

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
POSTGRADO**



TESIS DE MAESTRÍA

EXPORTACIÓN DE NITRÓGENO Y RENDIMIENTO DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) CULTIVADO CON NIVELES DE NITRÓGENO Y ESTRATEGIAS DE REPOSICIÓN DE AGUA AL SUELO

ING. AGR. RAIMUNDO YLDON MONTAÑO GARCIA

La Paz – Bolivia

2015

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
POSTGRADO

EXPORTACION DE NITROGENO Y RENDIMIENTO DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) CULTIVADO CON NIVELES DE NITROGENO Y ESTRATEGIAS DE REPOSICION DE AGUA AL SUELO

Tesis de Maestría presentado como requisito parcial para optar el Título de Maestro en PRODUCCIÓN VEGETAL

RAIMUNDO YLDON MONTAÑO GARCIA

Asesor:

Ing. Ph.D. Aquiles Arce Laura

Tribunal Examinador:

Ing. Msc. Yuri Alex Zurita Valdivia

Ing. Msc. Orlando Achu Cocarico

Aprobado

Presidente Tribunal Examinador

La Paz – Bolivia

2015

DEDICATORIA

- A Dios por las bendiciones en mi vida.
- A mí apreciada mamá Cristina, por su cariño, motivación y apoyo continuo.
- A mi hijo Cristhian por ser la luz de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

- Al Posgrado de la Facultad de Agronomía dependiente de la Universidad Mayor San Andrés, donde tuve la oportunidad de seguir mejorando mis conocimientos en la producción de alimentos de origen vegetal, por cuanto, sin ello no existiría la vida humana.
- Al Ing. Ph. D. Aquiles Arce Laura por la orientación y asesoramiento durante la realización del trabajo de investigación y por su amistad incalculable.
- A los Docentes de la maestría quienes compartieron conocimientos y experiencias en producción vegetal con mi persona y mis compañeros.
- Al Ing. Msc. Yuri Zurita Valdivia por su valiosa contribución en el trabajo de investigación.
- Al Ing. Msc. Orlando Achu Cocarico por su valiosa contribución en el trabajo de investigación.
- Al Ing. Msc. Gustavo Escalier por su apoyo en algunos tramos de la investigación.
- A mis compañeros de la maestría por el intercambio de conocimientos y experiencias y por haber compartido momentos inolvidables.
- Al Laboratorio de Suelos y Agua de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias de la Universidad Mayor de San Simón por los análisis de suelo, agua y tejido vegetal.
- A SENAMHI por el apoyo y contribución con datos climáticos.

**EXPORTACIÓN DE NITRÓGENO Y RENDIMIENTO DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.)
CULTIVADO CON NIVELES DE NITRÓGENO Y ESTRATEGIAS DE REPOSICIÓN DE AGUA
AL SUELO**

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la cantidad de exportación de nitrógeno, rendimiento y materia seca en lechuga cultivado bajo dos niveles de nitrógeno y cuatro estrategias de reposición de agua al suelo; se realizó en condiciones de campo, en suelo de textura franca, ubicada en la localidad de Linde del municipio de Tiquipaya, durante el periodo 19 de septiembre a 11 de noviembre de 2014. Se utilizó el diseño experimental de parcelas sub-subdivididas. Los factores estudiados fueron: Estrategias de reposición de agua al suelo “(R1: Reposición de agua al 100% de Déficit Permitido de Manejo (DPM) desde los 36 días después de la siembra (DDS) hasta la cosecha, R2: Reposición de agua al 80% de DPM de los 36 hasta los 56 DDS, 100% de DPM de los 57 DDS hasta la cosecha, R3: Reposición de agua al 100% de DPM de 36 a 56 DDS, 80% de DPM de los 57 a 76 DDS y 100% de DPM de los 77 DDS hasta la cosecha y R4: Reposición de agua al 100% de DPM de 36 a 76 DDS y 80% de DPM de los 77 DDS hasta la cosecha)”, nitrógeno (0 y 100 kg ha⁻¹) y evaluaciones (36, 56, 76 y 90 DDS). Desde los 36 DDS hasta la cosecha, la evapotranspiración de cultivo fue 242,13 mm y la precipitación fue de 36,50 mm; en el mismo periodo, con la estrategia R1, R2, R3 y R4 se aplicaron 174,33; 163,27; 162,94 y 161,93 mm de agua. En promedio, el rendimiento/volumen de agua fue 8,36 g pl lt⁻¹, la materia seca/volumen de agua fue 0,70 g pl lt⁻¹ y exportación de nitrógeno/volumen de agua estuvo en 0,0141 g pl lt⁻¹. La aplicación de nitrógeno, evaluaciones y la interacción de los mismos presentó diferencias significativas (p≤0,05) en tenor de nitrógeno, exportación de nitrógeno, altura planta, cobertura foliar, materia seca y materia fresca. Las aplicaciones de 0 y 100 kg N ha⁻¹ de 36 DDS hasta la cosecha, mostraron tendencia cuadrática para tenor de nitrógeno; tendencia cubica para exportación de nitrógeno, altura planta, materia fresca y materia seca; y tendencia exponencial para cobertura foliar. Con aplicación de 100 kg N ha⁻¹, presentó mayor tenor de nitrógeno (hojas y tallo) a los 36 DDS (3,35%), exportación de nitrógeno, altura planta, cobertura foliar, materia fresca y materia seca a los 90 DDS (37,19 kg N ha⁻¹; 16,1 cm; 385,3 cm²; 19.157 kg ha⁻¹ y 1.600 kg ha⁻¹). La relación exportación de nitrógeno con cobertura

vegetal mostro tendencia lineal; que significa, que por cada incremento de 100 cm^{-2} de cobertura foliar de una planta de lechuga hubo una exportación de 0,093 g de Nitrógeno: Asimismo, la relación materia seca con cobertura foliar fue de tendencia lineal, lo que representa que por cada 100 cm^{-2} de cobertura foliar de una planta de lechuga se presentó un aumento de 4,4 g de materia seca. Con aplicación de 100 kg N ha^{-1} hubo mayor rendimiento total y comercial (18.966 y $16.166 \text{ kg ha}^{-1}$).

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the amount of export of nitrogen, yield and dry matter in lettuce grown under two levels of nitrogen and four soil water replenishment strategies; performed in field conditions in soil of loam texture, located in the locality of the municipality of Tiquipaya Linde, during the period September 19 to November 11, 2014. The experimental design split split plots was used. The factors studied were: soil water replenishment strategies "(**R1**: Replenishment of water to 100% of management (DPM) permitted Deficit from the 36 days after planting (DAP) until harvest, **R2**: Replenishment of water at 80% of DPM from 36 to 56 DAP, 100% of DPM of the 57 DAP until harvest, **R3**: Replenishment of water to 100% of DPM from 36 to 56 DAP, 80% of DPM 57 to 76 DAP and 100% of DPM of 77 DAP to harvest and **R4**: Replenishment of water to 100% of DPM 36 to 76 DAP and 80% of DPM of 77 DAP to harvest)", nitrogen (0 and 100 kg ha⁻¹) and evaluations (36, 56, 76 and 90 DAP). From 36 DAP until harvest, crop evapotranspiration was 242,13 mm and rainfall was 36.50 mm; in the same period, with the strategy of R1, R2, R3 and R4 were 174,33; 163,27; 162,94 and 161,93 mm of water. On average, the yield/volume of water was 8,36 g pl lt⁻¹, dry matter/ water volume was 0,70 g pl lt⁻¹ and export of nitrogen/water volume in 0,0141 g pl lt⁻¹. The application of nitrogen, evaluations and the interaction of the same showed significant differences ($p \leq 0.05$) in nitrogen content, export of nitrogen, height plant, leaf coverage, dry and fresh matter. The applications of 0 and 100 kg N kg ha⁻¹ has 36 DAP to harvest⁻¹, showed quadratic trend for tenor of nitrogen; trend cubes for export of nitrogen, plant height, fresh and dry matter; and exponential trend for leaf coverage. Application of 100 kg N ha⁻¹, presented greater content of nitrogen (leaf and stem) 36 DAP (3,35%), export of nitrogen, plant height, leaf coverage, fresh and dry matter to 90 DAP (37,19 kg N ha⁻¹; 16,1 cm; 385,3 cm²; 19.157 kg ha⁻¹ and 1.600 kg ha⁻¹). Nitrogen export relationship with vegetation cover showed linear trend; that means, that for each increase of 100 cm⁻² coverage of leaf lettuce plant there was an export of 0,093 g of nitrogen: also, the dry matter with leaf coverage ratio was linear trend, representing that per 100 cm⁻² of leaf lettuce plant coverage presented an increase of 4,4 g of dry matter. With application of 100 kg N ha⁻¹ was higher total and commercial yield (18.966 and 16.166 kg ha⁻¹).

INDICE

	Pag.
ÍNDICE GENERAL.....	ii – v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii - ix
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	ix
ANEXOS.....	x

INDICE GENERAL

	Pag.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Hipótesis.....	4
2. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFIA.....	5
2.1. Cultivo de lechuga.....	5
2.2. Exportación de nutrientes.....	6
2.3. Nutrición mineral y fertilización nitrogenada de lechuga.....	8
2.4. El agua y estrategias de reposición de agua al suelo	10
2.4.1. Determinación de necesidades de agua de los cultivos.....	11
2.4.1.1. Balance hídrico en el suelo.....	11
a) Trabajos de investigación considerando la ETc.....	13
2.4.1.2. Contenido de agua en el suelo.....	14
a) Determinación de contenido de agua en el suelo.....	14

b) Trabajos de investigación considerando contenido de humedad de suelo..	15
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1. Características de la investigación.....	17
3.2. Localización.....	17
3.3. Condiciones climáticas.....	17
3.4. Características de suelo y agua.....	19
3.5. Material vegetal.....	21
3.6. Equipos.....	23
3.7. Método: Implementación y conducción de la parcela experimental.....	24
3.7.1. Producción de plántulas.....	25
3.7.2. Preparación de suelo y colocación de plástico.....	26
3.7.3. Trasplante.....	26
3.7.4. Riego.....	27
3.7.5. Fertilización.....	27
3.7.6. Control de malezas.....	27
3.7.7. Control de insectos plaga.....	27
3.7.8. Cosecha.....	27
3.8. Diseño experimental.....	27
3.8.1. Factores estudiados.....	28
a) Factor estrategia de reposición de agua al suelo.....	28

b) Factor Nitrógeno.....	30
c) Factor Evaluación en el tiempo.....	31
3.8.2. Modelo estadístico.....	31
3.8.3. Monitoreo de humedad del suelo.....	33
3.8.4. Variables de respuesta.....	35
1) Materia seca.....	35
2) Exportación de nitrógeno.....	35
3) Rendimiento total.....	36
4) Rendimiento comercial.....	36
5) Altura de planta.....	36
6) Número de hojas por planta.....	37
7) Cobertura foliar.....	37
3.9. Evapotranspiración de cultivo.....	37
3.10. Balance hídrico.....	38
3.11. Análisis Estadístico.....	38
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
4.1. Balance entre evapotranspiración de cultivo y precipitación.....	39
4.2. Balance entre evapotranspiración real y precipitación.....	40
4.3. Cantidad de agua aplicada al cultivo de lechuga por estrategia de reposición de agua.....	41

4.4. Monitoreo de humedad del suelo.....	45
4.5. Influencia de estrategias de reposición de agua al suelo en rendimiento/volumen de agua, materia seca/volumen y exportación de nitrógeno/volumen de agua.....	47
4.6. Efecto de estrategia de reposición de agua y niveles de nitrógeno en variables de suelo y otras.....	49
4.6.1. Tenor de nitrógeno en la parte aérea de lechuga.....	51
4.6.2. Exportación de nitrógeno.....	52
4.6.3. Relación de exportación de nitrógeno y cobertura foliar.....	54
4.7. Efecto de estrategias de reposición de agua y niveles de nitrógeno en variables agronómicas.....	55
4.7.1. Altura planta.....	57
4.7.2. Cobertura foliar.....	59
4.7.3. Materia Fresca.....	60
4.7.4. Materia Seca.....	61
4.7.5. Relación materia seca y cobertura foliar.....	63
4.7.6. Rendimiento total y comercial.....	64
4.7.7. Número de hojas.....	65
5. CONCLUSIONES.....	67
6. RECOMENDACIONES.....	69
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	70

INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Características físicas del suelo del área experimental a una profundidad de 20 cm.....	19
Tabla 2. Características químicas del suelo del área experimental a una profundidad de 20 cm.....	20
Tabla 3. Características químicas de agua utilizada en la investigación.....	21
Tabla 4. Características de semilla, plántula y de planta adulta de lechuga Variedad Crespa.....	22
Tabla 5. Número de muestreos de suelo en función a profundidad de suelo y tiempo.....	34
Tabla 6. Cantidad de plantas de lechuga muestreadas en distintos momentos de la ejecución de la investigación.....	35
Tabla 7. Resumen de análisis de varianza para exportación de nitrógenos y materia seca en función de estrategias de reposición de agua y aplicación de nitrógeno.....	50
Tabla 8. Resumen de análisis de varianza para altura planta, cobertura vegetal, materia seca y peso fresco en función de estrategias de reposición de agua y aplicación de nitrógeno.....	56
Tabla 9. Resumen de análisis de varianza para rendimiento total, rendimiento comercial, número de hojas, cobertura vegetal y altura planta en función de estrategias de reposición de agua y aplicación de nitrógeno.....	57

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Fluctuación de la precipitación, temperatura máxima y mínima desde el trasplante hasta la cosecha de lechuga – Estación Meteorológica Sarco.....	18
Figura 2. Fluctuación de humedad relativa máxima y mínima desde el trasplante hasta la cosecha-Estación Meteorológica Sarco.....	18
Figura 3. Flujograma de producción de lechuga.....	24
Figura 4. Comparación de evapotranspiración de cultivo con precipitación desde el trasplante hasta la cosecha del cultivo de lechuga.....	40
Figura 5. Fluctuación de la evapotranspiración de cultivo (ETc) y precipitación desde el trasplante hasta la cosecha de lechuga.....	40
Figura 6. Balance entre evapotranspiración real y precipitación a la cosecha del cultivo de lechuga.....	41
Figura 7. Cantidad de agua aplicada por cuatro estrategias por cuatro estrategias de reposición de agua al suelo y precipitación para el periodo de trasplante a cosecha.....	42
Figura 8. Cantidad de agua aplicada por cuatro estrategias de reposición de agua al suelo y precipitación para tres periodos desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha de lechuga.....	43
Figura 9. Variabilidad de evapotranspiración real, estrategia de reposición de agua al suelo y precipitación durante la realización de la investigación.....	44
Figura 10. Suelo: Cantidad de días con humedad normal y días con estrés para estrategias de reposición de agua al suelo.....	45

Figura 11. Variabilidad de humedad gravimetrica de suelo inicial y humedad gravimetrica de suelo critico para las estrategias de reposición de agua al suelo: A) R1, B) R2, C) R3 y D) R4.....	46
Figura 12. Aplicación de estrategias de reposición de agua en la relación rendimiento de lechuga por volumen de agua aplicada más precipitación.....	48
Figura 13. Efecto de la aplicación de estrategias de reposición de agua en la relación materia seca por volumen de agua aplicada más precipitacion	48
Figura 14. Efecto de la aplicación de estrategias de reposición de agua en la relación exportación de nitrógeno por volumen de agua aplicada más precipitación.....	49
Figura 15. Tenor de nitrógeno desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha con aplicación de dos niveles de nitrógeno (N0 = 0 kg N HA ⁻¹ y N100 = 100 kg N ha ⁻¹).....	51
Figura 16. Efecto de estrategias de reposición de agua al suelo en exportación de nitrógeno en lechuga.....	52
Figura 17. Efecto de niveles de nitrógeno en la exportación de nitrógeno en el cultivo de lechuga a partir de los 36 días después de la siembra hasta la cosecha.....	54
Figura 18. Relación entre la cobertura foliar y la exportación de nitrógeno en el cultivo de lechuga Variedad Crespa.....	55
Figura 19. Efecto de la aplicación de nitrógeno en altura de la planta de lechuga desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha.....	59
Figura 20. Influencia de la aplicación de nitrógeno en cobertura vegetal de lechuga desde los 36 días después de la siembra a cosecha.....	60

Figura 21. Efecto de nitrógeno en materia fresca de lechuga desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha.....	61
Figura 22. Efecto de nitrógeno en materia seca de lechuga desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha.....	62
Figura 23. Relación de materia seca y cobertura foliar en lechuga.....	63
Figura 2 4. Efecto de niveles de nitrógeno en rendimiento total (A) y comercial (B) de lechuga. Las letras (a) y (b) sobre las barras indican diferencias estadísticas entre sí ($p \leq 0.05$) según la prueba de Tukey.....	65

INDICE DE FOTOGRAFIAS

	Pag.
Fotografía 1. Planta de lechuga variedad Crespa.....	23
Fotografía 2. Plántula de lechuga después del raleo (a) y plántulas con tres hojas verdaderas (b).....	25
Fotografía 3. Revestimiento con plástico del perímetro de la parcela experimental.....	26
Fotografía 4. Vista panorámica de parcela experimental posterior al trasplante...	26

INDICE DE ANEXOS

	Pag.
Anexo 1. Ecuación de FAO Penman Monteith para estimar Evapotranspiración de referencia (ET _o).....	82
Anexo 2. Evapotranspiración de referencia obtenida mediante el método FAO Penman Monteith.....	83
Anexo 3. Resultados de análisis químico de agua utilizada en la investigación	85
Anexo 4. Resultados de análisis químico y físico de suelo del sitio de la investigación.....	86
Anexo 5. Resumen de análisis de varianza para la relación rendimiento total/volumen de agua, materia seca/volumen de agua y exportación de nitrógeno/volumen de agua.....	87

1. INTRODUCCIÓN

La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró al año 2014 como año internacional de la agricultura familiar, de la cual forma parte la producción de hortalizas entre ellos la lechuga. En Bolivia, durante el año agrícola 2007/2008, la lechuga fue la hortaliza de hoja más cultivada, alcanzando una producción de 10.799 t; de la misma participaron los departamentos de Chuquisaca, La Paz, Cochabamba, Oruro, Potosí, Tarija y Santa Cruz (INE y MDRyT, 2009). Es una actividad realizada por pequeños productores en condiciones de campo abierto, ambiente protegido y en pequeña escala en hidroponía; lo cual muestra su importancia de carácter económica y social.

La lechuga es un alimento fresco e importante en la dieta de las personas. La variedad Crespa en 100 g de porción comestible, presenta: 1,38 g de proteína; 81,1 µg de vitamina A; 11 mg de vitamina C; 42,6 mg de calcio; 34,0 mg de fósforo y 1,51 mg de hierro (INLASA, 2005).

En las distintas condiciones de clima y suelo del país se han realizado diferentes trabajos de investigación en el cultivo de lechuga; entre ellos se menciona: i) Evaluación de variedades (Andrade, 2001; Intipampa, 2014), ii) Hidroponía (Urey, 2007; Velasco, 2007), iii) Control de insectos plaga (Jardín, 2002; Flores, 2008), iv) Riego (Chipana y Serrano, s.f.), v) Fertilización (Gutiérrez, 1990; Córdova, 2001; Rojas, 2007), vi) Caldos microbiológicos en la producción (García, 2003), vii) Métodos de cultivo (Rodríguez, 2001) y viii) Humus de lombriz en cultivo organopónico (Mamani, 2010) y xi) Fertirrigación (Valdez, 2008). De los trabajos señalados, el único que consideró absorción de nitrógeno, fósforo y potasio, en condiciones de cultivo hidropónico fue Urey (2007).

A pesar de los trabajos mencionados, en lechuga no se han realizado investigaciones en el ámbito de exportación de nitrógeno bajo las condiciones de estrategias de reposición de agua y fertilización nitrogenada; lo cual muestra la necesidad de ampliar conocimientos en este ámbito a través del presente trabajo de investigación.

1.1. Planteamiento del problema

Bertsch (1995) indica que la producción de un sistema agrícola es la salida que se obtiene como resultado de la interacción del suelo, planta y clima, con la acción que el ser humano pueda introducir sobre ellos.

Faquin y Andrade (2004), señalan que la lechuga entre los macronutrientes que más extrae y exporta del área de cultivo es el nitrógeno. Plantas de lechuga con deficiencia del nutriente mencionado, muestran disminución en altura de planta, área foliar, número de hojas, clorofila y materia seca (De Almeida *et al.*, 2011) y con exceso de aplicación de nitrógeno presentan incrementos en la acumulación de nitratos en el tallo y hojas y según Reglamento de la Unión Europea No 1258/2011 para lechugas frescas cultivadas al aire libre el contenido máximo es de $3.000 \text{ mg NO}_3 \text{ kg}^{-1}$.

MMAyA (2012), menciona que en Bolivia existe en una superficie aproximadamente del 40% del territorio nacional un alto déficit de agua (más de 7 meses secos); con precipitaciones que varían entre 300 a 750 mm en 4 meses, en tanto que la evapotranspiración fluctúa entre 650 a 1.650 mm; lo cual muestra que gran parte del año en regiones como los Valles de Cochabamba se tiene que regar los cultivos.

Entonces en el ámbito del cultivo de lechuga en su producción es de suma importancia la interacción de nutrientes y agua; al respecto en el país si bien se han realizado trabajos de investigación en fertilización y riego los mismos no han abordado temas importantes como la exportación de nitrógeno por el cultivo, por lo que en el presente trabajo de investigación se planteó el siguiente problema de investigación: “Inexistencia de estudios en el país de exportación de nitrógeno por la lechuga cultivado con niveles de nitrógeno y estrategias de reposición de agua al suelo”.

1.2. Justificación

En Bolivia, en condiciones de Valle, la lechuga se cultiva todo el año (INIAF, s.f.), en la misma región la precipitación varía de 378 a 664 mm y la evapotranspiración total de 977,6 a 1.654,2 mm (Campero, 2014); lo cual significa que en gran parte del año existe requerimiento de riego para los cultivos.

El cambio climático viene provocando alteraciones en los rendimientos de la producción agrícola por la presencia de eventos acentuados (sequias y otros), por lo que, para seguir manteniendo niveles de productividad es apremiante la búsqueda de alternativas de manejo más eficiente y ahorrador de agua; asimismo para conocer su influencia en la exportación de nutrientes tales como el nitrógeno, considerando que es uno de los nutrientes requerido en mayor cantidad por la lechuga.

En el manejo de la nutrición de la lechuga es importante conocer cuánto aplicar de cada uno de los nutrientes esenciales y para responder a ello es necesario con un soporte sobre la disponibilidad de los mismos en el suelo y cuanto extrae y exporta el cultivo del suelo; lo cual permite preparar balances nutricionales y recomendaciones para la fertilización. Entonces con la presente investigación se pretendió obtener información de exportación de nitrógeno por la lechuga para que la misma pueda servir de insumo para elaboración de recomendaciones de fertilización nitrogenada para condiciones de campo.

Asimismo, es importante conocer la expresión en el rendimiento y en la exportación de nitrógeno de lechuga como efecto de la aplicación de nitrógeno y estrategias de reposición de agua al suelo, considerando que el nitrógeno es un elemento móvil en el suelo particularmente cuando se encuentra en forma de nitratos.

De acuerdo a lo mencionado fue necesaria la realización de la presente investigación de exportación de nitrógeno con aplicación de niveles de nitrógeno bajo estrategias de reposición de agua al suelo en el cultivo de lechuga.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Determinar la cantidad de exportación de nitrógeno y rendimiento en lechuga cultivado bajo dos niveles de nitrógeno y cuatro estrategias de reposición de agua al suelo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la cantidad exportada de nitrógeno y rendimiento con aplicación de dos niveles de nitrógeno y cuatro estrategias de reposición de agua durante el crecimiento de la lechuga.
- Comparar las principales características agronómicas de la lechuga como efecto de la aplicación de niveles de nitrógeno y cuatro estrategias de reposición de agua.
- Determinar la mejor combinación de nivel de nitrógeno y estrategias de reposición de agua al suelo en el rendimiento de lechuga.

