Bolivia, 2000.

SAAVEDRA, C.D. **Modelación de los efectos del cambio climático en Tres zonas productoras de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) Del altiplano boliviano para identificar opciones de adaptación.** 2011, 124f. (Dissertação de Mestrado). Universidad Mayor de San Andres. La Paz Bolivia. 2011.

SAGE, R. F.; PEARCY, R. W. The nitrogen use efficiency of C3 and C4 plants. I Leaf nitrogen, growth y biomass partitioning in *Chenopodium album* (L.) y *Amaranthus retroflexus* (L.). **Plant Physiology**, v. 84, p. 954-958, 1987.

SALAZAR-SOSA, E. et al. Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de Avena forrajera con tres sistemas de labranza. **Revista Terra Latinoamericana**, Chapingo. v. 21, n. 4, p. 561-567, 2003.

SALAS, M. **Aplicación de tres niveles de fertilización nitrogenada en dos profundidades de aradura en el cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en el Centro Experimental Agropecuario Condoriri.** 2004. 106f. Tesis de licenciatura - Universidad Técnica de Oruro. Oruro Bolivia, 2004.

SALM, H. La mineralización de nitrógeno en suelo del Planalto Central de Bolivia. **Ecología en Bolivia**, La Paz. v. 4, p. 59-72, 1983.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina grande. v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SCHULTE auf'm EREY, G.; KAUL, H. P.; KRUSE, M.; AUFHAMMER, W. Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. **European Journal of Agronomy**. v. 22, p. 95-100, 2005.

SEDIYAMA, M. A. N. et al. Fermentação de esterco de suínos para uso como adubo orgânico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 638-644, 2008.

SENAMHI. **Datos meteorológicos. Estación Experimental de Belén- Municipio de Achacachi, provincia Omasuyos.** 2004. Disponível em: <http://www.senamhi.gob.bo/meteorologia/boletinoficial.php> Acesso em 25 jan. 2010.

SPEHAR, C. R.; SANTOS, R. L. B. Quinoa BRS Piabiru: alternativa para diversificar os sistemas de produção de grãos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília. v. 37, n. 6, p. 889-893, 2002.

SYLVIA, D. M. Mycorrhizal Symbiosis. In: SYLVIA, D. M. et al. **Principles and Applications of Soil Microbiology**. Prentice Hall, Upper Saddle River. 1998. 408-426 p.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy. United States Department of agriculture, Natural Resources Conservation Service.** Tenth edition. 2006, 341 p.

STEDUTO, P. et al. AquaCrop – The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 426-437, 2009.

TAPIA, M. **Quinoa y Kaniwa: Cultivos andinos**. CIID. Oficina Regional para America Latina. 1979. 228 p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995. 168p. (Boletim Técnico de Solos).

URIBELARREA, M.; BELOW, F. E.; MOOSE, S. P. Grain composition y productivity of maize hybrids derived from the Illinois Protein Strains in response to variable nitrogen supply. **Crop Science**, n. 44, p. 1593-1600, 2004.

YAGODIN, B. A. **Agroquímica**. Tomos I y II. Editorial Mir. Moscu, 1986. 335 p.

ZAGAL, E.; RODRIGUEZ, N.; VIDAL, I.; HOFMANN, G. Eficiencia de uso y dinámica del nitrógeno en una rotación con y sin uso de residuos. **Agricultura Técnica**, v. 63, n. 3, p. 298-310, 2010.