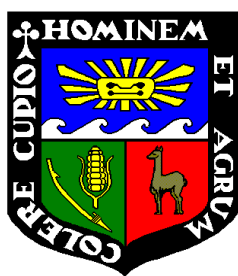


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN ANIMAL



**RESPUESTA DE PASTIZALES DE LA SIERRA CENTRAL
(JUNÍN) A CAMBIOS EN PATRONES DE PRECIPITACIÓN**

Presentado por:

PAUL FRANKLIN UNSIHUAY VILA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
PRODUCCIÓN ANIMAL**

Lima- Perú

2017

DEDICATORIA

Ante todo, agradecer a Dios por haberme dado la oportunidad de ser parte de este programa, a mis padres Franklin y Melina por ser mi apoyo, mis guías en cada paso de mi vida y fuente de inspiración, a mis hermanas por sus ánimos y acompañarme todo este tiempo, y por último a todos los profesores, personal técnico que me apoyaron y depositaron su confianza todo este tiempo.

AGRADECIMIENTO

La presente investigación se llevó a cabo gracias al Conejo nacional de Ciencias, Tecnología e innovación e innovación tecnológica y al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT), quienes me brindaron la oportunidad de participar de este programa y poder crecer profesionalmente. Mis agradecimientos a la Sociedad anónima de Interés Social (SAIS) Túpac Amaru por permitir desarrollar la investigación dentro de sus límites zonales. Otro especial agradecimiento al Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales (LEUP) por permitirme usar sus equipos, instrumentos, instalaciones y a todo el personal que labora allí por la amabilidad y predisposición mostrada a lo largo de estos 3 años. Un especial agradecimiento a la Ph.D. Lucrecia Aguirre Terrazas por su paciencia y su apoyo incondicional en todo momento, y otro agradecimiento especial a los Ph.D. Enrique Flores Mariazza por los conocimientos brindados a lo largo del maestría, y al Ph.D Javier Ñaupari por su gran dedicación a este programa y a cada uno de los que participamos en ella.

Así mismo, un agradecimiento especial a Edson Tito Quispe por su gran colaboración profesional y desinteresada en la toma de datos.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal estimar el impacto de los cambios en los patrones de precipitación sobre la estructura y funcionalidad del ecosistema de pastizal. El lugar donde se llevó a cabo la investigación fue la comunidad de Consac, distrito de Canchayllo, provincia de Jauja. Se simuló 2 niveles de disminución de precipitación, para lo cual se construyó los “rainout shelters”; interceptores de lluvia que constituirán los tratamientos a 3 niveles de intercepción de lluvia: 0, 30 y 70%. Con estos equipos, se evaluó la respuesta de la estructura florística del área y de los grupos funcionales a los cambios en los patrones de precipitación, así como los patrones de humedad y temperatura de suelo a una profundidad de 15 cm, además de la variación del vigor y la productividad de dos especies claves del ecosistema durante dos años de estudio.

Los resultados encontrados muestran la reducción de los patrones de precipitación analizados tuvieron un fuerte impacto en la relación porcentual de las gramíneas, gramínoideas y herbáceas, en los cuales se observó que el porcentaje de herbáceas disminuyó hasta casi un 50% ante un evento de sequía extrema (70% de intercepción) al finalizar el estudio respecto a las condiciones iniciales. Del mismo modo, observamos que los niveles de temperatura disminuyeron considerablemente en los dos eventos de sequía simulados, donde se observó temperaturas muy bajas de 6.3°C que tiene un gran impacto en la actividad metabólica de las plantas. Por otro lado, también se encontró que el vigor de las especies claves se vio fuertemente impactada por la reducción de las precipitaciones, lo cual se manifestó también en la productividad de biomasa aérea, que fue mucho menor en las unidades experimentales que tuvieron mayor intercepción de lluvias que en aquellas que recibieron la cantidad normal de precipitaciones. Estos resultados muestran que el estrés hídrico en los pastizales se manifestó tanto a nivel de grupos funcionales como a nivel de especies, lo cual induce a creer que ante un evento de sequía moderado a extremo, el ecosistema tardará en recuperar su estructura original y que solo aquellas especies que desarrollaron mecanismos de adaptación a las sequías podrán resistir los impactos del cambio climático.

PALABRAS CLAVES: Disminución de precipitación, rainout shelter, composición florística, temperatura de suelo, humedad de suelo, vigor, productividad.

ABSTRACT

This research aims to estimate the impact of changes in precipitation patterns on the structure and functionality of grassland ecosystems located in the community of Consac, district of Canchayllo, province of Jauja, Peru. Two levels of precipitation were simulated for which rainout shelters were constructed in order to simulate drought scenarios at three levels of rain interception: 0, 30 and 70%. During two years, response of floristic structure and functional groups to the changes in precipitation patterns were evaluated, as well as the soil moisture and temperature at 15 cm underground temporal variation, and vigor and productivity of two key ecosystem species evolution.