1.4. Hipótesis

La presente investigación se fundamenta en la siguiente hipótesis:

El cultivo de lechuga bajo dos niveles de nitrógeno y cuatro estrategias de reposición de agua al suelo presenta diferentes niveles de exportación de nitrógeno y rendimiento.

2. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFIA

2.1. Cultivo de lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa* L.), probablemente se derivó de la especie silvestre *Lactuca scariola* L. (Adaptado de Valadez, 1998) y su centro de dispersión es el mediterráneo (Vavilov, 1951). Es una planta herbácea, anual, con tallo pequeño, las hojas crecen en roseta envolviendo el tallo y el color varía de verde a morado y la raíz es muy ramificada, cuando la planta es trasplantada explora apenas los 25 cm de suelo y si es siembra directa puede alcanzar 60 cm de profundidad (Cavalcante, 2008). La semilla tiene un largo de 2 a 3 mm y pueden ser de color blanco o negro (Casaca, 2005); un gramo de semilla contiene 800 unidades (Grasso *et al.*, 2006) y germina a los 4 días después de la siembra cuando la temperatura presenta 15 °C (Galvan *et al.*, 2008). El tiempo desde el trasplante hasta la cosecha varía de 60 a 90 días dependiendo de la variedad y la época en la que se cultiva (INIAF, s.f.). Consta de cuatro fases de desarrollo: Etapa de plántula, de roseta, formación de la cabeza y floración (Galvan *et al.*, 2008).

La lechuga taxonómicamente corresponde a la familia Asteraceae (Compositae), género *Lactuca* y especie *sativa* (Lousa *et al.*, s.f.). Usualmente, las variedades botánicas de lechuga, según Luna (2012) se pueden clasificar en función como se organizan las hojas en estado maduro. Una clasificación de acuerdo a Grasso *et al.* (2006) y Marm citado por Luna (2012) es el siguiente:

- *Lactuca sativa* v. *capitata*, llamada lechuga arrepollada, forma cogollo apretado y hojas redondeadas.
- *Lactuca sativa* v. *crispa* o *intybacea*; también llamada lechuga crespa, no forman cabeza, tienen forma roseta y poseen hojas anchas con margen muy recortado sueltas y dispersas.
- *actuca sativa* v. *longifolia*; también llamada lechuga cos, romana, porteña o latina; no forman un verdadero cogollo y son lechugas alargadas. Siendo de forma cónico o cilíndrica y semi compacto.

- *Lactuca sativa* v. *augustana*; poseen hojas y tallos largos y no forman cogollos. Su sabor es amargo y se cultiva por sus hojas y su tallo sirve como alimento para el ganado.

En Bolivia, la lechuga se cultiva a campo abierto, ambiente protegido y en hidroponía. El cultivo a campo abierto consiste en realizar todas las actividades desde la preparación del suelo, trasplante, labores culturales y cosecha en condiciones de clima imperantes en el sitio de producción; esta forma de cultivo es la que predomina en términos de superficie y producción en comparación a los otros sistemas de producción. La producción en ambiente protegido es la que se efectúa principalmente en zonas frías como el altiplano, consiste en la construcción de infraestructura generalmente con muros de adobe y la cubierta con fuste de árboles y plástico que tiene protección contra los rayos del sol; en algunos casos cuentan con riego presurizado. En pequeña cantidad la lechuga se cultiva en hidroponía y entre las técnicas que se utiliza en algunos casos es el NFT (Nutrient Film Technique). Dicha técnica consiste en la circulación constante de una lamina de solución nutritiva que pasa a través de las raíces de las plantas, no se aprecia la pérdida o salida de la solución nutritiva; consta de cinco elementos esenciales: i) Estanque colector, ii) Canales de cultivo, iii) Bomba, iv) Red de distribución y v) Tubería colector (Carrasco e Izquierdo, 1996); últimamente también parte de los elementos son los soportes.

2.2. Exportación de nutrientes

Para una comprensión cabal de exportación de nutrientes en el área de producción agrícola, Faquin y Andrade (2004) definen la exportación de nutrientes, como las cantidades de nutrientes presentes en el producto cosechado, que son retiradas del área del cultivo. En el caso de la lechuga son el tallo y las hojas y una porción de la raíz cercana al tallo son las que exportan los macro y micronutrientes del suelo.

La lechuga con rendimiento de 25 t/ha en promedio exporta las siguientes cantidades de nutrientes: N = 41,4 kg ha⁻¹; P= 5,6 kg ha⁻¹; K = 54,3 kg ha⁻¹; Ca = 12,3 kg ha⁻¹; Mg = 3 kg ha⁻¹ y S = 3 kg ha⁻¹; B = 25 g ha⁻¹; Cu = 9 g ha⁻¹; Fe = 657 g ha⁻¹; Mn = 129 g ha⁻¹; Mo = 0.06 g ha⁻¹ y Zn = 103 g ha⁻¹ (Faquin y Andrade, 2004). Los datos señalados

muestran que la lechuga exporta en mayor cantidad los macro nutrientes nitrógeno y potasio y los micronutrientes hierro y manganeso, respectivamente.

Los trabajos de investigación en el ámbito de exportación de nitrógeno en el cultivo de lechuga muestran que dicha variable principalmente está influenciada por la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, nivel de aplicación del fertilizante, nivel de sombreado y la duración del cultivo desde la siembra o trasplante hasta la cosecha. Al respecto, algunos trabajos que soportan lo indicado se presentan a continuación:

Aquino *et al.* (2007) en un experimento de producción de biomasa, acumulación de nitrato, tenores y exportación de macronutrientes bajo sombreado a los 68 días después de la siembra evidenció mayor cantidad de nitrógeno exportado ($68,86 \text{ kg ha}^{-1}$) y producción de materia seca ($1.870,20 \text{ kg ha}^{-1}$) en condiciones de cielo abierto con respecto a las mallas termoreflectoras aluminet 30, aluminet 40 y cromatinet 30, mientras que no encontró diferencias estadísticas en la exportación de nitrógeno entre las variedades Regina y Verónica pero el nitrógeno exportado fluctuó entre $59,15$ y $57,91 \text{ kg ha}^{-1}$.

Doerge *et al.* (s.f.) con aplicación de 120 y $205 \text{ kg de N ha}^{-1}$ obtuvo mayores cantidades de exportación de nitrógeno (82 kg ha^{-1}) en comparación a la aplicación de 35 kg N ha^{-1} (43 kg ha^{-1}), el tiempo desde la siembra hasta la cosecha fue de 125 días y con riego por aspersión hasta los 8 días después de la siembra y luego se utilizó riego por goteo subterráneo.

Rincón *et al.* (2002) en un estudio de influencia de la fertilización nitrogenada en la absorción de nitrógeno y acumulación de nitratos en la lechuga iceberg, encontró elevada absorción de nitrógeno por la parte aérea ($129,9 \text{ kg N ha}^{-1}$) con aplicación de $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$ en comparación a 150 , 100 , 50 y $25 \text{ kg de N ha}^{-1}$; pero la mayor producción comercial ($33,1 \text{ t ha}^{-1}$) obtuvo con aplicación de $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$ y una absorción de $116,5 \text{ kg ha}^{-1}$. En dicho estudio los fertilizantes se aplicaron en fertirriego por goteo y el tiempo desde el trasplante hasta la cosecha fue de 80 días.

2.3. Nutrición mineral y fertilización nitrogenada de lechuga

Faquín y Andrade (2004), mencionan que la lechuga cultivar White Boston extrae por tonelada de producto fresco las siguientes cantidades: N = 1.865 g t⁻¹, P=196 g t⁻¹, K = 2.491 g t⁻¹, Ca = 538 g t⁻¹, Mg = 88 g t⁻¹, S = 140 g t⁻¹, B =1.134 mg t⁻¹, Cu = 248 mg t⁻¹, Fe = 34.482 mg t⁻¹, Mn = 5.502 mg t⁻¹, Mo = 3 mg t⁻¹, Zn = 4.578 mg t⁻¹. Entonces, la planta de lechuga para completar su ciclo de vida necesita de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn); los cuales son considerados esenciales por cuanto no pueden ser sustituidos por otros elementos; por lo que el nitrógeno es un elemento esencial para el cultivo indicado. En el caso de ausencia de nitrógeno las plantas de lechuga decrecen en altura, área foliar, número de hojas, en la medida indirecta de clorofila y cantidad de materia seca (De Almeida, 2011).

El nitrógeno es absorbido por la planta en su forma inorgánica: NO₃⁻ y NH₄⁺ (Aguilera, 2012). Dicho elemento es el componente fundamental de todas las moléculas orgánicas involucradas en los procesos de crecimiento y desarrollo vegetal (Aminoácidos, proteínas estructurales y enzimas, ácidos nucleicos, clorofila, citocromos, coenzimas, hormonas y otros compuestos nitrogenados con funciones variadas (ureidos, amidas, alcaloides, etc.,) (Bertsch, 1995).

El estado nutricional de las plantas es importante conocer por cuanto influye en la producción; para su evaluación existen distintos métodos tales como el diagnostico visual, diagnostico foliar, prueba de tejidos, pruebas bioquímicas, aplicaciones foliares y tenor de clorofila, siendo los más importantes los dos primeros (Faquin, 2002). El autor mencionado indica que el diagnostico visual consiste en comparar visualmente el aspecto (coloración, tamaño y forma) de la muestra (planta, ramas y hojas) con un patrón; pero, este método, presenta limitaciones por cuanto es cualitativo, requiere mucha experiencia, se puede confundir los síntomas y solo es posible utilizar cuando se presentan los síntomas de deficiencia. El diagnostico foliar analiza los tenores de nutrientes en determinadas hojas en periodos definidos de vida de la planta y los compara con patrones nutricionales de literatura (Bertsch, 1995; Faquin, 2002). La literatura muestra distintos valores de niveles cítricos foliares: i) 4,7 a 5,5 % de N en

lechuga variedad Boston (Wolf *et al.* 1990 citado por Bertsch (1995) y ii) 3 % de nitrógeno en lechuga (Adaptado de Faquin, 2002).

El análisis químico de suelo es la principal herramienta para el diagnóstico de fertilidad de suelo y consiste en la estimación de la disponibilidad de nutrientes para la planta durante su ciclo de desarrollo por medio de métodos químicos (Bertsch, 1995; Faquin, 2002). Basándose en el análisis químico y físico de suelos y la extracción y exportación de nutrientes por el cultivo para reponer un determinado nutriente como el caso de nitrógeno se puede recurrir a fuentes de fertilizantes químicos y abonos orgánicos. Entre los fertilizantes químicos se puede mencionar a urea (46 % N), sulfato de amonio (21 % N), nitrato de amonio (33 % N), fosfato diamónico (18 % N), Triple 17 (17 % N), nitrato de potasio (13 % N), nitrato de calcio (15 % N) etc.; en tanto que entre los abonos orgánicos se puede recurrir a guano de vaca (1,3-1,8 % N), guano de oveja (3,5-4,5 % N), gallinaza (4,0-6,0% N), compost (0,5-1,5 % N), humus de lombriz y bioinsumos (2,0-10,0 % N) (Aguilera, 2012).

Los trabajos de investigación en fertilización nitrogenada de lechuga muestran diferentes resultados, respuesta cuadrática y respuesta lineal decreciente o creciente a incrementos de niveles de dosis de nitrógeno, como se puede apreciar a continuación:

Gutiérrez (1990) en un estudio de aplicación fraccionada de gallinaza y nitrógeno mineral, determinó que la aplicación de 10 t de gallinaza ha^{-1} fraccionado en dos oportunidades y la aplicación de 200 kg N ha^{-1} fraccionado en dos y tres oportunidades mostraron los rendimientos más altos (11,67; 15,00 y 15,00 t ha^{-1}) con respecto al testigo sin fertilización mineral ni gallinaza.

Rincón *et al.* (2002), en un suelo franco arcillosa, con 1,26 % de materia orgánica y 19,75 meq /100 g de suelo de capacidad de intercambio catiónico; estudió el efecto de 25, 50, 100, 150 y 200 kg N ha^{-1} , con riego por goteo; también realizó la fertilización en todos los tratamientos con 100 kg P_2O_5 ha^{-1} , 250 kg K_2O ha^{-1} , 45 kg Ca ha^{-1} y 15 kg Mg ha^{-1} ; los fertilizantes utilizados fueron nitrato amónico, nitrato cálcico, fosfato monoamónico, sulfato de potasio y sulfato de magnesio. Los resultados mostraron una tendencia cuadrática para producción total y producción comercial; donde, presentó la

mayor producción total (56,90 t ha⁻¹) con 150 kg N ha⁻¹, en tanto, que la mayor producción comercial (33,36 t ha⁻¹) se obtuvo con 125 kg N ha⁻¹; luego, para mayores dosis de nitrógeno se apreció decrementos en la producción.

Araujo *et al.* (2011), en un suelo de textura franco arcillo arenosa, con pH 5,3 y materia orgánica 22 g dm⁻³; realizó un estudio con aplicación de 0; 60; 120; 180 y 240 kg N ha⁻¹; la fuente de nitrógeno fue urea y la misma se aplicó vía fertirriego; también se efectuó la fertilización de fondo por m² con 100 g de cal dolomítica, 150 g de P₂O₅ en forma de superfosfato simple, 50 g de K₂O en forma de cloruro de potasio, 1 g de bórax y 7 kg de estiércol bobino descompuesto. Los resultados de esta investigación mostraron una tendencia lineal negativa para materia fresca de la parte aérea, materia seca de la parte aérea, número de hojas y productividad; siendo el tratamiento sin aplicación de nitrógeno la que tuvo mayor materia fresca de la parte aérea (187,67 g planta⁻¹), materia seca de la parte aérea 6,96 g planta⁻¹, número de hojas (14,9 hojas planta⁻¹) y productividad (30,027 kg ha⁻¹).

En otro trabajo de investigación realizado por Resende (2010) en un suelo con las siguientes características químicas: K= 70,0 mg dm⁻³; P (Mehlich)= 78,0 mg dm⁻³; Ca= 4,1 cmol dm⁻³; Mg= 0,8 cmol dm⁻³; Al= 0,0 cmol dm⁻³; H + Al= 2,3 cmol dm⁻³; Zn= 0,8 mg dm⁻³; Fe= 25,0 mg dm⁻³; Mn= 14,2 mg dm⁻³; Cu= 1,0 mg dm⁻³; B= 0,3 mg dm⁻³; pH en H₂O= 6,0 y MO= 24 g kg⁻¹; con aplicación de cuatro dosis de nitrógeno obtuvo una respuesta cuadrática y con la mayor producción a la dosis 89,6 kg de N ha⁻¹.

2.4. El agua y estrategias de reposición de agua al suelo

De acuerdo a Nebel y Wright (1999), el 97% de agua es salada y se encuentra en mares y océanos; el 2,6% esta concentrada en los casquetes polares y los glaciales; solo es accesible el 0,4%.

El agua dulce, independientemente de su procedencia (lluvia, río, pozo, represa, atajado y otros) es vida para las plantas por ser parte en niveles elevados de su composición. En el caso de lechuga constituye el 92,12% de humedad con respecto a su composición (Montesdeoca, 2009).

El suelo puede ser considerado como un sistema disperso constituido por la fase sólida, líquida y gaseosa; en términos de volumen las fases gaseosa y líquida ocupan aproximadamente el 50% (Jordán, 2006).

El agua del suelo transporta en soluciones nutrientes, sales solubles, compuestos orgánicos solubles y contaminantes, así como materia en suspensión, y permite su absorción por las raíces de las plantas (Jordán, 2006; Fernández *et al.*, 2010).

Las plantas se suministran el agua del suelo, el mismo utilizan para transpirar como mecanismo para equilibrar su balance energético y para proveerse de hidrógeno que es necesario para la materia vegetal (Briceño *et al.*, 2012; Villafafila y Wyss, 2009). Es uno de los principales recursos que limita más frecuentemente el rendimiento del cultivo de lechuga, consecuentemente en la disminución de la eficiencia del sistema de producción agrícola (Dos Santos, 2011).

2.4.1. Determinación de necesidades de agua de los cultivos

La determinación de las necesidades de agua de los cultivos es muy importante para la aplicación de riego (Serrano, s.f.); la misma se puede obtener mediante: a) Un balance hídrico en el suelo y b) Contenido de agua en el suelo.

2.4.1.3. Balance hídrico en el suelo

Arce (2013), menciona que el balance hídrico en el suelo (área de riego) es el siguiente:

$$S_{(i+1)} - S_{(i)} = I_{(i)} - O_{(i)}$$

Donde:

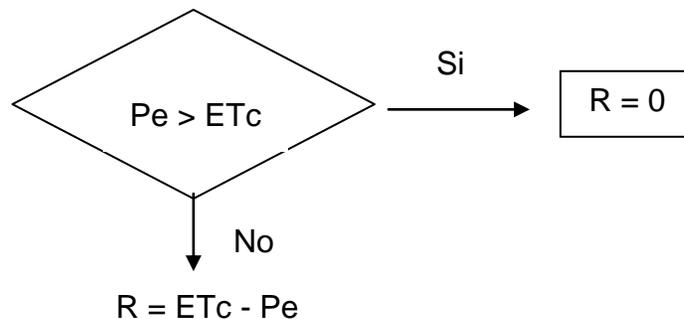
$S_{(i+1)} - S_{(i)}$ = Es el cambio del contenido de humedad del suelo de un estado inicial $S_{(i)}$ a un estado final $S_{(i+1)}$.

$$I_{(i)} = P + R$$

$$O_{(i)} = ET_c + Q_s + P_{er}$$

El mismo autor señala considerar los criterios que a continuación se muestra y posteriormente resume a partir de un flujograma que considera precipitación efectiva y evapotranspiración de cultivo para la formulación de riego:

- La escorrentía superficial puede ser mínima o nula de acuerdo a la topografía, cobertura vegetal y tipo de suelo.
- La percolación profunda puede ser mínima o nula de acuerdo a la profundidad de la zona radicular, tipo de suelo y potencial hídrico del suelo.
- Una parte de la precipitación se infiltra y otra parte se escurre, se intercepta o se evapora, de acuerdo a la topografía, cobertura vegetal, tipo de suelo y clima.



Allen *et al.* (2006) indica que la ecuación de evapotranspiración de cultivo es el siguiente:

$$ET_c = ET_o * K_c$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia.

K_c = Coeficiente del cultivo.

La ETo se puede determinar mediante métodos directos (muestreo de la humedad del suelo y lisímetro) e indirectos (Ecuación de Penman-Monteith, Ecuación de Hargreaves y Tanque evaporímetro) (Arce, 2013). Por su parte, Allen *et al.*, (2006) señalan que después de consultar a expertos en el año 1990 se recomienda como el único método estándar FAO Penman-Monteith para determinar ETo, aunque también se puede estimar a través del tanque evaporímetro aplicando coeficientes empíricos.

La Kc representa un criterio de uso de agua por el cultivo desarrollado en condiciones óptimas (Serrano, s.f.); incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación del suelo (Allen *et al.*, 2006). La Kc va cambiando a lo largo del ciclo del cultivo, el mismo, en cultivos hortícolas cosechados en verde es dividido en tres etapas distintas: i) Inicial, ii) Desarrollo del cultivo y ii) Mediados (Alcobendas y Moreno, s.f.; Escarabajal *et al.*, 2013).

b) Trabajos de investigación considerando la ETc

En el balance hídrico uno de sus componentes importantes es la ETc (evapotranspiración del cultivo) que según Allen *et al.* (2006) se refiere a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

En el tema de ETc se han realizado distintos trabajos de investigación para conocer su influencia sobre variables agronómicas en el cultivo de lechuga, algunas de ellas se señalan a continuación:

De Lima (2007), estudio la influencia de laminas de agua correspondientes a 25, 50, 80, 100 y 115 % de ETc del cultivo y que fueron estimados de acuerdo a la evaporación del tanque Clase A en condiciones de campo abierto y riego por aspersión. Los resultados mostraron a los 32 días después del trasplante (cosecha) mayor masa fresca ($189,54 \text{ g p l}^{-1}$) con la lamina de agua $104,1 \text{ mm}$ correspondiente a 80 % de la ETc; también es necesario mencionar que durante la ejecución del estudio hubo adición de agua a través de la precipitación de aproximadamente 49,5 mm.

Ferreira et al, (2010), con niveles de reposición de agua al suelo (70, 100, 130 y 160 de evapotranspiración del cultivo (ETc)) y frecuencia de riego (1,2,3 y 4 días) en ambiente protegido encontró respuestas cuadráticas para reposición de agua a 1 y 2 días con los rendimientos más altos (445,36 y 269,04 g pl⁻¹) para 110 y 112 de ETc, mientras que la respuesta fue lineal para reposición de agua a los 3 y 4 días con los rendimientos más altos (220 y 57,98 g pl⁻¹) para 160 ETc.

Nagaz et al. (2013), con aplicación de riego de 100, 60 y 30 % de ETc en condiciones áridas, suelo salino y riego con agua salada; obtuvo mayor rendimiento (45,78 y 42,60 t ha⁻¹), para 100 % de ETc en dos épocas de siembra con respecto a los otros tratamientos, aunque durante el periodo del experimento en las dos épocas hubo precipitación (26,5 y 12 mm).

2.4.1.4. Contenido de agua en el suelo

El espacio poroso del suelo se encuentra ocupado por la solución del suelo y por aire (incluye vapor de agua). La condición hídrica del suelo se describe a través del contenido y energía libre del agua, dichos factores afectan directamente el comportamiento vegetal (Silva *et al.*, 2000). El monitorear el contenido de agua en el suelo es esencial por cuanto puede contribuir a tomar mejores decisiones en la programación del riego, tales como el determinar la cantidad a aplicar y el momento de su aplicación (Guzmán, 2011).

c) Determinación de contenido de agua en el suelo

El contenido de agua en el suelo se puede determinar a través de Agua Disponible Total (ADT) y Déficit Permitido de Manejo (DPM).

Serrano (s.f.) menciona que el ADT de los suelos está determinado por la diferencia entre el contenido de humedad a CC y PMP (obtenido en laboratorio) que para ser expresado en lámina de agua dependerá de la profundidad efectiva del sistema radicular del cultivo; la expresión matemática es la siguiente:

$$ADT = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * Pr$$

Donde:

Θ_{cc} : Contenido volumétrico de agua del suelo a capacidad de campo.

Θ_{pmp} : Contenido volumétrico de agua del suelo a punto de marchitez permanente.

Pr : Profundidad efectiva radicular.

Cuando los resultados del análisis de humedad vienen expresados en masa, por lo que podemos calcular ADT a través de:

$$ADT = (\Theta_{cc} - \Theta_{pmp}) * (\rho_{ap} / \rho_w) * Pr$$

Donde:

Θ_{cc} : Contenido gravimétrico de agua del suelo a capacidad de campo.

Θ_{pmp} : Contenido gravimétrico de agua del suelo a punto de marchitez permanente.

Serrano (s.f.), indica que el DPM es el grado de depleción de humedad del suelo que se debe permitir antes de cada riego, depende principalmente del tipo de cultivo y se lo puede calcular a través de la siguiente relación:

$$DPM = ADT * f$$

Donde:

f = Fracción o factor de agotamiento de agua de los cultivos.

d) Trabajos de investigación considerando contenido de humedad de suelo

Cun et al. (2012), estudio la influencia de niveles de humedad del suelo (R1 = Riego a 95 % de capacidad de campo C_c en la fase de desarrollo de la roseta y del repollo interior de hojas hasta la cosecha, R2 = Riego a 85 % de la C_c en la fase de formación de roseta de hojas a iniciación del repollo interior y R3 = Riego a 75 % de C_c en la fase de establecimiento de la planta a inicio de la roseta de hojas) en lechuga en

condiciones de cultivo organopónico (Técnica de cultivo sobre sustratos orgánicos delimitados por tablas u otro material en sitios donde el suelo es improductivo). La aplicación de R2 y R3 presentó mayor rendimiento (2,14 y 1,91 kg m⁻²) y número de hojas (23,0 y 23,2 No hojas pl⁻¹) con respecto al tratamiento R1. Durante el estudio la precipitación fue de 177,6 mm.

Durante los años 2005 y 2006, en condiciones de clima semiárida, se estudió niveles de agua (100, 80, 60, 40 y 20% de agua útil del suelo); en el cual, en el año 2006 la variable producción con los tratamientos 100 y 80 % de agua útil fueron similares estadísticamente y superiores al resto de los tratamientos (60, 40 y 20 % de agua útil del suelo); mientras que en el año 2005, el tratamiento 100 % de agua útil en el suelo en la variable producción (45,49 Mg ha⁻¹) fue estadísticamente superior con respecto a los otros tratamientos (Kuslu *et al.* (2008).

Bandeira *et al.* (2011), estudió el desarrollo de dos cultivares de lechuga (AF 1743 e OGR 326) con dos métodos de manejo de riego (R1 = Reposición de agua determinada por tensiometría y R2 = Reposición de agua determinada por evaporación de agua en tanque reducido) en ambiente protegido; en la cual el tratamiento R1 presentó superioridad estadísticamente para masa fresca de la parte aérea (71,40 g pl⁻¹), masa seca de la parte aérea (10,66 g pl⁻¹) y diámetro de roseta (36,42 g pl⁻¹) en comparación al tratamiento R2. Con manejo de R1 la lamina total de riego correspondió a 280 mm en tanto que para R2 fue 130 mm, el dato de este último el autor atribuye al tamaño del tanque por cuanto fue inferior al tanque Clase A estándar.

Boas *et al.* (2007), investigó el efecto de las Variedades Veronica y Hortencia y cuatro laminas de riego: 75, 100, 125 y 150 % de reposición de agua; el monitoreo del estado de energía del agua del suelo se realizó con ocho tensiómetros. Los resultados de dicha investigación mostraron que la materia fresca total, materia fresca comercial y número de hojas por planta tuvieron comportamiento cuadrático, con mayor producción para la lámina de 125 % de reposición de agua (381,3 g de materia fresca total/pl., 347,5 g de materia fresca comercial/pl y 26,0 hojas/pl).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Características de la investigación

El nivel de investigación del presente trabajo correspondió a explicativa, el tipo de investigación fue experimental y realizado en campo, el nivel de información obtenida fue cuantitativo y la naturaleza de la investigación fue de carácter mixta entre investigación básica y aplicada. Hernández *et al.* (2010), señala que los estudios explicativos su interés centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da este, o porque dos más variables están relacionadas. Tam *et al.* (2008), indica que la investigación básica, tiene por objetivo mejorar el conocimiento per se, más que generar resultados o tecnologías que beneficien a la sociedad en el futuro inmediato. Sandi (2014), menciona que la investigación aplicada se caracteriza porque busca la aplicación o utilización que se adquiere; se encuentra estrechamente vinculada con la investigación básica, por cuanto depende de los resultados y avances de esta última.

3.2. Localización

La parcela de investigación se realizó en un predio ubicado en la localidad Linde, municipio de Tiquipaya del departamento de Cochabamba; situado a una altura de 2.585 m.s.n.m. y se encuentra entre los paralelos 17° 21' 26'' latitud sur y 66° 11' 29'' longitud oeste.

3.3. Condiciones climáticas

La localidad Linde se encuentra en una zona con clima templado (Plan de Desarrollo Integral de Tiquipaya 2007/11); con una precipitación promedio anual de 493,74 mm y una temperatura promedio anual de 19,28 °C (adaptado de SENAMHI, 2015). Los datos de precipitación y temperatura correspondientes al periodo de 19 de septiembre a 11 de noviembre de 2014 de la investigación se obtuvieron de la Estación Meteorología Sarco, por ser la más próxima al sitio de la parcela experimental. En la cual, la precipitación registró un total de 36,5 mm y fluctuó entre 0 a 12,1 mm; en tanto que la temperatura máxima varió de 21 a 37 °C y la temperatura mínima oscilo entre 8

a 22 °C y posterior a las precipitaciones se aprecia descenso de la temperatura máxima y mínima (Figura 1). La humedad relativa máxima oscilo entre 34 y 85% y la humedad relativa mínima entre 12 y 49% (Figura 2).

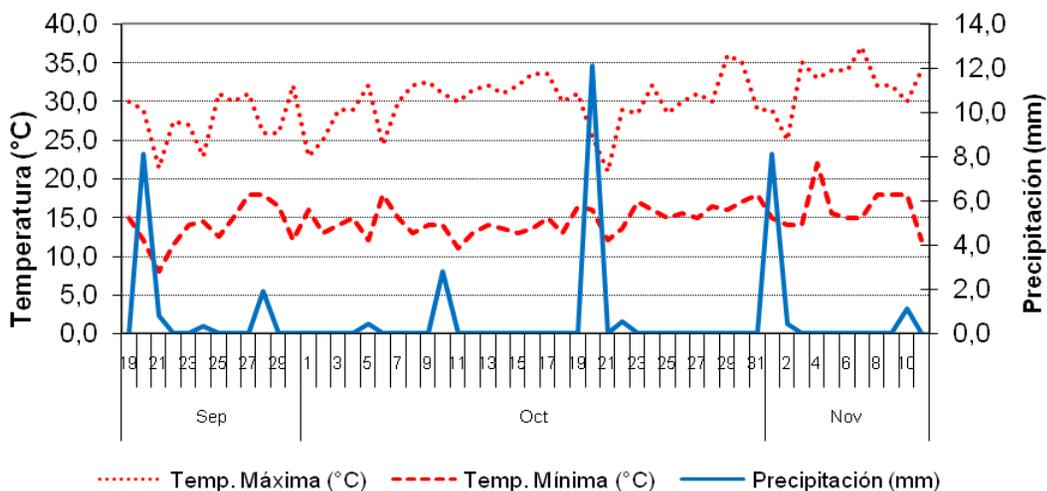


Figura 1. Fluctuación de la precipitación, temperatura máxima y mínima desde el trasplante hasta la cosecha de lechuga – Estación Meteorológica Sarco (SENAMHI, 2015).

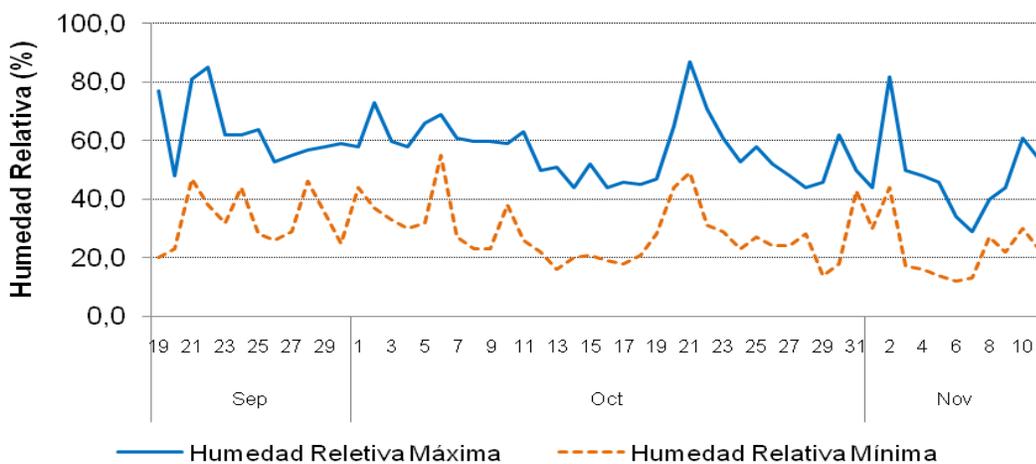


Figura 2. Fluctuación de humedad relativa máxima y mínima desde el trasplante hasta la cosecha-Estación Meteorológica Sarco (SENAMHI, 2015).

3.4. Características de Suelo y Agua

Los suelos de la localidad El Linde corresponde al Orden Entisoles y Sub Orden Fluvents (Adaptado de Plan de Desarrollo Integral de Tiquipaya 2007/2011); y en el mismo y en superficies pequeñas se cultiva maíz, alfalfa, papa, hortalizas (repollo, coliflor, cebolla, vainita, y otros), flores, etc.

Los resultados de análisis de suelo antes del establecimiento del experimento se muestran en las Tablas 1 y 2; el mismo fue realizado por el Laboratorio de Suelos y Agua dependiente de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias de la Universidad Mayor de San Simón. De acuerdo a la clasificación e interpretación de las características de suelo según Villarroel (1998), el suelo del sitio de la investigación tuvo una conductividad eléctrica moderadamente salino, pH débilmente alcalino, contenido de materia orgánica alto, nitrógeno total alto, fósforo bajo, potasio intercambiable moderado, calcio alto, magnesio alto y la capacidad de intercambio catiónico moderado. La textura del suelo fue franco y los mismos son adecuados para la agricultura, presentan muy buena capacidad de retención de humedad y las condiciones físicas son favorables (Villarroel, 1998).

Tabla 1. Características físicas del suelo del área experimental a una profundidad de 20 cm.

Textura	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Densidad Aparente (g cm⁻³)	% Capacidad de Campo 0,33 Bar	% Punto de Marchitez Permanente 15 Bar
F	27	38	35	1,22	22,2	12,15

Textura: F=Franco, Y=Arcilla, L= Limo; A=Arena

Tabla 2. Características químicas del suelo del área experimental a una profundidad de 20 cm.

pH 1: 2,5 Suelo-Agua	C.E. 1:2:5 suelo/agua (mmhos cm ⁻¹)	Cationes Intercambiables				T.B.I.	C.I.C.	M. O.	N Total	P Disponible
		Ca	Mg	Na	K					
		(me/100 g)								
7,3	1,238	13,9	5,5	0,96	0,73	20,19	16,64	5,27	0,224	11,3

C.E.= Conductividad eléctrica.

T.B.I.= Total de bases intercambiables.

C.I. = Capacidad de intercambio catiónico.

M.O. = Materia orgánica.

En la localidad de Linde, existen dos fuentes de riego para los cultivos: i) El canal de la angostura, de ella reciben varios turnos los usuarios que se encuentran al sur de dicho canal pero es insuficiente y ii) Vertientes de agua (Plan de Desarrollo Integral de Tiquipaya 2007/2011). En el trabajo de investigación se utilizó agua proveniente de un pozo y cuyo análisis químico fue realizado en el Laboratorio de Suelos y Agua de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias dependiente de la Universidad Mayor de San Simón; los resultados del mismo se muestra en la Tabla 3.

Según clasificación de Richards de riego y modificada la parte de riesgo de salinización por el Comité de Consultores de California, el agua usada en la investigación con fines de riego correspondió a la clasificación C2-S1; el cual significa que la conductividad eléctrica estuvo en un riesgo de salinización moderado y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) se encontró en la categoría agua baja en sodio (S1= RAS 0 a 10). El pH del agua se encontró dentro el rango normal (Fernández *et al.*, 2010), el carbonato de sodio residual se encontró en la clase buena (Palacios y Aceves, 1970; Del Valle, 1992; Aguilera y Martínez, 1996; Marín, 2002 citados por Pérez, 2011); en tanto que la concentración de cloro estuvo en un nivel toxico de ligero a moderado (Palacios y Aceves, 1970; Del Valle, 1992; Aguilera y Martínez, 1996; Marín, 2002 citados por

Pérez, 2011) y el índice de magnesio correspondió a la clasificación no peligrosa (Reporte Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias-UMSS, 2014).

Tabla 3. Características químicas de agua utilizada en la investigación

pH	C.E. $\mu\text{mhos cm}^{-1}$	Ca	Mg	Na	Potasio	CO ₃	HCO ₃	Cl
		(me l ⁻¹)						
6,5	836,00	4,50	3,50	2,00	0,06	0,00	4,60	3,50

SO ₄	S.E.	S.P.	RAS	P.S.S	Índice de magnesio (%)	C.S.R.	Sólidos Disueltos	Sólidos Totales	Clase*
(me l ⁻¹)						(me l ⁻¹)	(g l ⁻¹)		
1,96	5,46	4,48	1,000	19,90	43,80	0,00	0,65	0,79	C2-S1

S.E.= Salinidad efectiva; S.P.=Salinidad potencial; RAS=Relación de adsorción de sodio; PSS= Porcentaje de sodio soluble; CSR= Carbonato de sodio residual

3.5. Material vegetal

En la investigación se utilizó lechuga variedad Crespa; la misma presenta buen comportamiento agronómico en condiciones de valle del departamento de Cochabamba y presenta preferencia por los consumidores; en la Tabla 4, se describe sus características más importantes según INIAF (s.f.) y en la Fotografía 1, se muestra una planta de la variedad señalada.

Tabla 4. Características de semilla, plántula y de planta adulta de lechuga variedad Crespa.

Semilla	
Color de semilla	: Negro
Plántula	
Color de hoja	: Verde claro
Intensidad de la hoja	: Medio
Forma de hoja	: Oval
Forma de limbo	: Ondulado
Grado de dentado del borde	: Pronunciado
Tipo de cogollo	: Crespa
Planta Adulta	
Brillo de la Hoja	: Medio intenso
Grado de rizado	: Intenso
Ciclo	: Precoz (60 días después del trasplante)



Fotografía 1. Planta de lechuga variedad Crespa.

3.6. Equipos

Se utilizaron los equipos que a continuación se describen:

- **Computadora con su impresora**

Se utilizó en la elaboración de formularios para la toma de datos, manejo de la base de datos del experimento, procesamiento estadístico de datos, redacción y corrección del documento de tesis.

- **Balanza de precisión**

Se utilizaron dos balanzas digitales, la primera de una capacidad de 3.000 g con graduación de 0,1 g; y otra de una capacidad de 100 g con una graduación de 0,01 g. Dichos equipos sirvieron para el pesaje de muestras de lechuga, insumos y muestras de suelo para la determinación de humedad.

- **Equipo para análisis de muestra vegetal y de suelo**

Para el análisis de muestra vegetal y de suelo se requirió de varios equipos y para ello se contrató los servicios de laboratorios de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias dependiente de la Universidad Mayor de San Simón.

- **Cámara fotográfica**

Sirvió para la toma de fotos para la determinación de cobertura vegetal y otros relacionados al trabajo de investigación. La cámara fotográfica utilizada fue 12 megapíxeles.

3.7. Método: Implementación y conducción de la parcela experimental

La investigación fue conducida en una parcela establecida a campo abierto. Las actividades sobre la producción de lechuga desde la producción de las plántulas hasta la cosecha se muestra en la Figura 3.

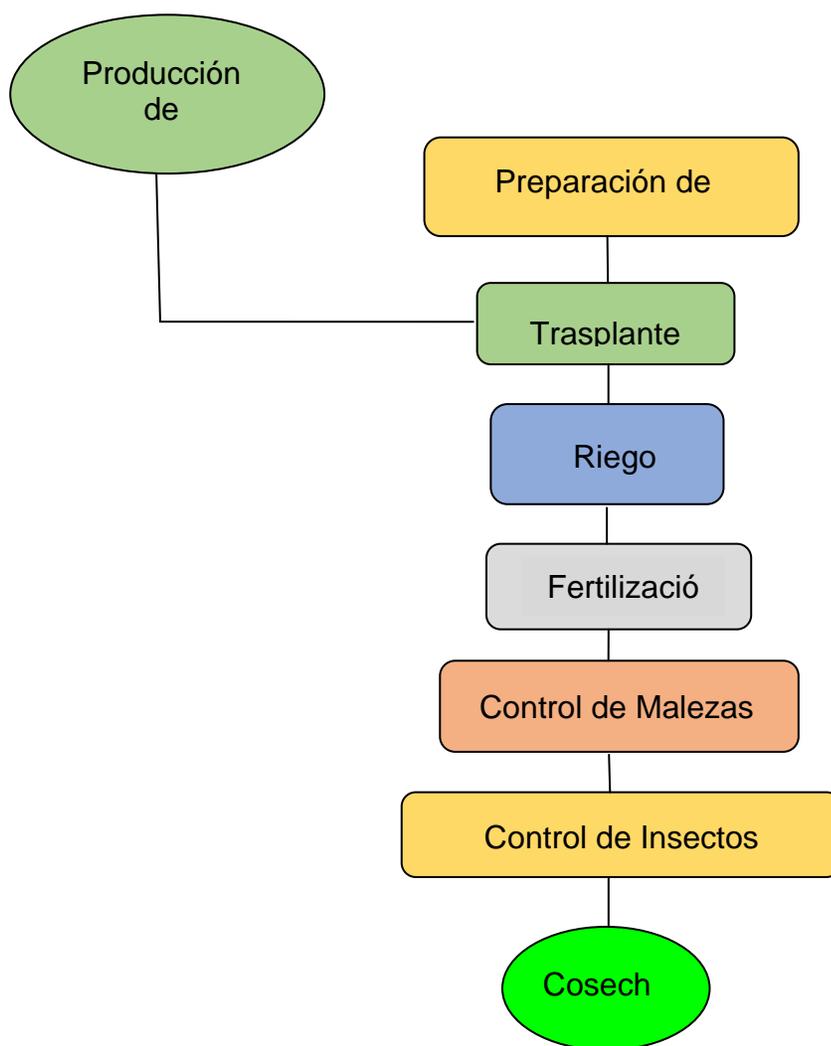


Figura 3. Flujograma de producción de lechuga

3.7.1. Producción de plántulas

Se preparó el sustrato con suelo con materia orgánica del sitio experimental y arena en una relación de 20:1; luego, se desinfectó con vapor de agua; cuando enfrió se envaso en recipientes de plástico de volumen de 90 cm³. Se sembró tres semilla de lechuga a una profundidad de 0.5 cm y cuando las plántulas tuvieron la primera hoja verdadera se raleo y se dejó una sola por vaso (Fotografía 2). El riego se realizó según requerimiento con una regadera manual. En esta fase se utilizó como semisombra malla zarán con 50% de sombra.



Fotografía 2. Plántula de lechuga después del raleo (a) y plántulas con tres hojas verdaderas (b).

3.7.2. Preparación de suelo y colocación de plástico

Consistió en dos aradas con tractor agrícola y posteriormente de manera manual se extrajo las raíces y rizomas de malezas. Para prevenir el humedecimiento de la parcela experimental con agua de lluvia por los costados se revistió con plástico a una profundidad de 40 cm en todo su perímetro (Fotografía 3); luego, también se colocó plástico entre las repeticiones.



Fotografía 3. Revestimiento con plástico del perímetro de la parcela experimental

3.7.3. Trasplante

El trasplante se realizó a 0,35 cm entre surcos y 0,30 cm entre plantas (Fotografía 4), dicha actividad se efectuó el 19 de septiembre de 2013. Las plántulas utilizadas tuvieron entre tres y cuatro hojas verdaderas.



Fotografía 4. Vista panorámica de parcela experimental posterior al trasplante

3.7.4. Riego

Se realizó según los tratamientos establecidos en la presente investigación y los mismos están descritos ampliamente en el acápite de metodología.

3.7.5. Fertilización

Se aplicó el fertilizante urea 46 % N en suelo húmedo, fraccionado en dos oportunidades; el 50% a los seis días después del trasplante y el saldo de 50% a los 24 días después del trasplante. Otros detalles sobre niveles de nitrógeno se pueden ver en el punto de descripción del factor nitrógeno.

3.7.6. Control de malezas

El método empleado fue el mecánico, que consistió en la remoción manual de las malezas y con azadón, el mismo se realizó en una oportunidad en fecha 16 de octubre de 2014.

3.7.7. Control de insectos plaga

En lo que respecta a insectos plaga se presentó pulgón (*Myzus sp*) que fue controlado de manera natural por el predator posiblemente del género Hippodamia.

3.7.8. Cosecha

La temperatura máxima más alta (37 °C) registrada a los 86 días después de la siembra (DDS) posiblemente estimuló la elongación de la cabeza para la floración, por lo que se adelantó la cosecha a los 90 DDS con respecto al tiempo establecido (96 DDS). La cosecha se realizó por la mañana con un estilete considerando las plantas útiles en cada unidad experimental; la evaluación de los mismos se encuentra descrita en el acápite de metodología.

3.8. Diseño experimental

La investigación fue realizada en un diseño de parcelas sub sub divididas con tres repeticiones, donde las parcelas principales fueron estrategia de reposición de agua al

suelo, las sub parcelas niveles de nitrógeno y las sub sub parcelas evaluaciones en el tiempo. Cada unidad experimental constó de 66 plantas y tuvo una superficie de 6,93 m².

3.8.1. Factores estudiados

d) Factor estrategia de reposición de agua al suelo

El factor estrategia de reposición de agua al suelo se definió considerando datos de laboratorio, tales como densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez permanente del sitio del experimento, profundidad radicular y fracción de agotamiento para la lechuga.

Fueron aplicadas cuatro estrategias de reposición de agua al suelo, las mismas se detallan a continuación:

Estrategia de reposición de agua 1 (R1) : Reposición de agua al 100 % de Déficit Permitido de Manejo (DPM) desde los 36 días después de la siembra (trasplante) hasta la cosecha.

Estrategia de reposición de agua 2 (R2) : Reposición de agua al 80 % de DPM desde los 36 días después de la siembra (DDS) hasta los 56 DDS, 100 % de DPM de los 57 días hasta los 90 DDS (Cosecha).

Estrategia de reposición de agua 3 (R3) : Reposición de agua al 100 % de DPM desde los 36 a los 56 DDS, 80 % de DPM de los 57 hasta los 76 DDS y 100 % de DPM de los 77 a 90 DDS.

Estrategia de reposición de agua 4 (R4) : Reposición de agua al 100 % de DPM de los 36 hasta los 76 DDS y 80 % de DPM de los 77 hasta los 90 DDS.

A continuación se muestra de manera grafica las estrategias de reposición de agua al suelo.

	36	56	76	90	DD
R1	100 % DPM				
R2	80% DPM	100 % DPM			
R3	100 % DPM	80% DPM	100 % DPM		
R4	100 % DPM			80% DPM	

El déficit permitido de agua se calculó a través de la relación propuesta por Serrano (s.f.):

$$DPM = ADT * f$$

Donde:

ADT = Agua disponible total.

f = Fracción o factor de agotamiento del cultivo de lechuga.

El agua disponible total (ADT) se calculará a través de la siguiente relación:

$$ADT = ((\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * (\rho_{ap} / \rho_w) * Pr$$

Donde:

θ_{cc} = Contenido gravimétrico de agua del suelo a capacidad de campo.

θ_{pmp} = Contenido gravimétrico de agua del suelo a punto de marchitez permanente.

ρ_{ap} = Densidad aparente.

ρ_w = Densidad de agua.

Pr = Profundidad radicular efectiva

La profundidad radicular utilizada, en todos los tratamientos fueron 9,12 cm; 13,67 cm; 18,23 cm; 22,78 cm; 27,34 cm y 31,89 cm para los intervalos 0-10, 11-20, 21-30, 31-40, 41-50 y 51-54 días después del trasplante, respectivamente.

La Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente se determinaron en laboratorio cuyos valores se muestra en el punto localización (3.1.).

Para convertir la lámina de agua de DPM en volumen se consideró en primera instancia que la lámina neta de riego es:

$$Z_n = ADT * f = DPM$$

$$Z_n = ((\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * (\rho_{ap} / \rho_w)) * Pr$$

Fuente: Serrano (s.f).