The results show that the reduction of rainfall patterns had high impact on the percentage relationship of graminoids, pseudo graminoids and herbaceous plants, in which the herbaceous percentage was reduced to almost 50% in the event of extreme drought (70% interception) at the end of the study in contrast to the initial conditions. What is more, we observed that the temperature levels decreased considerably in the two simulated drought events, where critical temperature of 6.3 ° C were observed at the extreme drought scenery, which has a great impact on the metabolic activity of the plants. On the other hand, it was also found that the vigor of the key species was strongly impacted by the reduction of precipitation, which was also manifested in the above biomass productivity, which was much lower in the experimental units that had greater interception of Rainfall than in those that received the normal rainfalls. These results show that water stress in grasslands was manifested both at functional and species levels, which induce to believe that in eventual moderate or extreme drought events, the ecosystem will delay in recovering its original structure, and that only those species that have developed drought adaptation mechanisms will be able to resist the climate change impacts.

KEY WORDS: Rainfall reduction, rainout shelter, floristic composition, soil temperature, soil moisture, vigor, productivity.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	9
II. REVISIÓN DE LITERATURA	11
2.1. Ecosistema del pastizal, productividad y composición florística.....	11
2.2. Características del suelo.....	12
2.2.1. Humedad de suelo.....	13
2.2.2. Temperatura de suelo.....	15
2.3. Déficit hídrico en pastizales	16
2.4. Impactos del cambio climático en los pastizales y tolerancia de especies al estrés hídrico	18
2.5. Proyecciones futuras de cambios en los patrones de precipitación	21
III. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1. Área de estudio	26
3.2. Precipitación de la zona de estudio.....	28
3.3. Construcción de interceptores de lluvia (Rainout shelters).....	29
3.4. Parámetros evaluados	31
3.4.1. Composición florística	31
3.4.2. Vigor	32
3.4.3. Biomasa de especies claves.....	33
3.4.4. Humedad de suelo.....	33
3.4.5. Temperatura de suelo.....	34
3.5. Diseño estadístico.....	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1. Composición florística.....	36
4.2. Vigor de especies claves.....	39
4.3. Biomasa	44
4.5. Temperatura de suelo.....	53
V. CONCLUSIONES	57
VI. RECOMENDACIONES	58
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
VIII. ANEXOS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efectos de los interceptores de lluvia (rainout shelters) sobre el contenido de agua del suelo a una profundidad de 0-15 cm (a) y 0-30 cm (b) de profundidad (media \pm 1 SE) durante ocho fechas (mayo y setiembre de 1999, enero, mayo, noviembre y diciembre del 200; y enero del 2001). Los niveles de intercepción de lluvias son 0% (control), 30%, 55% y 80% de la exclusión de las lluvias. Las letras representan las las diferencias significativas para una fecha dada ($P < 0.05$).....	14
Figura 2: Cambios en los valores de precipitación máxima de 5 días (en mm) para el futuro cercano (a y b) de 2015-2039 y para finales del siglo XXI (c y d) de 2075-2099 para resoluciones de 60 y 20 kilómetros respectivamente.	22
Figura 3: Cambios en los máximos anuales de días secos consecutivos para mediados del siglo (a, b) y para finales del siglo (c y d) para resoluciones de 60 y 20 kilómetros respectivamente. Fuente: Figura generada en el marco del Memorandum de Entendimiento (MOU) entre el MRI y el Banco Mundial.	23
Figura 4: Ubicación de la zona de investigación.....	26
Figura 5: Niveles de precipitación en la zona de estudio para los dos años de investigación desde octubre del 2014 junio de 2016.	28
Figura 6: Modelo de interceptor de lluvia que recibe el 70% de la precipitación (T2).....	30
Figura 7: Modelo de interceptor de lluvia que recibe el 30% de la precipitación (T3).....	31
Figura 8: Medición de la composición florística.....	32
Figura 9: Variación de grupos funcionales a nivel de precipitación recibida y años para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.....	37
Figura 10: Variación de los valores de vigor de la <i>Festuca dolichophylla</i> para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.....	40
Figura 11: Variación de los valores de vigor de la <i>Calamagrostis vicunarum</i> para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.....	43
Figura 12: Variación de los valores de biomasa de la <i>Festuca dolichophylla</i> para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.....	45
Figura 13: Variación de los valores de biomasa de la <i>Calamagrostis vicunarum</i> para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.....	47
Figura 14: Variación de los valores de humedad de suelo para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.	50
Figura 15: Variación de los valores de humedad de suelo para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cambios porcentuales en precipitación estimados para diferentes regiones de la cuenca. Fuente: CONAM 2005	24
Tabla 2: Total de especies registradas en el área de estudios	27