Utilizando conceptos de Briceño (2012), la lámina neta de riego se convirtió en volumen de agua según la siguiente relación:

$$V = Z_n * ds * dp$$

Donde:

V = Volumen de agua en litros por planta.

Z_n = Lamina de agua en milímetros.

ds = espaciamiento entre surcos en metros.

dp = espaciamiento entre plantas en metros.

El volumen de agua a los distintos tratamientos se aplicó en recipientes de plástico por planta de manera localizada.

e) Factor Nitrógeno

Se estudiaron dos niveles de nitrógeno: 0 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N1) y 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno. Como fuente de nitrógeno se utilizó el fertilizante urea 46% N y se aplicó el 50% a los seis días después del trasplante y 50% a los 24 días después del trasplante.

f) Factor Evaluación en el tiempo

Las evaluaciones se realizaron a los 36, 56, 76 y 90 días después de la siembra. El trasplante se realizó a los 36 días después de la siembra.

3.8.2. Modelo estadístico

En la investigación se utilizaron dos modelos estadísticos, el primero fue para el análisis de las variables (exportación de nitrógeno, tenor de nitrógeno en follaje, altura planta, materia seca, materia fresca y cobertura foliar), que tuvieron el efecto de estrategias de reposición de agua, nitrógeno y evaluaciones en el tiempo. En tanto que el segundo modelo se utilizó para el análisis de las variables rendimiento total, comercial y número de hojas que tuvieron el efecto de solamente estrategias de reposición de agua al suelo y nitrógeno.

El modelo estadístico que se utilizó fue el siguiente:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} + \alpha_k + (\tau\alpha)_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \theta_l + (\tau\theta)_{il} + (\alpha\theta)_{kl} + (\tau\alpha\theta)_{ikl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

y_{ijkl} = Valor de cualquiera de las características del estudio con la i -ésima estrategia de reposición de agua, j -ésimo bloque, k -ésimo nivel de nitrógeno y l -ésima evaluación.

μ = Media general.

τ_i = Efecto del i -ésima estrategia de reposición de agua al suelo.

β_j = Efecto del j -ésimo bloque.

ε_{ij} = Efecto del error experimental en parcelas (Error a).

- α_k = Efecto del k-ésimo nivel de nitrógeno.
- $(\tau\alpha)_{ik}$ = Efecto de la interacción i -ésima estrategia de reposición de agua al suelo, k-ésimo nivel de nitrógeno.
- ε_{ijk} = Efecto del error experimental en sub parcelas (Error b).
- θ_l = Efecto del l -ésima evaluación.
- $(\tau\theta)_{il}$ = Efecto de la interacción i -ésimo estrategia de reposición de agua al suelo y l -ésima evaluación.
- $(\alpha\theta)_{ik}$ = Efecto de la interacción k-ésimo nivel de nitrógeno y l -ésima evaluación.
- $(\tau\alpha\theta)_{iikl}$ = Efecto de la interacción i -ésima estrategia de reposición de agua al suelo, k-ésimo nivel de nitrógeno y l -ésima evaluación
- ε_{ijkl} = Efecto del error experimental en sub sub parcelas (Error c)

En el caso de las variables de respuesta rendimiento total, rendimiento comercial y número de hojas por planta se utilizó el siguiente modelo estadístico:

El modelo estadístico que se utilizó fue el siguiente:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} + \alpha_k + (\tau\alpha)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = Valor de cualquiera de las características del estudio con la i -ésima estrategia de reposición de agua, j -ésimo bloque, k -ésimo nivel de nitrógeno y l -ésima evaluación.

μ = Media general.

τ_i = Efecto del i -ésima estrategia de reposición de agua al suelo.

β_j = Efecto del j -ésimo bloque.

ε_{ij} = Efecto del error experimental en parcelas (Error a).

α_k = Efecto del k -ésimo nivel de nitrógeno.

$(\tau\alpha)_{ik}$ = Efecto de la interacción i -ésima estrategia de reposición de agua al suelo, k -ésimo nivel de nitrógeno.

ε_{ijk} = Efecto del error experimental en sub parcelas (Error b).

3.8.3. Monitoreo de humedad del suelo

Para el monitoreo de humedad del suelo se utilizó el método gravimétrico, para ello con barreno se muestreó aproximadamente 50 g de suelo de tres sitios próximos a las plantas de lechuga por cada unidad experimental, considerando la profundidad del suelo y tiempo (Tabla 5); posteriormente las muestras se secaron en estufa a 105 °C durante 24 horas.

El porcentaje de humedad del suelo se calculó a través de la siguiente relación:

$$Ps = ((Psh - Pss)/Pss)*100$$

Fuente: Cisneros (s.f.)

Donde:

Ps = Porcentaje de humedad de un suelo (%).

Pss = Peso suelo seco (g).

Psh = Peso de suelo húmedo (g).

Tabla 5. Número de muestreos de suelo en función a profundidad de suelo y tiempo

Tiempo (días)	Profundidad de Suelo (Cm)					
	9,12	13,67	18,23	22,78	27,34	31,89
0-10	4					
11-20		2				
21-30			2			
31-40				2		
41-50					2	
51-54						1

3.8.4. Variables de respuesta

8) Materia seca

Para la determinación de materia seca se muestreó distintas cantidades de plantas (parte foliar que incluyó hojas, tallo y una parte de raíz) y en diferentes momentos; cuyo detalle se presenta en la Tabla 6. En todas las etapas las plantas muestreadas se pesaron y luego se embalaron en bolsas plásticas de celofán con su respectiva identificación y en el día se enviaron al Laboratorio de Suelos y Agua de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias dependiente de la Universidad Mayor de San Simón; en dicho Laboratorio se secaron las muestras a 65 °C durante 48 horas.

Tabla 6. Cantidad de plantas de lechuga muestreadas en distintos momentos de la ejecución de la investigación.

Momento de Muestreo	Cantidad de Plantas	Descripción
36 días después de la siembra (trasplante)	174	Se muestreó en la almaciguera
56 días después de la siembra	19	Por unidad experimental
76 días después de la siembra	5	Por unidad experimental
90 días después de la siembra	4	Por unidad experimental

9) Exportación de nitrógeno

La determinación de contenido de nitrógeno se realizó en el Laboratorio de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias dependiente de la Universidad Mayor de San Simón, para ello, se utilizó las muestras de la variable materia seca cuyas cantidades y el

momento de muestreo se detalla en el punto “1) materia seca”. La metodología empleada fue Kjeldahl. Luego, con los datos de contenido de nitrógeno y la cantidad de materia seca en unidades de peso se calculó la exportación de nitrógeno a los 36, 56, 76 y 90 días después de la siembra; para ello se adecuó la fórmula de Franco (2011) que a continuación se muestra y posteriormente los valores obtenidos se transformaron en kg ha^{-1} .

$$\text{NE} = (\text{MS} \cdot \text{TN}) / 100$$

Donde:

NE = Nitrógeno exportado en unidades de peso (g).

MS = Materia Seca en unidades de peso (g).

TN = Tenor de nitrógeno en porcentaje (%).

10) Rendimiento total

Esta variable se evaluó en la cosecha y para ello se muestrearon 6 plantas por unidad experimental (Porto, 2006), luego se pesó en una balanza digital y se expresó en términos de kg ha^{-1} .

11) Rendimiento comercial

Se utilizó las plantas muestreadas para la evaluación de la variable rendimiento total, consistió en quitar de cada planta hojas amarillas, secas, dañadas por plagas y enfermedades, luego las plantas se pesaron en una balanza digital y los datos se expresaran en términos de kg ha^{-1} .

12) Altura de planta

Se evaluó a los 36, 56, 76 y 90 días después de la siembra, para ello se muestreó 6 plantas por cada unidad experimental, a las cuales, con una regla graduada se midió la

altura desde la superficie del suelo hasta la terminación de las hojas externas. Los datos se expresan en cm.

13) Número de hojas por planta

Se evaluó en la cosecha, para ello se muestreó 6 plantas y en cada una de ellas se contó el número de hojas considerando las hojas basales hasta la hoja abierta de tamaño mayor a 6 cm.

14) Cobertura foliar

Esta variable se evaluó a los 36, 56, 76 y 90 días después de la siembra (DDS); para ello, se muestreó tres plantas por unidad experimental y se tomaron fotografías con una cámara fotográfica de 12 megapíxeles, situado sobre caballetes de una altura de 41 y 72 cm con respecto a la superficie del suelo; el primer caballete se utilizó para la evaluación a los 36 y 56 días después de la siembra, mientras que el segundo caballete se usó para la evaluación a los 76 y 90 días después de la siembra. Las fotos se editaron en el programa Adobe Photoshop y la cobertura vegetal se obtuvo con el programa CobCal versión 2.1.0.63; que previamente se ajustó con datos obtenidos de manera directa con una red construido de madera e hilo, cada cuadrícula del mismo tuvo 1 cm².

3.9. Evapotranspiración de cultivo

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se utilizó para propósitos de comparación y el mismo es igual a la evapotranspiración de referencia ET_o multiplicada por coeficiente de cultivo (K_c) (Allen et al., 2006). La ET_o se determinó mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith, utilizando información de las estaciones meteorológicas Sarco y La Violeta que fueron los más próximos al sitio del experimento. En la determinación de K_c se consideró las etapas de crecimiento de lechuga: inicial, desarrollo del cultivo y mediados de temporada. La etapa inicial corresponde a desarrollo en semillero o almacigo (Rincón, s.f.), el cual significa aproximadamente 3 a 4 semanas; la etapa de desarrollo del cultivo comprende desde el trasplante hasta que el índice del área foliar (IAF) alcanza un valor de tres, este último es sugerido por Allen *et al.* (2006). El valor

de tres de IAF corresponde aproximadamente a los 40 días después del trasplante según el trabajo de investigación en crecimiento de lechuga realizado por Carranza *et al.* (2009). La etapa de mediados de temporada comprende desde que la planta presenta un IAF tres hasta la cosecha. Los valores Kc utilizados para la etapa de desarrollo fue 0,85 y para mediados de cultivo fue 1,00 (Adaptado de De Lima (2007) que cita a Marouelli *et al.* (1996), Allen *et al.* (1998) y Marouelli *et al.* (2001).

3.10. Balance hídrico

Para la determinación del balance hídrico se utilizó la fórmula propuesta por Aquiles (2015) y la misma se muestra a continuación:

$$ETR = (ETc/ADT) * (\Theta_{VI} + \Theta_{(I+1)})/2$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en condiciones no estándar..

ETc = Evapotranspiración de cultivo.

ADT = Agua total disponible.

Θ_{VI} = Humedad de suelo volumétrica inicial.

$\Theta_{(I+1)}$ = Humedad de suelo volumétrica final.

3.11. Análisis Estadístico

Los datos obtenidos, posterior a su tabulación y ordenamiento, fueron sometidos al análisis de varianza en el programa estadístico S.A.S. Para los factores que influyeron en las variables rendimiento total y rendimiento comercial se aplicaron la prueba de Tukey al 5%. Los efectos de las evaluaciones y su interacción con nitrógeno fueron análisis por regresión no lineal, entre tanto las relaciones entre variables por regresión lineal; para lo mencionado se utilizó el programa estadístico SAS y para la confección de los gráficos se recurrió al programa microsoft office Excel 2007.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan a continuación corresponden al periodo de 36 a 90 días después de la siembra bajo la influencia de estrategias de reposición de agua y niveles de nitrógeno.

4.1. Balance entre evapotranspiración de cultivo y precipitación

En condiciones de campo abierto para el tiempo que duró la investigación (54 días), la evapotranspiración de cultivo fue más alto (242,13 mm) que la precipitación (36,50 mm) (Figura 4), lo cual plenamente justifica que el cultivo de lechuga requiere de riego en el periodo que se condujo la investigación. La elevada evapotranspiración se debió a que en este periodo se aprecia una elevada amplitud térmica, temperatura máxima y mínima en ascenso y precipitaciones bajas en comparación a otros periodos como las que se presenta entre los meses de diciembre a marzo según los datos de SENAMHI (2015). En lo referente a ETc diaria y precipitación diaria, en la Figura 5 muestra que de 11 días con lluvia apenas tres de ellas estuvieron por encima de la ETc y el resto de los 8 días por debajo de la ETc, lo que significa que aproximadamente 45 días requirió riego. La ETc osciló entre 2,44 a 6,32 mm; lo cual se debió a la variabilidad de temperatura máxima y mínima, radiación solar, viento y humedad relativa máxima y mínima, sucedida durante el periodo de realización del estudio. El resultado de que hubo mayor evapotranspiración con respecto a la precipitación queda respla

Campero (2014) con datos históricos de 28 años de la Estación la Violeta, la misma se encuentra cercano al sitio del experimento; corrobora lo señalado de que la evapotranspiración es mayor a la precipitación en al menos 10 meses del año, entre ellos se encuentra agosto, septiembre, octubre y noviembre; aunque en la determinación de la evapotranspiración utilizó la formula de Hargreaves.

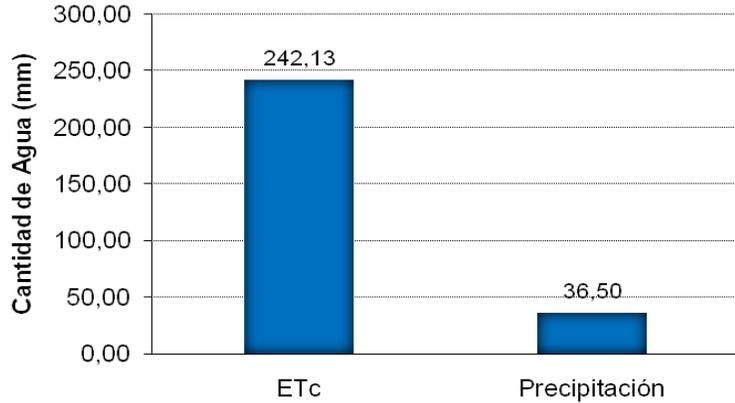


Figura 4. Comparación de evapotranspiración de cultivo con precipitación desde el trasplante hasta la cosecha del cultivo de lechuga.

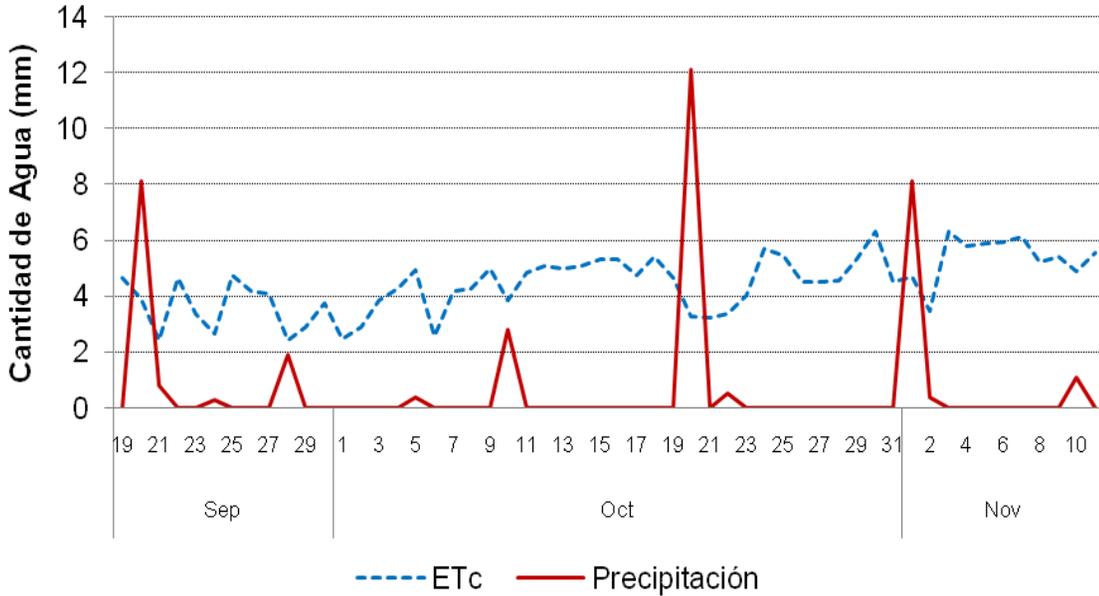


Figura 5. Fluctuación de la evapotranspiración de cultivo y precipitación desde el trasplante hasta la cosecha de lechuga.

4.2. Balance entre evapotranspiración real y precipitación

La aplicación de estrategias de reposición de agua al suelo influyó en la evapotranspiración real (ETR), donde R1 presentó mayor ETR (176,43 mm) en comparación a R2 (168,56 mm), R3 (169,70 mm) y R4 (169,71 mm), respectivamente

(Figura 6). La mayor ETR con R1 se debió posiblemente a la mayor aplicación de agua a la planta con dicha estrategia. La reposición de agua se realizó cuando el suelo estuvo por debajo de la capacidad de campo.

Asimismo se aprecia diferencia muy notoria entre la ETR y la precipitación, lo cual justifica la necesidad de reposición de agua al suelo en el periodo en la que se realizó la investigación (Figura 6).

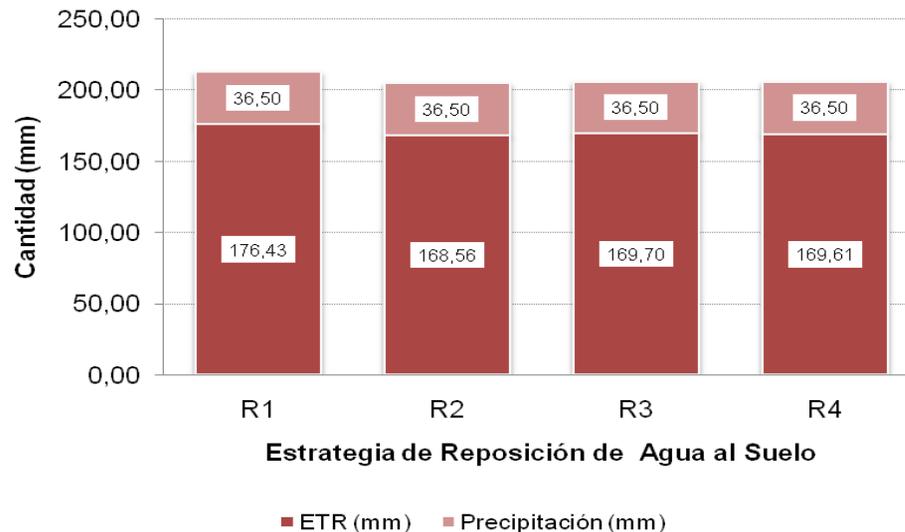


Figura 6. Balance entre evapotranspiración real y precipitación a la cosecha del cultivo de lechuga.

Donde: **R1**: Reposición de agua al 100 % de Déficit Permitido de Manejo (DPM) desde los 36 días después de la siembra (trasplante) hasta los 90 días después de la siembra (Cosecha), **R2**: Reposición de agua al 80 % de DPM desde los 36 hasta 56 días después de la siembra (DDS), 100 % de DPM de los 57 hasta 90 DDS. **R3**: Reposición de agua al 100 % de DPM desde 36 hasta 56 DDS, 80 % de DPM de los 57 hasta 76 DDS y 100 % de DPM de los 77 hasta 90 DDS y **R4**: Reposición de agua al 100 % de DPM desde los 36 hasta 76 DDS y 80 % de DPM desde 77 hasta 90 DDS.

4.3. Cantidad de agua aplicada al cultivo de lechuga por estrategias de reposición de agua al suelo

La aplicación de agua al cultivo de lechuga por las cuatro estrategias de reposición de agua al suelo presentó diferencias entre las mismas (Figura 7), donde el volumen de agua aplicado más alto correspondió a R1 (174,33 mm) y con incrementos de 6,32; 6,53 y 7,11% en comparación a R2, R3 y R4; asimismo las cuatro estrategias de

reposición de agua tuvieron el aporte adicional de agua por la precipitación de 36,5 mm. La menor cantidad de agua aplicada con R2, R3 y R4 se explica por la reposición de agua al suelo del 80% del déficit permitido de manejo en tanto que para R1 fue del 100% del déficit permitido de manejo. De acuerdo a las investigaciones en cantidad de agua aplicada en el cultivo de lechuga se aprecia que es influenciada por: i) Profundidad de napa freática (Chipana y Serrano, 2007), ii) Láminas de riego de acuerdo a disminuciones o aumentos con respecto a la evapotranspiración de cultivo (De Lima, 2007), iii) Uso del balance hídrico climatológico (Paulino *et al.*, 2009), métodos de riego (Vieira *et al.*, s.f.) y otros (tiempo de trasplante a cosecha, cultivo a campo abierto o en ambiente protegido y la precipitación).

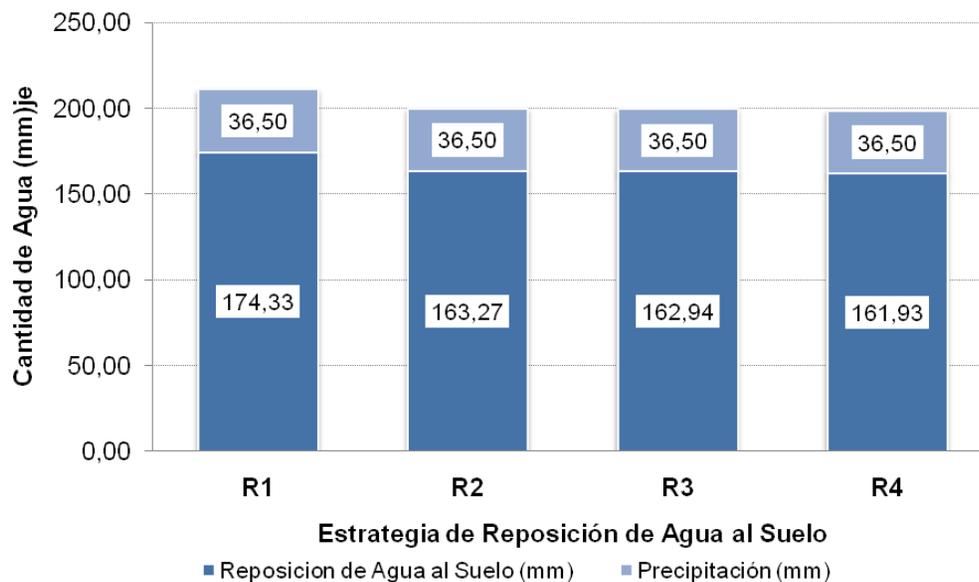


Figura 7. Cantidad de agua aplicada por cuatro estrategias de reposición de agua al suelo y precipitación para el periodo de trasplante a cosecha.

La Figura 8 muestra la cantidad de agua aplicada por periodos para las estrategias de reposición de agua al suelo. En el periodo de 36 a 56 días después de la siembra (DDS) la cantidad de agua aplicada más alta correspondió a las estrategias R1, R3 y R4 y el más bajo a R2, en tanto que en el periodo 57 a 76 DDS la mayor cantidad de aplicada fue para R1, R2 y R4 y la menor cantidad para R3 y finalmente para el periodo

77 a 90 DDS la cantidad de agua aplicada más elevada fue para R1, R2 y R3 y el más bajo para R4. En los distintos periodos cuando R2, R3 y R4 presentan menores cantidades de agua repuesta al suelo se debió que los mismos fueron afectadas por la reducción a 80% de la lamina de agua calculada por la formula de Déficit Permitido de Manejo.

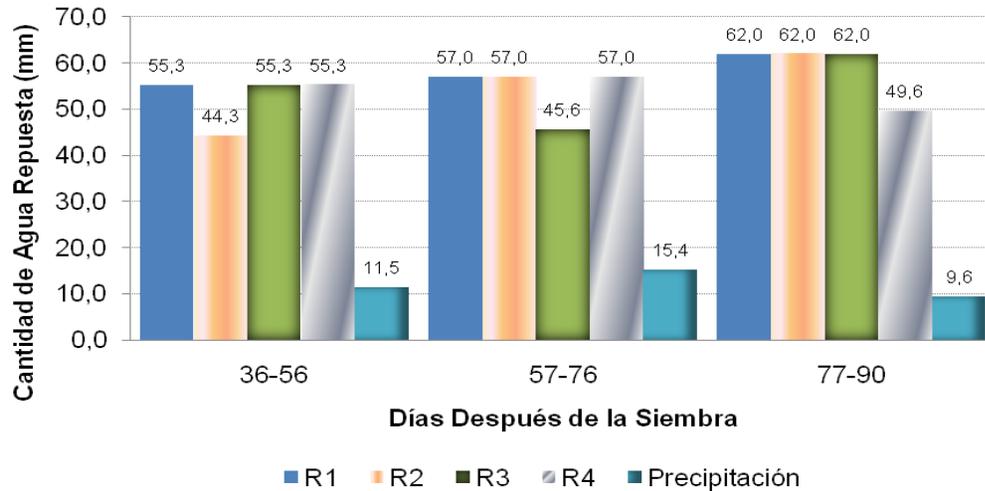


Figura 8. Cantidad de agua aplicada por cuatro estrategias de reposición de agua al suelo y precipitación para tres periodos desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha.

La Figura 9 presenta la variabilidad de ETR, precipitación y aplicación de agua por estrategias de reposición de agua. En la cual, en los días en los que se aplicó el agua por las estrategias R1, R2, R3 y R4 estuvieron por encima de la ETR desde los 40 hasta los 89 días después de la siembra (DDS), excepto los días 36 y 37 que estuvieron por debajo de la ETR; asimismo se aprecia que R2 durante los días 40 a 55 se encuentra más próximo a ETR, mientras que R3 de los 56 a 75 DDS y finalmente la R4 de los 76 a 89 DDS. En lo que respecta a precipitación, de los 11 días con lluvia los días 37, 67 y 79 DDS estuvieron por encima de la ETR. Las diferencias entre aplicación de agua en el estudio con respecto a la ETR se explica por la determinación de cantidad de agua por la formula de Déficit Permitido y a la profundidad radicular utilizada que inició con 9,12 cm y luego la misma incrementó progresivamente en 4,55 cm cada 10 días en todos los tratamientos hasta la conclusión del estudio.

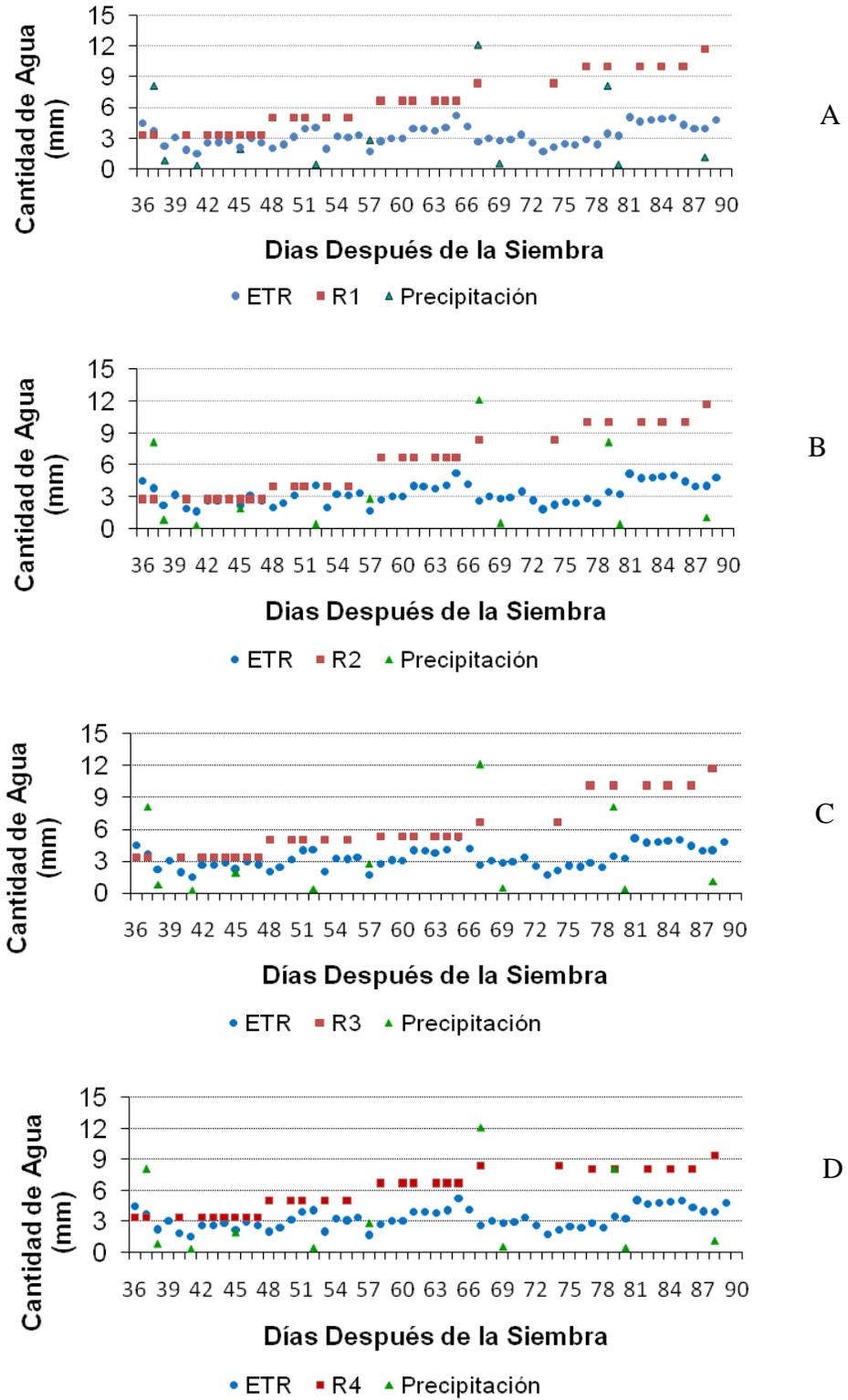


Figura 9. Variabilidad de evapotranspiración real, estrategias de reposición de agua al suelo y precipitación durante la realización de la investigación.

4.4. Monitoreo de humedad del suelo

De acuerdo al balance hídrico, durante el periodo de trasplante a cosecha, la humedad gravimétrica de suelo estuvo mayor cantidad de días por encima de la humedad gravimétrica crítica en las cuatro aplicaciones de estrategias de reposición de agua al suelo (Figura 10). La estrategia R1 y R3 presentan menor número de días con estrés con respecto a R2 y R4. La distribución de días con humedad normal y días con estrés durante el periodo de 36 a 90 días después de la siembra se muestra en la Figura 11. En las cuatro estrategias de reposición de agua la mayor cantidad de días con estrés estuvieron muy próximo a la humedad normal del suelo por ello probablemente no se apreció su influencia en el desarrollo del cultivo de lechuga.

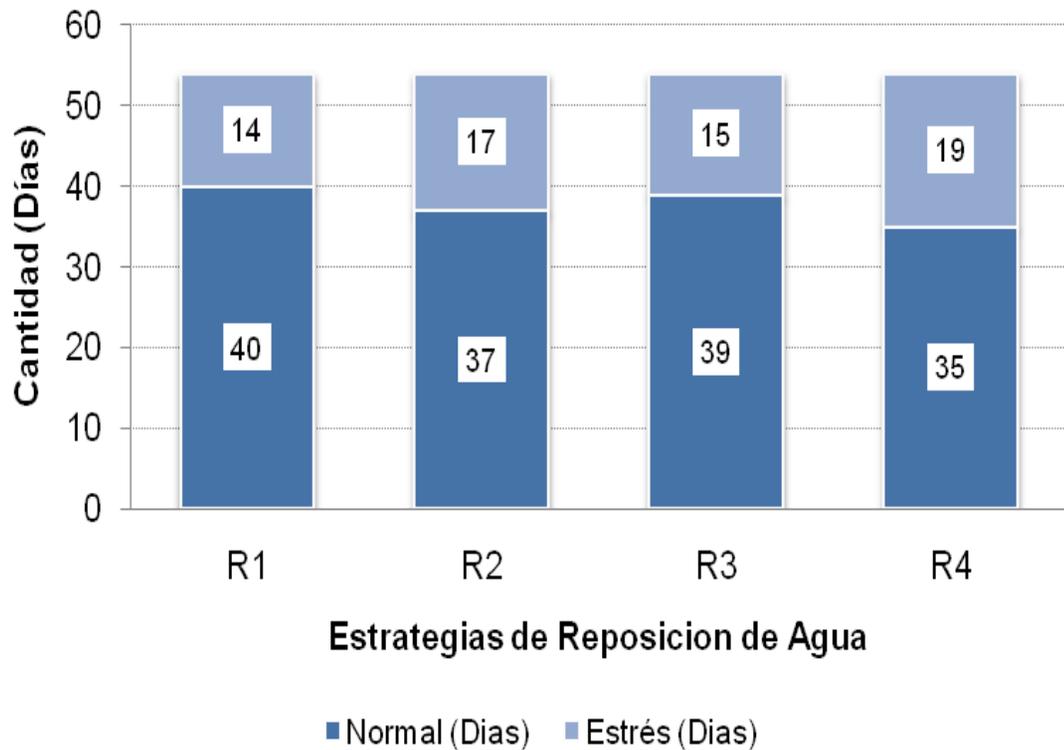


Figura 10. Suelo: Cantidad de días con humedad normal y días con estrés para estrategias de reposición de agua al suelo.

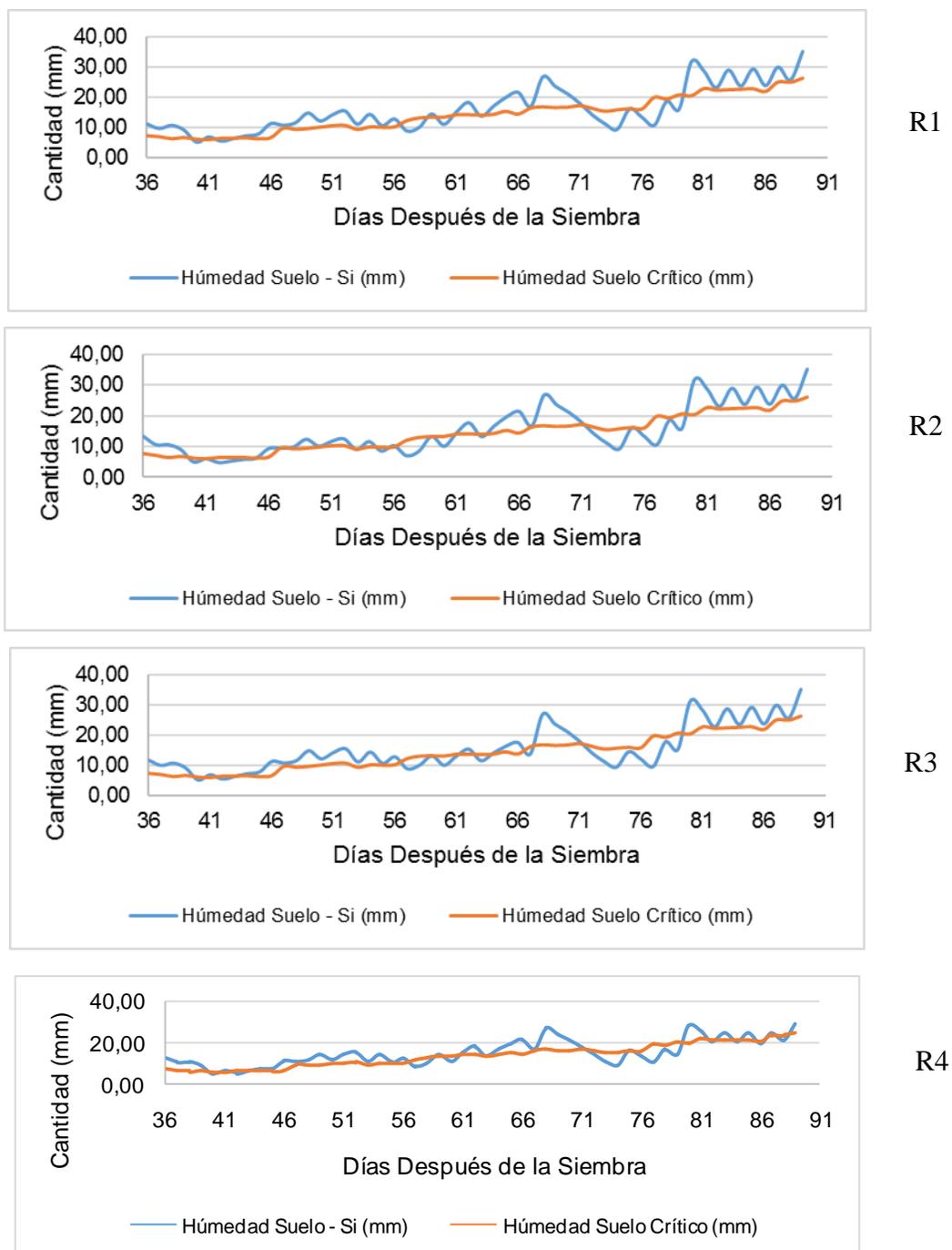


Figura 11. Variabilidad de humedad gravimétrica de suelo inicial y humedad gravimétrica de suelo crítico para estrategias de reposición de agua al suelo.

4.5. Influencia de estrategias de reposición de agua al suelo en rendimiento/volumen de lechuga, materia seca/volumen de agua y exportación de nitrógeno/volumen de agua.

La aplicación de estrategias de reposición de agua al suelo estadísticamente no afectó en las relaciones: rendimiento total/volumen de agua, rendimiento comercial/volumen de agua, materia seca/volumen de agua y exportación de nitrógeno/volumen de agua (Figuras 12, 13 y 14); lo que significa que en condiciones de cultivo de lechuga en campo, cuando se reduce hasta 20 % de la lámina de reposición de agua al suelo de 36 a 56 días después de la siembra, de 57 a 76 días después de la siembra y de 77 a 90 días después de la siembra no influye en las variables mencionadas. En promedio, el rendimiento/volumen de agua fue $8,36 \text{ g pl lt}^{-1}$, el rendimiento comercial/volumen de agua correspondió a $7,34 \text{ g pl lt}^{-1}$, materia seca/volumen de agua fue $0,70 \text{ g pl lt}^{-1}$ y exportación de nitrógeno/volumen de agua estuvo en $0,0141 \text{ g pl lt}^{-1}$.

Veraguaz (2007) obtuvo consumo de agua por plantas de lechuga entre 4,17 a 9.52 l pl a los 28 días después del trasplante y los mismos tuvieron peso fresco entre 60,41 a 179,17 g pl; utilizando dicha información la relación peso fresco/volumen de agua fluctuó de 14,20 a 18,82 g pl lt^{-1} ; por su parte, Chipana y Serrano (s.f.), en condiciones de ambiente protegido obtuvieron para lechuga variedad Crespa consumo acumulado de agua de 228 lt m^{-2} y una producción máxima de $4,77 \text{ kg m}^{-2}$, la transformación de los mismos en rendimiento total/Volumen de agua fue $20,61 \text{ g pl lt}^{-1}$. Los resultados de los trabajos mencionados se encuentran por encima al obtenido en la investigación; ello se debió a que dichos trabajos se realizaron en condiciones de ambiente protegido y en hidroponía por el primer autor y ambiente protegido por el segundo autor, en cambio el presente trabajo se realizó en condición de campo y sin cubierta.

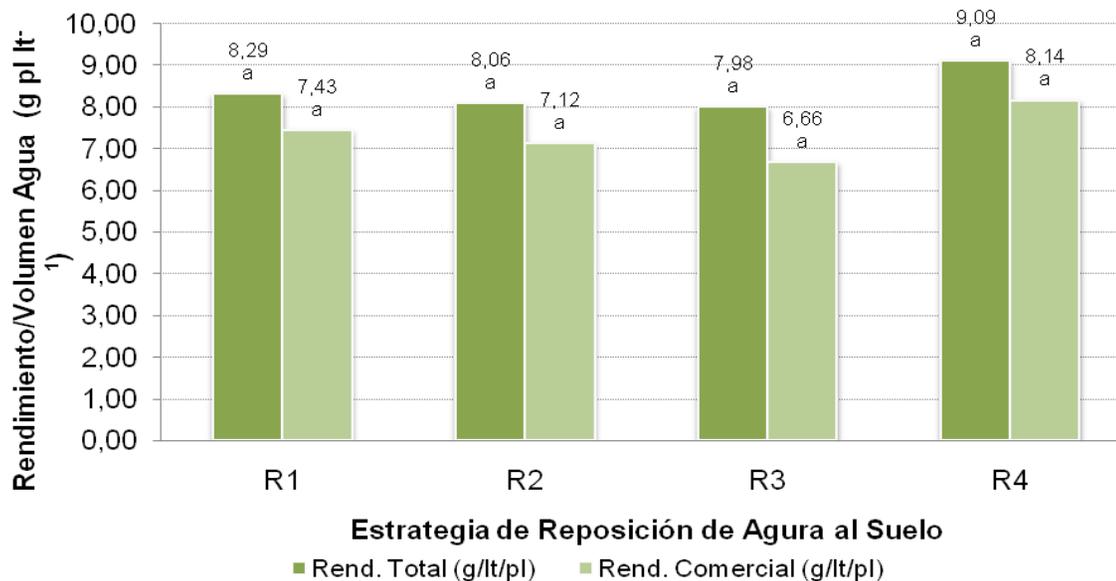


Figura 12. Aplicación de estrategias de reposición de agua en la relación rendimiento de lechuga por volumen de agua aplicada más precipitación.

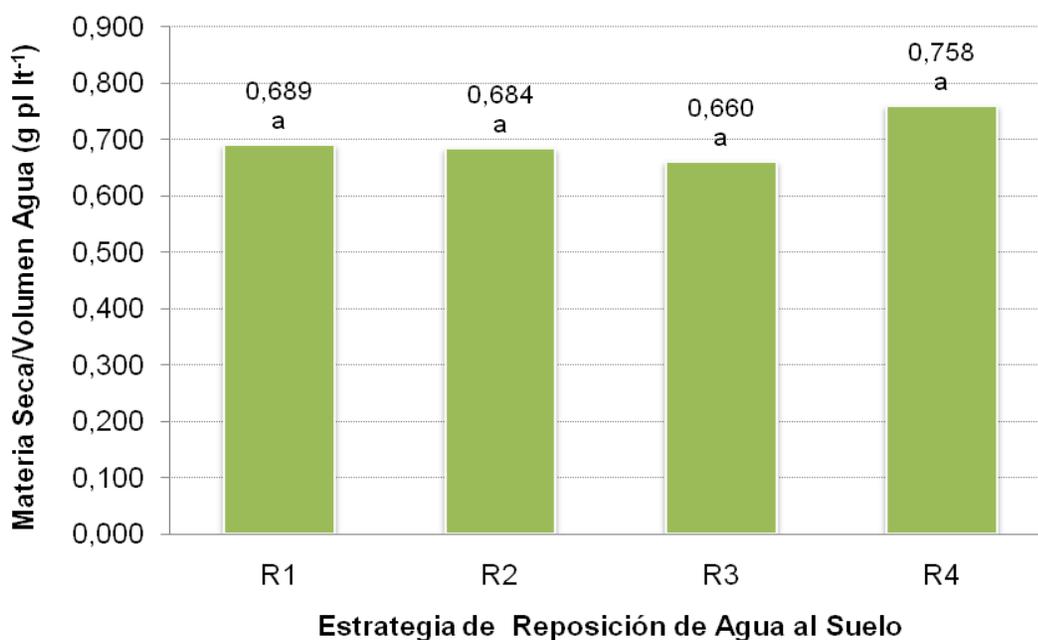


Figura 13. Efecto de la aplicación de estrategias de reposición de agua en la relación materia seca por volumen de agua aplicada más precipitación.

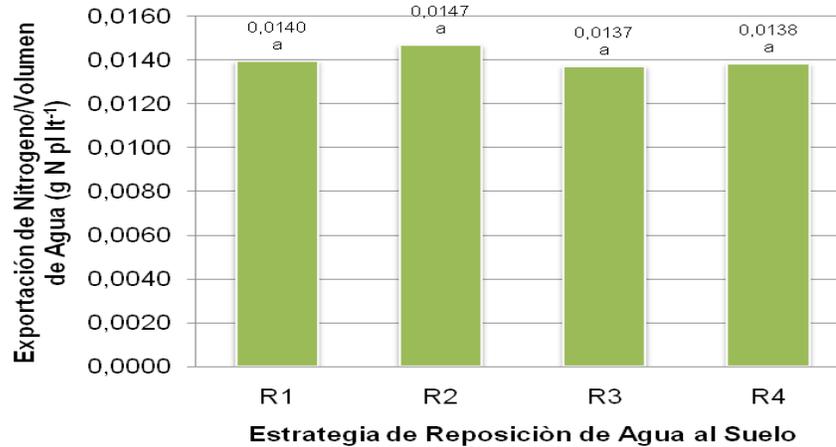


Figura 14. Efecto de la aplicación de estrategias de reposición de agua en la relación exportación de nitrógeno por volumen de agua aplicada más precipitación.

4.6. Efecto de estrategias de reposición de agua y niveles de nitrógeno en variables de suelo y otras

Los resultados obtenidos muestran que hubo diferencias estadísticas con aplicación de nitrógeno (N), evaluación (E) y la interacción entre nitrógeno y evaluación para tenor de nitrógeno y exportación de nitrógeno; mientras que no se apreció diferencias estadísticas para estrategia de reposición de agua ni las interacciones para las variables mencionadas (Tabla 7).

Calzada (1970) indica que el coeficiente de variación en experimentos agronómicos y ganaderos varía entre 9 y 29 %; por su parte Gómez (1984) clasifica el coeficiente de variación en bajos cuando tienen valores inferiores a 10 %, medios cuando son de 10 a 20 %, altos cuando se encuentra entre 20 a 30 % y muy altos cuando son superiores a 30 %. En lo que respecta a la variable exportación de nitrógeno muestra coeficiente de variación 31,18 y 47,27 % para el error a y b (Tabla 7); lo cual se puede considerar muy alto, y ello se debió posiblemente a las características de la investigación que considera la exportación de nitrógeno durante el crecimiento del cultivo, donde los valores en las primeras evaluaciones en comparación a la última evaluación fueron muy amplias. Soratto et al. (2011), en un trabajo de investigación realizado en extracción y exportación de micronutrientes en cultivares de papa presenta coeficientes

de variación para exportación de micronutrientes entre medios (13,6% para B), altos (21.4% para Mn y 21,2% para Zn) y muy altos (46.5% para Cu y 44.5% para Fe), dicho trabajo también se realizó con evaluaciones en el tiempo.

Tabla 7 Resumen de análisis de varianza para exportación de nitrógenos y materia seca en función de estrategias de reposición de agua y aplicación de nitrógeno.

Fuentes de variación	Variables Dependientes	
	Tenor de Nitrógeno	Export. de Nitrógeno
	Cuadrados Medios	
Repetición	0,322	180,29
Estrategia de Reposición de Agua (R)	0,126 (n.s.)	10,10 (n.s.)
Error (a)	0,166	43,84
Nitrógeno (N)	0,971 (**)	632,85 (**)
R*N	0,087 (n.s.)	1,36 (n.s.)
Error (b)	0,097	2,69
Evaluación (E)	7,792 (**)	4.432,09 (**)
R*E	0,088 (n.s.)	5,72 (n.s.)
N*E	0,371(*)	233,53 (**)
R*N*E	0,084 (n.s.)	21.47 (n.s.)
Error (c)	0,116	19.07
Coeficiente de Variación (%)		
a)	16,44	47,27
b)	12,57	11,71
c)	13,75	31,18

Donde: * Significativo, ** altamente significativo y n.s. no significativo.

4.6.1. Tenor de nitrógeno en la parte aérea de lechuga

En el periodo de trasplante a cosecha de lechuga (36 a 90 días después de la siembra), el tenor de nitrógeno en la parte aérea de lechuga (hojas y tallo) tuvo una tendencia cuadrática para aplicación de 0 (N0) y 100 kg N ha⁻¹ (N100) (Figura 15); apreciándose mayor tenor de nitrógeno con la aplicación de N100 en comparación a N0; lo cual se atribuye a la adición de nitrógeno al suelo y consecuentemente contribuyó al incremento del tenor de nitrógeno en la parte aérea de la lechuga. La concentración más alta de tenor de nitrógeno se presentó a los 36 DDS, siendo 3,347% para la aplicación de N100 y 3,089% para N0; luego para ambas aplicaciones va disminuyendo hasta los 90 DDS (2,057% con N100 y 1,839% con N0).

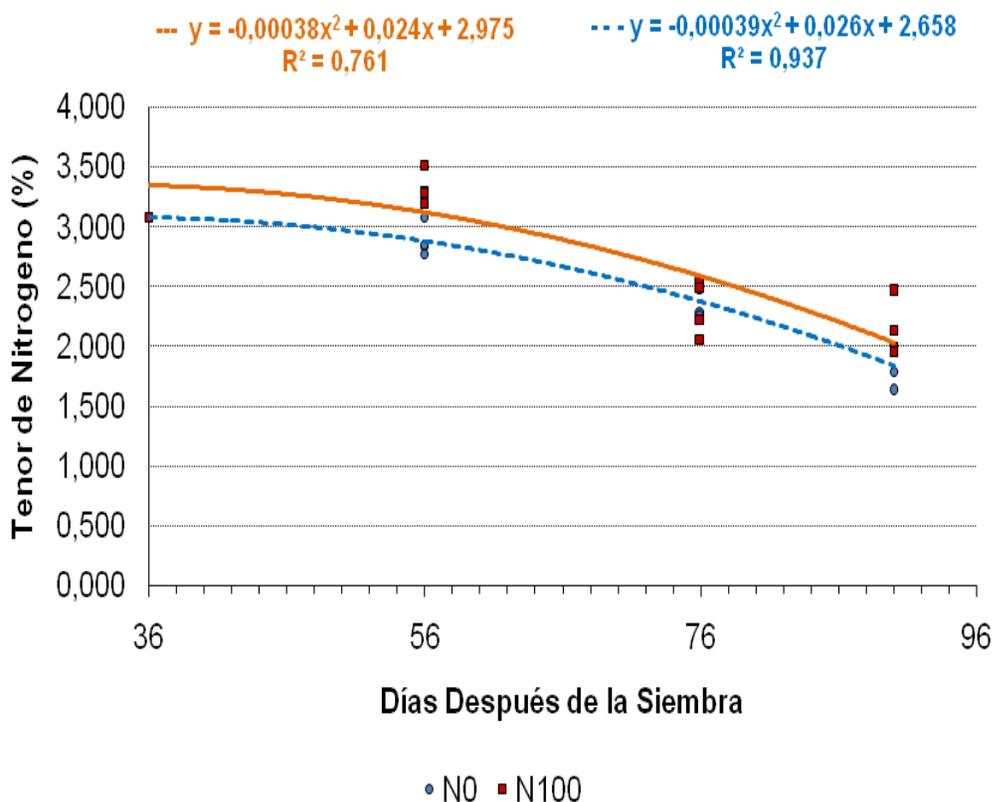


Figura 15. Tenor de nitrógeno desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha con aplicación de dos niveles de nitrógeno (N0 = 0 kg N ha⁻¹ y N100 = 100 kg N ha⁻¹).

Estudios realizados por Rincón et al. (2002) obtuvieron similar tendencia para tener de nitrógeno en hojas exteriores e interiores en lechuga iciberg (cv. Coolguard) para cinco niveles de aplicación de nitrógeno (25, 50, 150 y 200 kg de N ha⁻¹); en cambio Cometti (2003) en hidroponía encontró resultados que se aproximan a una tendencia lineal con los mayores valores en trasplante y con los valores menores en cosecha para la aplicación de cuatro concentraciones de macronutrientes (100, 500, 25 y 12,5%) con respecto a la concentración original. Los valores obtenidos por los autores señalados estuvieron por encima a los obtenidos en el experimento.

4.6.2. Exportación de nitrógeno

La aplicación de estrategias de reposición de agua, estadísticamente no influyó en la exportación de nitrógeno (Figura 16); la cual probablemente se debió a la escasa diferencia entre las láminas de riego correspondiente a las cuatro estrategias de reposición de agua. En promedio la exportación de nitrógeno fue 28,40 kg ha⁻¹.

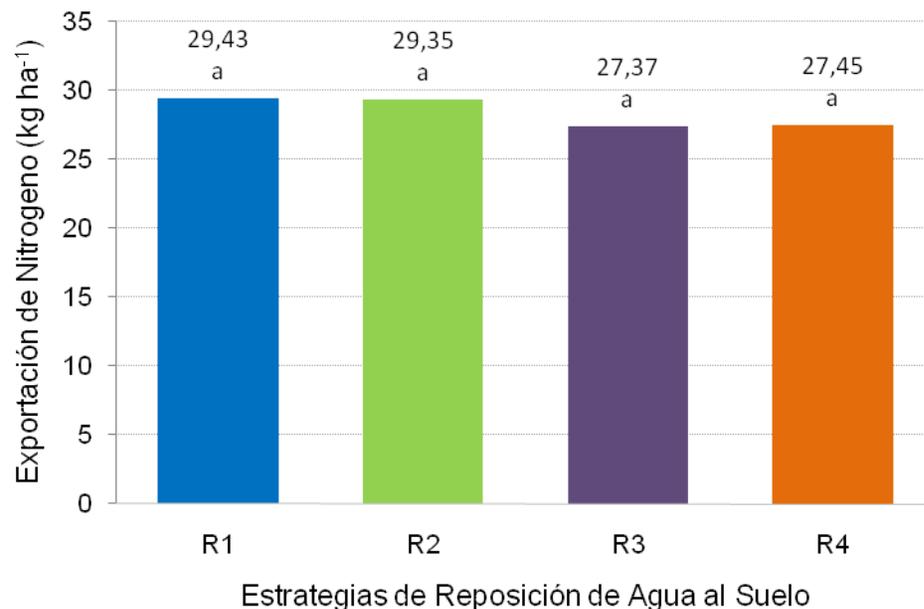


Figura 16. Efecto de estrategias de reposición de agua al suelo en exportación de nitrógeno en lechuga.

La aplicación de 100 kg de N ha⁻¹ (N100) y 0 kg de N ha⁻¹ (N0) desde los 36 hasta los 90 días después de la siembra (DDS) se ajustaron ambos a modelos de tendencia polinomial cubica (Figura 17); en la cual, la exportación de nitrógeno fue similar y mínima con aplicación de N0 y N100 hasta los 56 DDS, luego fue incrementando de manera notoria hasta los 90 DDS (cosecha) y en este periodo la exportación de nitrógeno fue gradualmente superior para la aplicación de N100 con respecto N0. La máxima exportación de nitrógeno se presentó a los 90 DDS, siendo 37,19 kg N ha⁻¹ para N100 y 22,67 kg N ha⁻¹ para N0.

Los trabajos de investigación de Doerge (s.f) y Rincón et al. (2002) presentan resultados sin el ajuste de datos; sin embargo del primer autor se aproxima a los alcanzados en el trabajo de investigación (regresión no lineal) y del segundo correspondió a tendencia lineal; pero las cantidades totales de nitrógeno exportados son superiores a los alcanzados en el experimento; ello se debió probablemente a que utilizaron otras variedades de lechuga (Waldmann`s Green y Coolguard) y el periodo de trasplante a cosecha fue de 120 y 80 días respectivamente; mientras que en el experimento el periodo de trasplante a cosecha fue de 54 días.

Faquin y Andrade (2004) indican que la lechuga con un rendimiento de 25.000 kg ha⁻¹ en promedio exporta 41,4 kg de N ha⁻¹, dicho valor fue mayor al obtenido en la investigación con N100, ello probablemente se debió a que con el nivel de nitrógeno mencionado se obtuvo un rendimiento total cerca a 20.000 kg ha⁻¹. Al respecto, Bertsch (1995) mencionada que la cantidad de nutrimento que requiera o absorba un cultivo durante su ciclo de vida está en función directa al rendimiento de ese cultivo.

La mayor exportación de nitrógeno por N100 con respecto a N0 posterior a 56 DDS, se atribuye a la adición de nitrógeno al suelo por lo que hubo mayor nitrógeno disponible y consecuentemente mayor absorción de dicho nutriente por la planta a medida que fue creciendo. Por cuanto Dreccer *et al.* (2010) señalan que el patrón de absorción de nutrientes depende no solo de la demanda establecida por el cultivo (destino) sino también de la oferta del suelo para las plantas (fuentes).

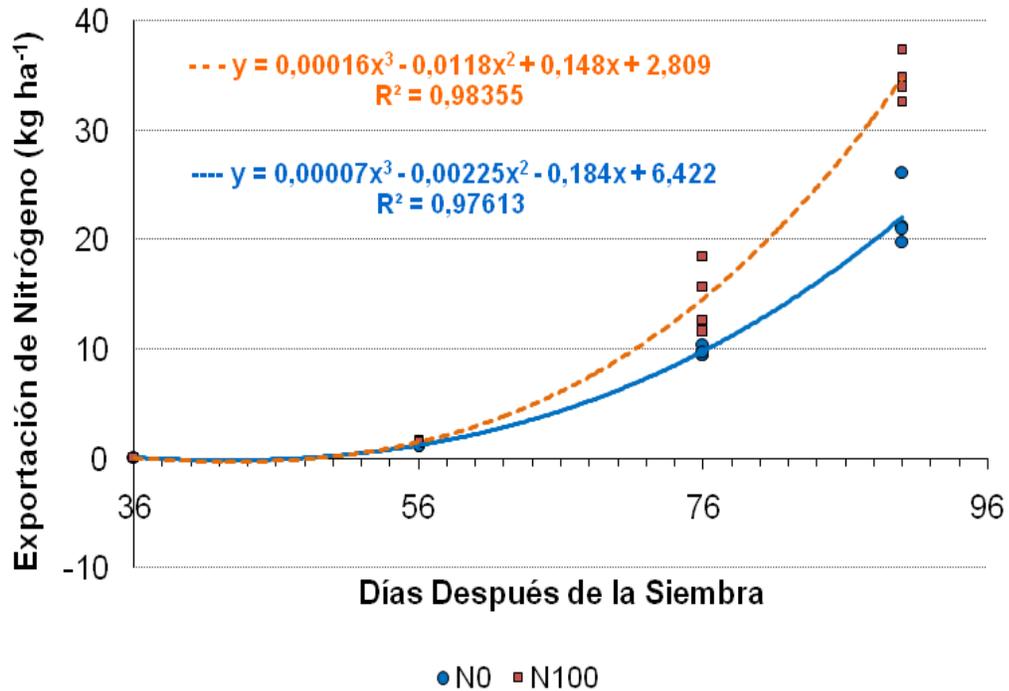


Figura 17. Efecto de niveles de nitrógeno en la exportación de nitrógeno en el cultivo de lechuga a partir de los 36 días después de la siembra hasta la cosecha.

4.6.3. Relación de exportación de nitrógeno y cobertura foliar

La relación de datos de exportación de nitrógeno y cobertura foliar se analizó mediante una regresión lineal como se puede apreciar en la Figura 18. La exportación de nitrógeno en lechuga tendió a incrementarse en forma lineal a medida que se incrementó la cobertura vegetal; lo cual significa que por cada incremento de 100 cm² de cobertura foliar de una planta de lechuga hubo una exportación de 0,093 g de Nitrógeno. La relación de mayor exportación de nitrógeno a mayor cobertura vegetal se atribuye a que la planta de lechuga a medida que crece necesita sintetizar mayor cantidad de moléculas y estructuras físicas que en su composición presenta nitrógeno. Rodríguez (1991) indica que el nitrógeno es componente: i) De la estructura de las moléculas de proteína funcionales y de reserva, ii) Es constituyente de la estructura física del citoplasma y de las membranas protoplásmicas, enzimas, coenzimas, vitaminas, glico y lipoproteínas, pigmentos vegetales, iii) Forma parte de las nucleoproteínas (proteínas + ácidos nucleídos) y iv) Forma parte de ATP, ADP y AMP.

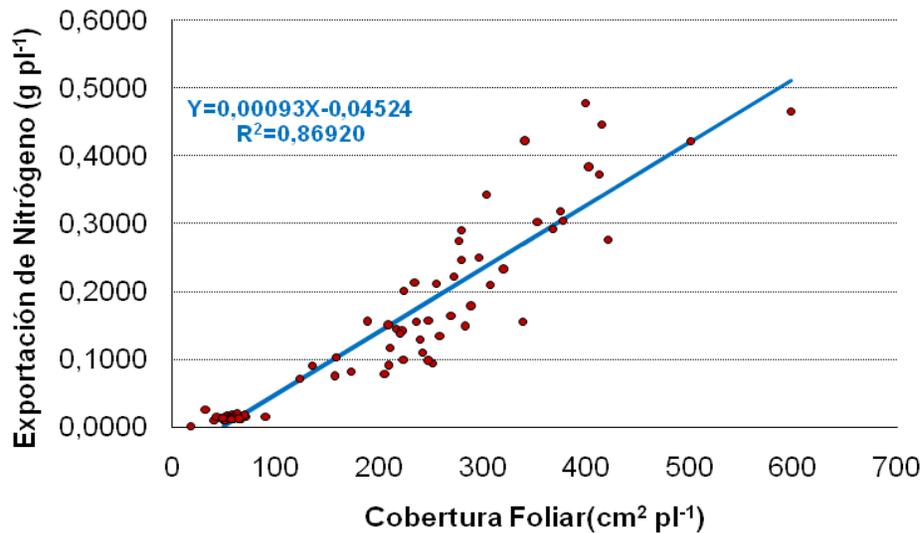


Figura 18. Relación entre la cobertura foliar y la exportación de nitrógeno en el cultivo de lechuga Variedad Crespa.

4.7. Efecto de estrategias de reposición de agua y niveles de nitrógeno en variables agronómicas

El análisis de varianza de las variables altura planta, cobertura foliar, materia seca y materia verde en función de estrategias de reposición de agua al suelo (R), aplicación de nitrógeno (N) y evaluaciones (E); muestra que hubo diferencias estadísticas para N, E y la interacción N x E para las variables dependientes indicadas; mientras que no se apreció significancia para R, ni las interacciones R x N, R x E, y R x N x E (Tabla 8). Posteriores análisis estarán concentrados en la interacción N x E como se detallan en los puntos: 4.7.1., 4.7.2., 4.7.3. y 4.7.4.

En tanto que, el análisis de varianza de las variables rendimiento total, rendimiento comercial y número de hojas en función de estrategias de reposición de agua al suelo (R) y aplicación de nitrógeno (N) presentaron diferencias altamente significativas con aplicación de nitrógeno; mientras, que no hubo significancia para R ni la interacción R x N (Tabla 9). Análisis posteriores se puntualizará en comparación de medias de niveles de aplicación de nitrógeno a través de la prueba de Tukey al 5% (punto 4.4.6).

Tabla 8. Resumen de análisis de varianza para altura planta, cobertura vegetal, materia seca y peso fresco en función de estrategias de reposición de agua y aplicación de nitrógeno.

Fuentes de variación	Variables Dependientes			
	Altura Planta	Cobertura Vegetal	Materia Seca	Materia Fresca
	Cuadrados Medios			
Repetición	5,40	33.584,60	204.389,87	42.302.276,00
Estrategia de Reposición de Agua (R)	1,49 (n.s.)	1.270,26 (n.s.)	42.491,25 (n.s.)	3.475.897,00 (n.s.)
Error (a)	3,71	8.972,53	68.810,03	10.992.956,00
Nitrógeno (N) (**)	7,59 (*)	63.707,25 (**)	701.409,58 (**)	89.760.303,00 (**)
R*N	1,97 (n.s.)	190,57 (n.s.)	2.230,50 (n.s.)	4.051.076,00 (n.s.)
Error (b)	0,87	1.253,22	4.018,35	2.527.510,00
Evaluación (E)	529,64 (**)	470.741,91 (**)	11.520.379,61 (**)	1.628.317.531,00 (**)
R*E	0,26 (n.s.)	438,15 (n.s.)	17.341,18 (n.s.)	3.738.285,00 (n.s.)
N*E	6,62 (**)	13.865,02 (**)	254.305,74 (**)	35.815.136,00 (**)
R*N*E	0,29 (n.s.)	259,09 (n.s.)	10.668,00 (n.s.)	3.587.243,00 (n.s.)
Error (c)	0,62	2.283,92	22.154,99	4.426.068,00
Coeficiente de Variación (%)	18,59	45,80	39,79	44,51
a)	9,03	17,12	9,62	21,34
b)	7,62	23,11	22,58	28,24
c)				

Donde: * significativo a 5%, ** altamente significativo a 1% y n.s. no significativo.

Tabla 9. Resumen de análisis de varianza para rendimiento total, rendimiento comercial, número de hojas, cobertura vegetal y altura planta en función de estrategias de reposición de agua y aplicación de nitrógeno.

Fuentes de variación	Variables Dependientes		
	Rendimiento Total	Rendimiento Comercial	No de Hojas
	Cuadrados Medios		
Repetición	59.357.147,50	36.399.471,62	37,65
Estrategia de Reposición de Agua (R)	6.190.639,00 (n.s.)	10.837.150,04 (n.s.)	2,27 (n.s.)
Error (a)	13.923.044,00	11.946.129,16	17,00
Nitrógeno (N)	143.014.235,80 (**)	88.086.491,16 (**)	19,24 (n.s.)
R*N	10.566.465,30 (n.s.)	13.190.273,33 (n.s.)	5,99 (n.s.)
Error (b)	4.192.524,80	6.926.406,10	7,89
Coefficiente de Variación (%)			
a)	29,25	24,25	16,39
b)	12,39	18,47	11,17

Donde: ** altamente significativo a 1% y n.s. no significativo.

4.7.1. Altura planta

A la conclusión del estudio la altura de planta fue 16,1 y 14,40 cm con aplicación de 100 kg de N ha⁻¹ (N100) y 0 kg N ha⁻¹ (N0) respectivamente.

Los datos de altura planta de lechuga para aplicación de N0 y N100 desde los 36 días de la siembra hasta la cosecha se ajustaron a un modelo de tendencia cuadrática (Figura 19); en la cual, se aprecia que hasta los 67 días después de la siembra (DDS) fue similar la altura planta para N0 y N100; posteriormente hasta la cosecha (última evaluación) se observa plantas más altas para N100 con respecto a N0. Para ambos niveles de aplicación de nitrógeno el crecimiento hasta los 56 DDS fue muy lento, en

tanto que hasta los 76 DDS el incremento fue notorio y a los 90 DDS fue mayor a los anteriores periodos. La similitud en altura de planta para N0 y 100 hasta los 67 DDS probablemente se debió a la cantidad disponible de nitrógeno en el suelo que satisfizo el requerimiento del cultivo de lechuga hasta esta edad; posteriormente mayores requerimientos de nitrógeno por el cultivo se pudo satisfacer con aplicación de N100, lo que influyó en una mayor altura planta en comparación a N0. El nitrógeno forma parte de la estructura de las hormonas vegetales auxinas y cinetina; la primera estimula el crecimiento y otras funciones fisiológicas, la segunda estimula la división celular de tejidos no organizados (Rodríguez, 1991). El nitrógeno influye en altura planta de lechuga, lo cual fue demostrado por De Almeida et. al (2011) en una investigación con soluciones nutritivas, donde la solución sin nitrógeno presentó decrecimiento en altura planta con respecto a la solución nutritiva completa.

Escarabajal *et al.* (2013) en una investigación en un campo comercial obtuvo similar resultado al obtenido con N100 durante el crecimiento de la planta; en dicho estudio, la altura planta fue 5,2 cm al trasplante; 6,8 cm a 20 después del trasplante (ddt), 11 cm a 40 ddt y 15,9 cm a los 60 ddt. El sitio del experimento correspondió a un suelo de textura franco arcillo arenosa, con 2,35 % de materia orgánica y riego localizado con cinta de exudación y en condiciones de campo abierto.

Galbiatti *et al.* (2007) estudió el efecto de tipos de fertilizantes (sin fertilización, efluente de biodigestor, estiércol bovino, cama de pollo y mineral) y dos calidades de agua de riego (tratada y residual) en ambiente protegido; en la cual con aplicación de fertilizante mineral (250 g m⁻² de superfosfato simple, 30 g m⁻² de cloruro de potasio y 10 g m⁻² de nitrato de amonio) obtuvo plantas mas altas durante tres cicclos de cultivo con respecto al testigo (sin fertilización) tanto con riego de aguas tratadas y residual; aunque la altura planta fue menor a los logrados en la presente investigación. Dicho estudio realizó en un suelo de textura franco arenosa y de pH 4,3; aplicó un corrector de suelo (300 g m⁻² de calcario dolomítico) en todas las parcelas.

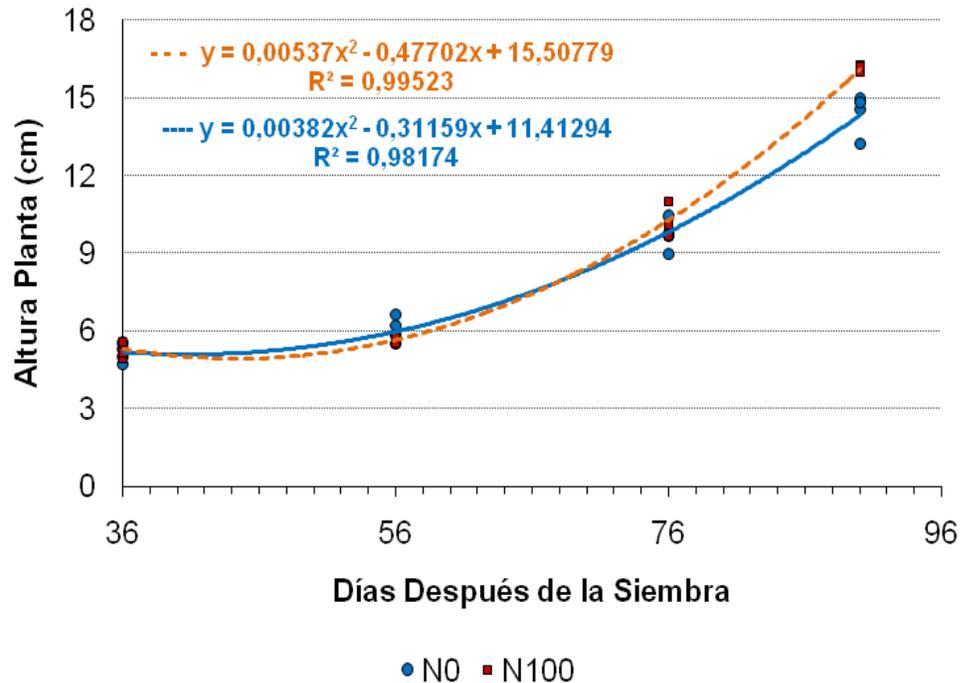


Figura 19. Efecto de la aplicación de nitrógeno en la altura de planta de lechuga desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha.

4.7.2. Cobertura foliar

Para el periodo de los 36 días después de la siembra (DDS) a cosecha, la cobertura foliar con aplicación de 100 kg N ha^{-1} (N100) mostró una tendencia exponencial; en tanto que el nivel 0 kg N ha^{-1} (N0) también presentó similar tendencia que N100 (Figura 20). La cobertura vegetal de una planta de lechuga hasta los 56 DDS fue similar para N100 y N0; posteriormente hasta la cosecha mostró valores superiores con N100 con respecto a N0. La cobertura foliar más alta se apreció en la cosecha, tanto para N100 como para N0 y cuyos valores fueron $385,3$ y $280,7 \text{ cm}^2$, respectivamente. La mayor cobertura foliar posterior a los 56 DDS con aplicación de N2 se debió probablemente a una mayor disponibilidad de este nutriente en el suelo lo que se tradujo en una mayor absorción por la planta y consecuentemente influyó en el crecimiento; al respecto Rodríguez (1991) señala que el nitrógeno estimula el aumento del número y tamaño de las células foliares.

En lechuga los trabajos de investigación han estado concentrados en evaluación de área foliar y no así en cobertura vegetal, en este ámbito, Carranza *et al.* (2009) obtuvo una tendencia exponencial para área foliar en un suelo de textura franca con 5,59 de pH, 0,35 % de nitrógeno; 27,8 meq/100 g de C.I.C. y 2,16 dS m⁻¹ de conductividad eléctrica. Dicha tendencia fue similar al obtenido en la investigación para cobertura foliar.

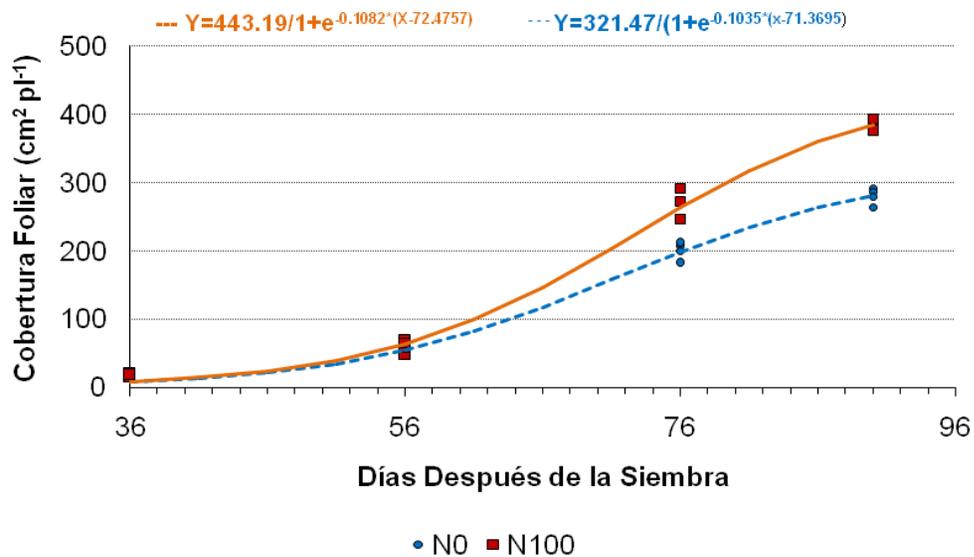


Figura 20. Influencia de la aplicación de nitrógeno en cobertura vegetal de lechuga durante el periodo de los 36 días después de la siembra a cosecha.

4.7.3. Materia fresca

La aplicación de 100 kg de N ha⁻¹ (N100) como el nivel 0 kg de N ha⁻¹ (N0) durante el periodo de 36 a 90 días después de la siembra, en materia fresca mostraron una tendencia cubica (Figura 21). La producción de materia fresca hasta los 60 DDS fue similar para N100 y N0; posteriormente hasta los 90 DDS, la materia fresca fue superior con la aplicación de N100 con relación a N0. La máxima producción de materia fresca tanto para N100 como para N0 se obtuvo a los 90 DDS (19.157 y 14.148 kg ha⁻¹).

La mayor producción de materia fresca con aplicación de nitrógeno se debió según Filgueira (2003) citado por De Almeida et al. (2011) a que el nutriente mencionado favorece el crecimiento vegetativo, la acumulación de masa, aumento de área foliar y consecuentemente en la expresión del potencial productivo del cultivo.

Datos de materia fresca de lechuga cultivar Dolly de un ciclo de 78 días de INIA (1994) citado por Galvan et al. (2008) se ajustó a un modelo polinomial cubica al igual que el obtenido en el presente trabajo de investigación.

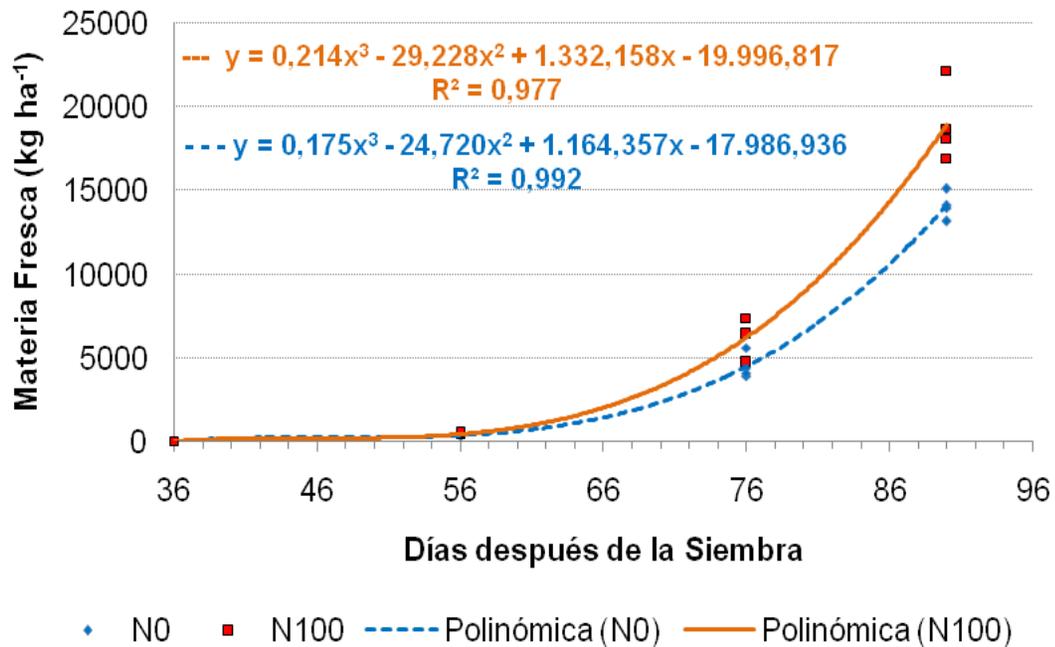


Figura 21 Efecto de nitrógeno en materia fresca de lechuga desde los 36 días después de la siembra a cosecha

4.7.4. Materia Seca

Los datos referentes al periodo de los 36 DDS a cosecha de materia seca con aplicación de 100 kg N ha⁻¹ mostró una tendencia polinomial cubica; en tanto que el nivel 0 kg N ha⁻¹ (N0) también presentó similar tendencia que N100 (Figura 22). La materia seca hasta los 56 DDS fue similar para N100 y N0; posteriormente hasta la cosecha se presentó valores superiores con N100 con respecto a N0. La materia seca

más alta se evidenció en la cosecha, tanto para N100 como para N0 y cuyos valores fueron 1.600 y 1.200 kg ha⁻¹, respectivamente.

Rincón *et al.* (2002) obtuvo respuesta hasta la aplicación de 100 kg ha⁻¹ para materia seca con una producción máxima de 3.500 kg ha⁻¹, este resultado es superior al obtenido en el estudio probablemente se debió a que utilizaron lechuga iceberg variedad Coolguard y el ciclo de la misma fue de 109 días desde la siembra a cosecha. En dicha investigación se probó cinco niveles de fertilización nitrogenada (25, 50, 100, 150 y 200 kg ha⁻¹); se realizó en un suelo de textura franco-arcillosa; con 1,26 % de contenido de materia orgánica; 19,75 meq/100 g de suelo de C.I.C y 77 ppm de P (Olsen).

Doerge *et al.* (s.f.) también encontró respuesta hasta la aplicación de 120 kg de N ha⁻¹ cuando investigó el efecto de tres niveles de fertilización nitrogenada (35, 120 y 205 kg N ha⁻¹), donde la producción máxima fue 2.350 kg ha⁻¹; el cual es superior al obtenido en la investigación, ello se debe a que el ciclo del cultivo fue de 129 días después de la siembra y la variedad utilizada Waldmann's.

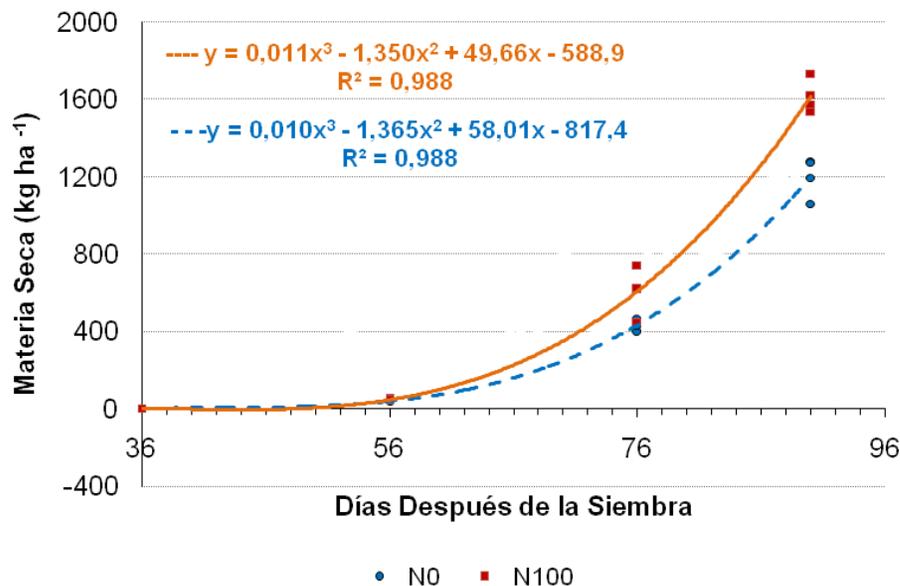


Figura 22. Efecto de nitrógeno en materia seca de lechuga desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha

4.7.5. Relación materia seca y cobertura foliar

La materia seca incrementó en forma lineal a medida que se incrementó la cobertura vegetal (Figura 23), lo que significa que por cada incremento de 100 cm^2 de cobertura foliar de una planta de lechuga se aprecia un aumento de $4,4 \text{ g}$ de materia seca por planta. Lo cual se atribuye a la expansión de las hojas y aumento de número de hojas durante el crecimiento del cultivo de lechuga.

Flores *et al.* (2010) encontró similar tendencia entre área foliar y biomasa aérea seca, es decir a mayor área foliar mayor producción de materia seca; dicho estudio se realizó en condiciones de invernadero, producción en bolsas, riego por goteo, variedad Coolguard MI Seminis de lechuga y cuatro niveles de nitrógeno ($5, 10, 15$ y 20 meq l^{-1}).

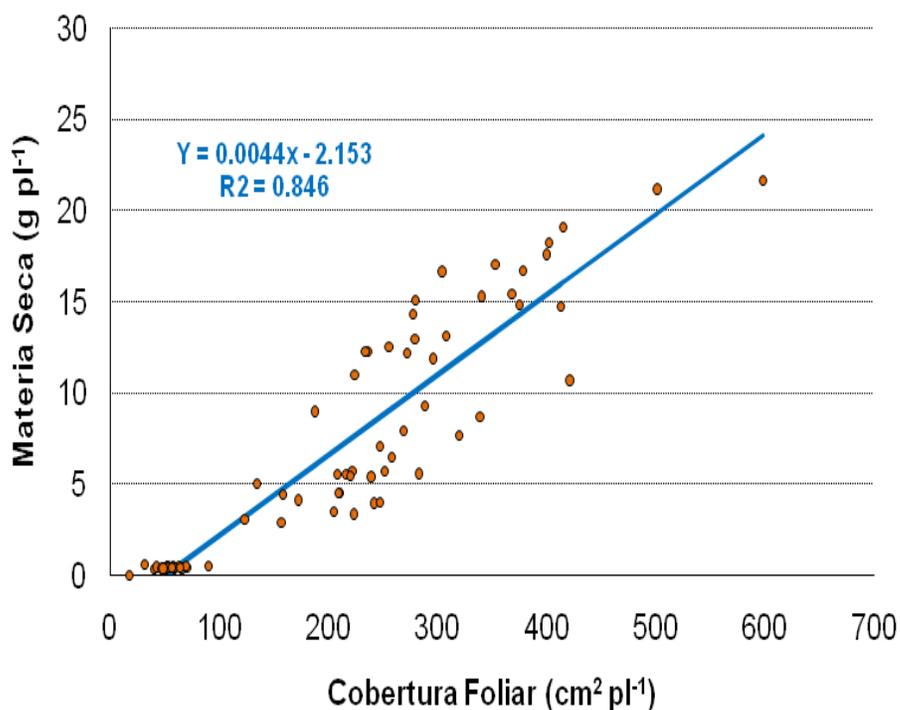


Figura 23. Relación de materia seca y cobertura foliar en lechuga

4.7.6. Rendimiento total y comercial

La prueba de Tukey mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre la aplicación de 100 kg de N ha^{-1} (N100) y el nivel sin aplicación de nitrógeno (N0) para rendimiento total y comercial (Figura 24). La aplicación de nitrógeno N100 presentó mayor rendimiento total y comercial en comparación a N0 con incrementos de 34,66 % y 31,06 % respectivamente. En investigaciones realizadas por Porto (2006) y Resende *et al.* (2012) con aportes de nitrógeno al suelo obtuvieron respuesta cuadrática para rendimiento con los valores más altos (381,91 y 537,0 g pl^{-1}) con la aplicación de 94,48 y 66,46 kg N ha^{-1} ; mientras que Araujo *et al.* (2010) tuvo una respuesta lineal decreciente, donde el rendimiento más alto correspondió al testigo. De acuerdo a los trabajos de investigación revisados, al parecer la respuesta a nitrógeno cuando se utiliza como fuente urea influye el pH, materia orgánica, nitrógeno disponible; y la forma de su aplicación (fertirriego, diluido en agua, incorporado y superficial). En los trabajos de los autores mencionados la respuesta de tendencia lineal decreciente para rendimiento se presentó en condiciones de ambiente protegido en suelo con pH 5,3 y aplicación del nitrógeno en fertirriego, mientras la tendencia cuadrática se obtuvo en suelos pH 5,92 y no indica la forma de aplicación del fertilizante y con pH 6,0 y el nitrógeno aplicado en cobertura diluido en agua. En condiciones de suelos alcalinos pH 8,2 se logró un rendimiento de 15.000 kg ha^{-1} con 200 kg N ha^{-1} (fraccionado en dos oportunidades y en tres oportunidades) y 3.870 kg ha^{-1} con el testigo (Gutiérrez, 1990).

Los rendimientos total y comercial obtenidos en la investigación fueron superiores a la media nacional de 8.830 kg ha^{-1} (INE y MDRyT, 2008), probablemente ello se debió al manejo que se realizó al cultivo.

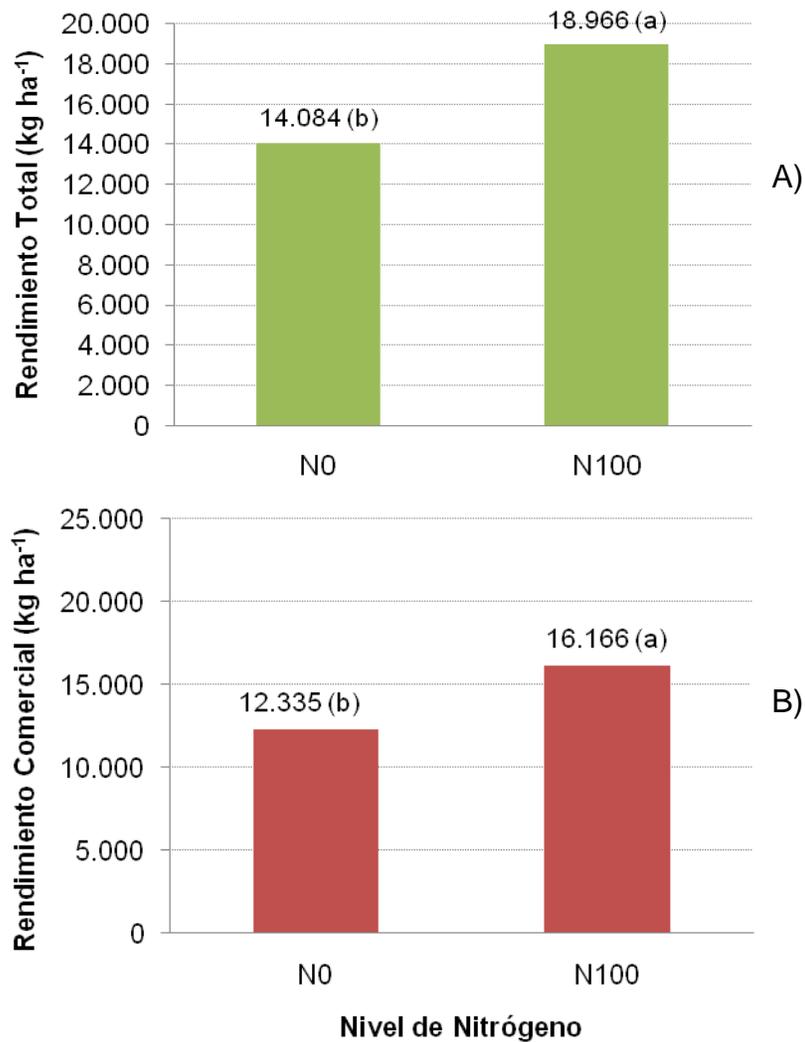


Figura 24. Efecto de niveles de nitrógeno en rendimiento total (A) y comercial (B) de lechuga. Las letras (a) y (b) sobre las barras indican diferencias estadísticas entre sí ($p \leq 0.05$) según la prueba de Tukey.

4.7.7. Número de hojas

El número de hojas no presentó diferencias estadísticas para los factores de estrategias de reposición de agua y nitrógeno ni la interacción de los mismos (Tabla 5). En promedio una planta de lechuga tuvo 25 hojas. La no influencia de la aplicación de nitrógeno en esta variable probablemente se debió a que el contenido de nitrógeno

total del suelo antes del trasplante de la lechuga se encontraba en 0,224 % y que es considerado alto por Villarroel (1988). En lo que respecta a la reposición de agua probablemente no hubo respuesta debido a que la humedad del suelo se mantuvo próximo a la capacidad de campo en cada uno de los tratamientos como se puede apreciar en la Figura 7; en trabajos de investigación con enfoque diferente de aplicación de riego algunos autores como De Lima (2007) obtuvo similares resultados con laminas de riego (120,5; 103,5; 104,1; 90,0 y 78,3 mm) y atribuye los mismos a una cosecha anticipada a los 34 días después del trasplante.

5. CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en el trabajo realizado se llegó a las siguientes conclusiones:

- Con aplicaciones de las estrategias de reposición de agua al suelo R2, R3 y R4 hubo un ahorro de agua de 11,02; 11,40 y 12,40 mm con respecto a R1 (Reposición de agua al 100 % de Déficit Permitido de Manejo (DPM) desde los 36 días después de la siembra hasta la cosecha.
- No tuvo efecto la aplicación de estrategias de reposición de agua al suelo ni sus interacciones con nitrógeno y evaluaciones en exportación de nitrógeno, tenor de nitrógeno, altura planta, numero de hojas, cobertura foliar, materia fresca, materia seca, rendimiento total y rendimiento comercial.
- No influyó la aplicación de estrategias de reposición de agua al suelo en las variables: rendimiento total/volumen de agua, rendimiento comercial/volumen de agua, materia seca/volumen de agua y exportación de nitrógeno/volumen de agua; los cuales en promedio mostraron lo siguiente: Rendimiento/volumen de agua = 8,36 g/l/pl., rendimiento comercial/volumen de agua = 7,34 g/l/pl., materia seca/volumen de agua = 0,70 g/l/pl y exportación de nitrógeno/volumen de agua = 0,0141 g/l/pl.
- Con aplicación de 100 kg de nitrógeno ha^{-1} hubo mayor exportación de nitrógeno, producción de materia seca y fresca, cobertura foliar, altura planta, rendimiento total y comercial.
- La evaluación desde 36 a 90 días después de la siembra, tanto para 100 kg de nitrógeno ha^{-1} como para 0 kg de nitrógeno ha^{-1} presentó tendencia: i) Cuadrática decreciente para tenor de nitrógeno, ii) Polinomial cuadrática para

altura planta, iii) Polinomial cubica para exportación de nitrógeno, materia fresca y materia seca y iv) Exponencial-sigmoide para cobertura foliar.

- La relación entre cobertura foliar y exportación de nitrógeno al igual que para cobertura foliar y materia seca fueron de tendencia lineal, lo cual significa que la exportación de nitrógeno o materia seca incrementa a medida que incrementa la cobertura foliar.
- El número de hojas no fue afectada por aplicación de nitrógeno ni las estrategias de reposición de agua al suelo.

6. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos y observación durante la implementación y conducción del experimento se recomienda:

- Continuar con las investigaciones de estrategias de reposición de agua al suelo en condiciones de ambiente protegido (Invernadero y carpas solares) y por épocas de siembra, no solo de lechuga sino también en otros cultivos, por cuanto al controlar en su totalidad la influencia de la precipitación es posible que se encuentre su efecto en la exportación de nitrógeno y en las variables agronómicas.
- Extender las investigaciones de exportación de nutrientes y también de extracción de nutrientes a otros cultivos hortícolas, tubérculos, raíces, cereales y otros para diseñar programas de fertilización que contribuyan de manera significativa al incremento de los rendimientos por cuanto los mimos son los más bajos en el país en comparación a los obtenidos por los países vecinos.
- Diseñar e implementar trabajos de investigación que relacione la aplicación de diferentes métodos de riego con estrategias que reduzcan la cantidad de agua con respecto al óptimo requerido en ciertas fases fenológicas o de crecimiento del cultivo con el propósito de reducir la cantidad de agua sin afectar los rendimientos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera A., J. 2012. Fertilidad y nutrición vegetal avanzada. La Paz, Bolivia. 81 diapositivas, color.
- Alcobendas C., P.J.; Moreno V., M.M. s.f. Necesidades de riego de los cultivos. [s.l.]. 34 diapositivas, color.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo; Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO. 298 p.
- Andrade R., O. 2001. Evaluación cualitativa de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa*) con tres niveles de fertilización bajo invernadero rustico en la comunidad de Lagunita. Facultad de Agronomía; Universidad Mayor de San Andrés. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en www.iniaf.gob.bo.
- Arce L., A. 2013 a. Apuntes de agricultura bajo riego. 2013. 25 diapositivas, color.
- Araújo F., W.; Santos Do Sousa T., K.; Viana V., T.; De Azevedo M., B.; Barros M., M.; Marcolino, E. 2011. Resposta da alfase a adubacao nitrogenada. Revista Agroambiente On-line 5(1): 12-17.
- Aruani, M.C.; Gili, P.; Fernandez, L.; Gonzales J., R.; Reeb, P.; Sanchez, E. 2008. Utilización del nitrógeno en diferentes manejos de fertilización en lechuga (*Lactuca sativa* L.) y su efecto sobre algunas variables biológicas del suelo, Neuquen-Argentina. AGRO SUR no 36 (3):147-157.
- Bandeira, G.; Pinto D.S., H.C.; Magalhaes S., P.; Aragao A., C.; De Queiroz, S.; Souza R., E.; Seido L., S. 2011. Manejo de irrigacao para cultivo de alfase em ambiente protegido. Horticultura Brasileira. Consultado 16 ene. 2015. Disponible en http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362011000200018&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

- Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, C.R: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 157 p.
- Briceño, M.; Álvarez, F.; Barahona, U. 2012. Manual de riego y drenaje. Honduras: Secretaria de Educación; Zamorano; PROMIPAC. 115 p.
- Calzada B., J. 1970. Métodos Estadísticos para la Investigación. 644 p.
- Campero M., S.A. 2014. Balance hídrico, las condiciones de humedad, y condición climática de 124 estaciones meteorológicas. Ministerio de Medio Ambiente y Agua; Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. 511 p.
- Carranza, C.; Lancho, O.; Miranda, D.; Chaves, B. 2009. Análisis de crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) 'Batavia' cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. Agronomía Colombiana 27(1): 41-48.
- Carrasco, G.; Izquierdo, J. 1996. Manual técnico la empresa hidropónica de media escala; la técnica de la solución nutritiva recirculante (NFT). Chile: Universidad de Talca. 62 p.
- Casaca, A. D. 2005. El cultivo de Lechuga (*Lactuca sativa*) 12. [s.l.]: Secretaria de Agricultura y Ganadería. 10 p.
- Cavalcante D.S., A. S. 2008. Producao organica de alfase em diferentes épocas de plantio, preparo e coberturas de solo no Estado do Acre. Dissertacao Mestrado em Producao Vegetal, Rio Branco, Brasil: Universidade Federal do Acre. 62 p.
- CNPSH (Centro Nacional de Producción de Semillas de Hortalizas. s.f. Presentación de variedades. Sipe Sipe, [Bolivia]: JICA. 23 p.
- Chipana R., R.; Serrano C., G. 2007. Riego subsuperficial en lechuga (*Lactuca sativa*) y nabo (*Brasica pappus*) en las zonas bajas del altiplano Boliviano: Consumo de agua. México: Red Iberoamérica de Riegos del Programa CYTED, 14(3):169-175.

- _____, s.f. Estrategia ancestral del manejo del agua en las zonas bajas del altiplano boliviano: Consumo de agua. Disponible en: http://ceer.isa.utl.pt/cyted/mexico2006/tema%201/4_RChipana_Bolivia.pdf
- Cometi N., N. 2003. Nutricao mineral da alfase (*Lactuca sativa* L.) en cultura hidropónica-sistema NFT. Tesis (Ph. D). Brasil. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 106 p.
- Cordova C., K.J. 2001. Efectos de la fertilización orgánica en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L) bajo condiciones de semisombra. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias; Universidad Mayor de San Simón. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en www.iniaf.gob.bo.
- Cun G., R.; Duarte D., C.; Montero SJ., L. 2012. Influencia de diferentes niveles de humedad del suelo en el cultivo de la lechuga en condiciones de organoponico en la Habana. Consultado 16 ene 2015. Disponible en http://www.chapingo.mx/dima/revista/Vol_2_n_2_2012/pdf/IA10212.pdf
- De Aquino, L. A.; Puiatti, M.; Abaurre E., M.; Cecon R., P.; Pereira R., Paulo; Pereira H., F.; Castro R., M. 2007. Produção de biomassa, acúmulo de nitrato, teores e exportação de macronutrientes da alface sob sombreamento. Consultado 19 dic. 2014. Disponible en <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sciarttext&pid=S0102-05362007000300012&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>
- De Almeida F., T. B.; De Mello Prado, R.; Correia R., M. A.; Puga P., A.; Barbosa, J.C. 2011. Avaliacao nutricional da alfase cultivada em solucoes nutritivas suprimidas de macronutrientes. *Biotemas*, 24 (2): 27-36.
- De Lima E., M. 2007. Avaliação do desempenho da cultura da alfase (*Lactuca sativa*) cultivada em sistema organico de produção, sob diferentes laminas de irrigação e coberturas do solo. Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências; Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Br. 77 p.

- Doerge, T.A.; Pritchard, K.H.; McCreary, T.W. s.f. Nitrogen management in drip Irrigated leaf Lettuce, spinach and greens crops. Consultado 22 dic. 2014. Disponible: <http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/214500/1/370093-032-061.pdf>
- Dos Santos P., C.A. 2011. Producao da alfase crespa e umidade do solo em funcao de diferentes fontes de materia organica e cobertura do solo. Dissertacao para Mestre em Agroecossistemas. Sergipe, Brasil: Universidad Federal de Sergipe. 52 p.
- Dreccer, M.F.; Ruiz, R.A.; Maddonni, G.A.; Satorre, E.H. 2010. Bases ecofisiologicas de la nutrición en los cultivos de grano. In: Satorre, E.H.; Benech A., R. L.; Slafer, G.A.; De la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. Producción de granos, bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina: Facultad de Agronomía. pp. 479-497.
- Escarabajal H., D.; Molina M., J.M.; Truque R., E.; Ruiz P., L.; Ruiz C., A. 2013. Modelización del crecimiento de lechuga Litle Gem para su aplicación en gestión de riego. In Congreso Iberico de Agroingenieria y Ciencias Hortícolas (VII, 26-29 ago, Madrid). Consultado, 12 feb. 2015. Disponible: <http://sechaging-madrid2013.org/geystiona/adjs/comunicaciones/272/C02540001.pdf>.
- Faquin, V. 2002. Diagnose do estado nutricional das plantas. [s.l.]: Universidade Federal de Lavras – UFLA. 77 p.
- Faquin, V.; Andrade T., A. 2004. Nutricao mineral e diagnose do estado nutricional das hortalias. Lavras: UFLA/FAEPE. 88 p.
- Fernandez G., R.; Avila A., R.; Lopez R., M.; Gavilan Z., P.; Oyonate G., N.A. 2010. Manual de Riego para los agricultores; Modulo 1: Fundamentos Del Riego – manual y ejercicios. Sevilla, España: Consejería de Agricultura y Pesca. 99 p.

- Ferreira F., A.; De Oliveira C., A.R.; De Santana, M.J. 2010. Reposicao de agua no solo e turno de rega no cultivo da alfase americana. Consultado 10 dic. 2014. Disponible en <http://200.131.48.3/virtualif/SPES/visao/indexParticipante.php>
- Flores G., R. 2008. Evaluación de cuatro productos orgánicos a dos dosis de aplicación en el control de pulgones (*Mizus persicae*) en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*). Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias; Universidad Mayor de San Simón. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en www.iniaf.gob.bo.
- Flores M., A.; Miranda F., R.A.; Galvis S., A.; Mendoza H., M.T.; Ramos E., G. 2010. Estudio sobre el requerimiento interno de nitrógeno en lechuga (*Lactuca sativa*). Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente, 10(19): 83-100.
- Franco N., A. A. 2011. Marcha de absorção e acumulo de nutrientes na cultura de sorgo. Dissertacao apresentada para obtenção de Mestre; Minas Gerais, Brasil: Universidad Estadual de Montes Claros. 74 p.
- Gabieiro M., D.; Dias C., A.S.; Moura R., B.; Mantovani CH., E.; Santos, I.C. s.f. Metodos de manejo da irrigacao na cultura da alfase em ambientes protegidos e nao protegido. s.p.
- Galbiatti, J.A.; Cavalcante L., I.H.; Ribeiro, A.G.; Cavalcante B., M.Z. 2007. Fertilizacao e qualidade da agua de irrigacao no crecimiento e desenvolvimento da alfase. Scientia Agraria, 8(2): 185-192.
- Galvan, G.; Garcia, M.; Rodríguez, J. 2008. Lechuga; cultivos de hoja. 43 diapositivas, color.
- García L., M. 2003. Efecto de los caldos microbiológicos en la producción orgánica de lechuga (*Lactuca Sativa* L.) en la localidad de Sacaba, zona Arocagua. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias; Universidad Mayor de San Simón. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en www.iniaf.gob.bo.
- Gomez P., F. 1984. A estadística moderna na pesquisa agropecuaria. POTAFOS. 160 p.

- GRASSO, R.; MUGUIRO, A.; FERRATTO, J.; MONDINO, M.C.; LONGO, A. 2006. Manual de Tecnologías de Producción Hortícola. [s.l.]: CERET; CEFEL. 84 p.
- Gutiérrez R., E. 1990. Aplicación fraccionada de nitrógeno y gallinaza en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*). Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias – UMSS. Revista de Agricultura, 47(16). pp 31-36.
- Guzmán R., J.D. 2011. Riego de precisión y su aplicación en una maquina de riego de avance frontal. Tesis (Ing. Mec.). Mexico. Universidad Autónoma Chapingo. 118 p.
- Jardín L., Y. G. 2002. Control preventivo con productos naturales y químicos en la producción de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa*). Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias; Universidad Mayor de San Simón. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en www.iniaf.gob.bo.
- Jordan L., A. 2006. Manual de edafología. [s.l.]. 143 p.
- Hernández S., R.; Fernández C., C.; Baptista L., M. 2010. Metodología de la Investigación. 5 ed. México, D.F. pp. 83-85.
- INE (Instituto Nacional de Estadística); MDRyT (Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras). 2009. Encuesta Nacional Agropecuaria 2008. La Paz, Bo. 461 p.
- INIAF (Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal). s.f. Hortalizas mujukuna valle de oro. Cochabamba, Bo. s.p.
- INLASA. 2005. Tabla boliviana de composición de alimentos. Ministerio de Salud y Deportes. La Paz, Bolivia. pp 21-22.
- Intipampa L., A.J. Evaluación del comportamiento agronómico de tres cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en dos comunidades del municipio de Caranavi de La Paz. Tesis (Ing. Agr.). La Paz, Bolivia. Facultas de Agronomía; Universidad Mayor de San Andrés. 86 p.

- Kuslu, Y.; Dursun, A.; Sahini, U.; Kiziloglu, F.M.; Turan, M. 2008. Effect of deficit irrigation on curly lettuce grown under semiarid conditions. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentación (INIA). Spanish Journal of Agricultural Research 2008 6(4): 714-717.
- Lousa, M.; Monteiro, A.; Espirito Santo, D.; Sousa, E. Modulo de botanica; Manual de teoría e practicas. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia, Universidade Tecnica de Lisboa. 144 p.
- Luna R.; M. C. 2012. Influencia de los factores pre y postcosecha en la calidad de la lechuga iv gama. Tesis (Dr.). [s.l.]: Facultad de Veterinaria, Universidad de Murcia. 277 p.
- Mamani E., G. 2010. Evaluación del efecto del humus del lombriz en el cultivo organopónico de la lechuga (*Lactuca sativa* L.). Tesis (Ing. Agr.). Bolivia. Facultad de Agronomía; Universidad Mayor de San Andrés. 80 p.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). 2012. Situación y desafíos del sector riego en Bolivia. In: 3er Congreso Boliviano de Riego y Drenaje. 19 diapositivas a color.
- Montesdeoca P., N. 2009. caracterización física, química y funcional de la lechuga rizada (*Lactuca sativa* variedad crispera), para la creación de una norma técnica ecuatoriana, por parte del instituto ecuatoriano de normalización, 2008. Tesis (Ing. Al.). Ecuador: Facultad de Ciencias de la Ingeniería/UTE. 164 p.
- Nagaz, K.; El Monkh, F.; Moncef M., M.; Ben M., N. 2013. Soil salinity, yield and water productivity of lettuce under irrigation regimes with saline water in arid conditions of Tunisia. International Journal of Agronomy and Plant Production 4(5): 892-900.
- Nebel, B.J.; Wright, R.T. 1999. Ciencias Ambientales; Ecología y desarrollo sostenible. Trad. F. J. Dávila. 6ª. ed. México: Prentice Hall, Pearson y Addison Wesley Longman. 698 p.

- Paulino D., A.; De Figueiredo P., F.; Vieira D., E.; Fernandes C., R.; Maia L.S., J.T.; Guilherme, D.O., D. 2009. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada: 3(1). Consultado 5 mar. 2015. Disponible en http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/viewFile/17/pdf_11.
- Pérez L., J.M. 2011. Manual para determinar la calidad de agua para riego agrícola. Trabajo de Experiencia Recepcional. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana. 41 p.
- Plan de Desarrollo Integral de Tiquipaya 2007/2011. s.f. Descripción general del municipio de Tiquipaya y diagnostico socioeconómico e institucional. s.l. 391 p.
- Porto L., M. 2006. Producao, estado nutricional e acumulo de nitrato em plantas de alface submetidas a abucaao nitrogenada e organica. Dissertacao para obtencao do titulo de Mestre em Agronomia. Paraiba, Brasil: Universidad Federal da Paraiba. 65 p.
- Reglamento (UE) No 1258/2011 de la Comision de 2 Diciembre de 2011 que Modifica el Reglamento (CE) No 1881/2006 por lo que respecta al Contenido Maximo de Nitratos en los Productos Alimenticios. Diario Oficial de la Union Europea.
- Resende, G.M.; Alvarenga R., M.A.; yuri, J.E.; De Souza, R.J. 2010. Rendimento e teores de macronutrientes em alfase amaricana em funcao de doses de nitrogenio e molibdenio. Victoria Da Conquista, Brasil: Horticultura Brasileira 30(3). Consultado 16 ene. 2015. Disponible en http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362012000300003&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt
- Rincón, L.R.; Pérez C., A.; Pellicer B., C. 2002. Influencia de la fertilización nitrogenada en la absorción de nitrógeno y acumulación de nitratos en la lechuga iceberg. Prod. Prot. Veg. 17 (2): 303-318.

- Rincon S. L. s.f. La fertirrigación de la lechuga iceberg. [s.l.]: Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agroalimentario; Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. 183 p.
- Rodríguez A., M.E. 2001. Comparación de tres métodos de cultivo con tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa*). Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias; Universidad Mayor de San Simón. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en www.iniaf.gob.bo.
- Rodríguez R., M. 1991. Fisiología vegetal. Cochabamba: Los Amigos del Libro. 425 p.
- Rojas Z., L.F. 2007. Efecto de diferentes lombrihumus en el cultivo orgánico de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en la localidad de tiquipaya. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias; Universidad Mayor de San Simón. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en www.iniaf.gob.bo.
- Sandi M., V. 2014. La investigación aplicada y básica/pura en el Instituto Centroamericano de Administración Pública, ICAP: Un acercamiento para la discusión. San José, Costa Rica. Instituto Centroamericano de Administración Pública. pp. 3-5.
- Serrano C., G. s.f. Ingeniería del Riego y Drenaje. La Paz, Bolivia. 133 p.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). [En línea]. Bolivia. Consultado 3 feb. 2015. Disponible en www.senamhi.gob.bo.
- Silva C., P.; Acevedo H., E.; Silva R., H. 2000. Laboratorio relación suelo-agua-planta; Manual de estudio y ejercicios. Chile: Universidad de Chile. 56 p.
- Soratto P., R.; Fernandes M., A.; Schlick S.; G.D. 2011. Extracao e exportacao de nutrientes em cultivares de batata: II Micronutrientes. Revista Brasileira Ciencia . Solo 35:2057-2071.

- Tam M., J.; Vera, G.; Oliveros R., R. 2008. Tipos, métodos y estrategias de investigación científica. *Revista de la Escuela de Posgrado* 5:145-154.
- Valadez L., A. 1998. Producción de hortalizas. México, D.F: LIMUSA. 298 p.
- Valdez M., F.E. 2008. Efecto de fertirrigación en el comportamiento agronómico de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo ambiente atermperado en la localidad de Viacha. Tesis (Ing. Agr.). Bolivia. Facultad de Agronomic; Universidad Mayor de San Andres. 75 p.
- Vavilov, N.I. 1951. The origin, variation, breeding and inmunity of cultivated plants. Trad. F. Freier. Buenos Aires: Acne Agency. 39 p.
- Velasco A., J. 2007. Evaluación de biofertilizantes orgánicos en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) Var. Crespa, bajo el sistema hidropónico en la Tamborada. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias; Universidad Mayor de San Simón. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en www.iniaf.gob.bo.
- Veraguas S., S. 2007. Avaliacao de cultivares de alfase crespa producidas en hidroponía tipo nft en dos ambientes protegidos em ribeirao preto. Tese (Mestrado). Brasil. Facultade de Ciencias Agrarias e Veterinarias Campus de Jaboticabal; Universidade Estadual Paulista. 48 p.
- Vieira, T.A.; Santana, M.J.; Biulchi, P.A.; Vasconcelos, R.F. s.f. Métodos de manejo da irrigação no cultivo da alface americana. [s.f.]. Consultado 5 mar. 2015. Disponible en http://www.iftm.edu.br/SITES/proreitorias/pesquisa/revista/pdf/Resumo_20.pdf.
- Villafafila, E.; Wyss, F. 2009. Riego en horticultura; Guia para la instalación de pequeños sistemas de riego. [s.l.]: INTA. 48 p.
- Villarroel R., J. 1988. Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos en laboratorio. AGRUCO (Cochabamba, Bo.). Serie Técnica no. 10. 34 p.

Urey G., G. 2007. Evaluación de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa*) en el sistema hidropónico recirculante NFG. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias; Universidad Mayor de San Simón. Consultado 20 jun. 2013. Disponible en www.iniaf.gob.bo.

ANEXOS

Anexo 1. Ecuación de FAO Penman Monteith para estimar Evapotranspiración de referencia (ET_o)

$$ET_o = (0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma (900/T + 273) u_2 (e_s - e_a)) / (\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2))$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

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

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

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

u₂ = Velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s = Presión de vapor de saturación (k Pa)

e_a = Presión real de vapor (kPa)

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

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

γ = Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

Anexo 2. Evapotranspiración de referencia obtenida mediante el método FAO Penman Monteith

Mes	Día	ET _o (mm día ⁻¹)	Mes	Día	ET _o (mm día ⁻¹)	Mes	Día	ET _o (mm día ⁻¹)
Sept			Oct	1	2,91	Nov	1	4,71
				2	3,42		2	3,49
				3	4,56		3	6,32
				4	5,05		4	5,78
				5	5,83		5	5,87
				6	3,01		6	5,96
				7	4,94		7	6,11
				8	5,06		8	5,21
				9	5,87		9	5,41
				10	4,56		10	4,88
				11	5,70		11	5,57
				12	6,00			
				13	5,87			
				14	5,97			
				15	6,27			
				16	6,24			
				17	5,60			
				18	6,37			
	19	5,47		19	5,51			
	20	4,62		20	3,85			

Mes	Día	ETo (mm dia-1)	Mes	Día	ETo (mm dia-1)	Mes	Día	ETo (mm dia-1)
	21	2,87		21	3,83			
	22	5,49		22	4,00			
	23	3,97		23	4,78			
	24	3,16		24	6,71			
	25	5,61		25	6,44			
	26	4,92		26	5,32			
	27	4,79		27	5,33			
	28	2,89		28	5,39			
	29	3,44		29	6,27			
	30	4,44		30	6,30			
				31	4,54			

$$ET_c = ETo * Kc$$



Anexo 3. Resultados de análisis químico de agua utilizada en la investigación

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON
FAC. de CS. AGRICOLAS y PECUARIAS
"Martín Cárdenas"
Dpto. Ingeniería Agrícola

LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS

ANALISIS QUIMICO DE AGUAS
Calidad de Agua para Riego



Interesado: RAYMUNDO ILDON MONTAÑO
Proyecto: Estudio Esportación de Nitrógeno en Lechuga
Procedencia: Linde - Municipio Tiquipaya.

Nº. LAB		207			
Identificación		Agua			
Fuente		pozo			
pH		6,5			
C.E. micromhos/cm		836			
CATIONES me/lt	Ca ⁺⁺	4,50			
	Mg ⁺⁺	3,50			
	Na ⁺	2,00			
	K ⁺	0,06			
ANIONES me/lt	CO ₃ ⁼	0,00			
	HCO ₃ ⁼	4,60			
	Cl ⁻	3,50			
	SO ₄ ⁼	1,96			
Boro ppm					
S.E me/lt		5,46			
S.P. me/lt		4,48			
RAS		1,000			
P.S.S.		19,9			
Indice de Magnesio %		43,8			
C.S.R. me/lt		0,00			
Sólidos disueltos g/lt		0,65			
Sólidos totales g/lt		0,79			
CLASE *		C2-S1			

S.E: Salinidad efectiva

S.P: Salinidad potencial

RAS: Relación de Adsorción de Sodio

PSS: Porcentaje de Sodio Soluble

CSR: Carbonato de Sodio Residual

* = según RICHARDS, 1954 (U.S. Salinity Laboratory), modificada por el Comité de Consultores Universidad California 1972, (Riverside, California).

Fecha: Cbba., Agosto de 2014.

Dir. Av. Petrolera Km 4,5 Tel. 4237506-FAX 4762385 Cbba.
Email: lab.suelos@agr.umss.edu.bo

Ing. *Alfredo* *Verdes*
JEFE TEC. de ANALISIS y CALIDAD
LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS
F. C. A. y P. UMSS



Anexo 4. Resultados de análisis químico y físico de suelo del sitio de la investigación

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON
FAC. de CIENCIAS AGRICOLAS y PECUARIAS
"Martín Cárdenas"
Dpto. de Ingeniería Agrícola

Laboratorio de Suelos y Aguas

ANALISIS FISICO-QUIMICO DE SUELOS



Interesado: RAYMUNDO ILDON MONTAÑO
Proyecto: Estudio Esportación de Nitrógeno en Lechuga
Procedencia: Linde - Municipio Tiquipaya.

Nº. LAB.		649		
Identificación		suelo		
Prof.	cm	0-20		
TEXTURA		F		
% Arcilla		27		
% Limo		38		
% Arena		35		
Densidad Aparente	g/cm ³	1,22		
%Capacidad de Campo	0,33 Bar	22,2		
% Pto. Marchitez Permanente	15 Bar	12,15		
% Agua Aprovechable		10,05		
pH 1:2,5 (suelo-agua)		7,3		
C.E Milimhos/cm 1:2:5 (suelo/agua)		1,238		
Cationes Intercambiables me/100 g	Calcio	13,0		
	Magnesio	5,5		
	Sodio	0,96		
	Potasio	0,73		
T.B.I	me/100g	20,19		
C.I.C.	me/100g	16,4		
% Saturación de Bases		100,0		
Materia Orgánica	%	5,27		
Nitrógeno total (Nt)	%	0,224		
Fósforo disponible **	ppm	11,3		
Relación C:N				

C.E. = Conductividad eléctrica * Método: OLSEN modificado
TEXTURA: F = Franco; Y = Arcilla; L = Limo; A = Arena ** Método:
C.I.C. = Capacidad de intercambio catiónico
T.B.I. = Total de bases intercambiables

Fecha: Cbba., Septiembre de 2014

Dir. Avda. Petrolera Km 4,5 Tel.: 4237506-FAX: 4762385-Cbba.
Email: lab.suelos@agr.umss.edu.bo

Ing. Alfredo Caceres C.
JEFE TECNICO de ANALISIS y CALIDAD
LABORATORIO DE SUELOS y AGUAS
F.C.A. y P. UMSS



Anexo 5. Resumen de análisis de varianza para la relación rendimiento total/volumen de agua, materia seca/volumen de agua y exportación de nitrógeno/volumen de agua.

Fuentes de variación	G.L	Variables Dependientes		
		Rend. Total/Vol. Agua	Materia Seca/Vol. Agua	Export Nitrógeno/Vol. Agua
		Cuadrados Medios		
Repetición	2	20,89	0,06482138	0,00006176
Estrategia de Reposición de Agua (R)	3	1,55 (n.s.)	0,01073449 (n.s.)	0,00000112 (n.s.)
Error (a)	6	5,93	0,01876082	0,00001435
Nitrógeno (N)	1	46,51 **	0,25399838 **	0,00023940 **
R*N	3	1,32 (n.s.)	0,00323004 (n.s.)	0,00000753 (n.s.)
Error (b)	8	8,64	0,00275962	0,00000283
Coefficiente de Variación (%)				
a)		29,13	19,63	26,96
b)		12,44	7,53	11,98

Donde: ** altamente significativo a 1% y n.s. no significativo.