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Variación temporal de los grupos funcionales en los dos años de estudio.....	70
Anexo 2: Figura resumen del vigor de especies claves para los dos años de estudio....	70
Anexo 3: Vigor de especies claves expresado en volúmenes (cm ³).	71
Anexo 4: Figura resumen de vigor de especies claves.....	71
Anexo 5: Resultados obtenidos para la biomasa de especies clave a partir de las ecuaciones alométricas en gramos.....	71
Anexo 6: Variación de la biomasa de especies claves a distintos niveles de precipitación, épocas y años de estudio tanto para F (<i>Festuca dolichophylla</i>) como para C (<i>Calamagrostis vicunarium</i>).	72
Anexo 7: Resultados de humedad de suelo medido a una profundidad de 15 cm expresados en porcentaje de contenido volumétrico de agua.....	72
Anexo 8: Resultados de humedad de suelo medido a una profundidad de 15 cm expresados en porcentaje de contenido volumétrico de agua.....	72
Anexo 9: Tabla resumen de datos de temperatura de suelo medido a una profundidad de 15 cm expresados en porcentaje de contenido volumétrico de agua.	73
Anexo 10: Figura resumen de la variación de la temperatura medida a 15 cm de profundidad durante los dos años de estudio.....	73
Anexo 11: Valores obtenidos de peso y volumen de especies claves.....	73
Anexo 12: Ecuación alométrica de obtenida de la relación masa-volumen para <i>Festuca dolichophylla</i>	74
Anexo 13: Ecuación alométrica de obtenida de la relación masa-volumen para <i>Calamagrostis vicunarium</i>	74
Anexo 14: Análisis estadístico para los grupos funcionales	75
Anexo 15: Análisis estadístico para el vigor de especies claves.....	79
Anexo 16: Análisis estadístico para la biomasa de especies claves.....	83
Anexo 17: Análisis estadístico para la humedad de suelo	87
Anexo 18: Análisis estadístico para la humedad de suelo	91

I. INTRODUCCIÓN

La precipitación es un factor abiótico determinante en la productividad y estructura florística de los ecosistemas terrestres. En la actualidad los patrones de precipitación están cambiando y los modelos climáticos sugieren un aumento de la aridez en muchas zonas del planeta (Vergara et al., 2001). A escala mundial, los cambios en los patrones de precipitación pueden manifestarse en incrementos o reducciones, lo último conduce a estados de sequía, a esto se suma, el incremento de la temperatura y la radiación lo que se traduce en limitaciones ambientales importantes para su sostenibilidad (Yahdjian y Sala, 2008).

Gran parte de las proyecciones que utilizan modelos de simulación ponen de manifiesto la complejidad de los patrones de precipitaciones. Para América del Sur, las proyecciones van desde una reducción de 5-10% para el 2050, hasta un 20-40% hacia el año 2080 (Yahdjian y Sala, 2008), mientras que para los andes centrales del Perú, las proyecciones indican una reducción de los niveles de precipitación entre 5 a 10% para el año 2030 (Marengo, 2011) y de 30 % para el 2100 (SENAMHI, 2007). Por tanto, es probable que la precipitación anual disminuya en los andes centrales con cambios relativamente grandes durante el verano, mientras que la variación en la circulación atmosférica podrían también inducir grandes cambios en la variabilidad local de la precipitación en las zonas de montaña (Vergara et al., 2011).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2009), los pastizales constituyen uno de los ecosistemas más grandes del mundo y contribuyen a la subsistencia de más de 800 millones de personas, de las cuales, gran parte encuentran en áreas semiáridas susceptibles en gran medida al déficit hídrico; donde toda disminución de los recursos hídricos afectará de manera importante su capacidad de producción y de sostener herbívoros al pastoreo.

Sin embargo, a pesar de su alta vulnerabilidad, los pastizales tienen un enorme potencial todavía sin explotar para sostener animales al pastoreo y mitigar el cambio climático mediante la absorción y almacenamiento de CO₂ (FAO, 2009). Por lo tanto, los pastizales

cumplen un rol fundamental en el aprovisionamiento de servicios ambientales tales como regulador hídrico, captura de carbono y producción de forraje para la ganadería; sin embargo, son particularmente vulnerables a variaciones climáticas debido a que se ubican en regiones semiáridas (Grant et al., 2014). En el Perú, estos ecosistemas se encuentran distribuidos en la región andina (por arriba de los 3500 msnm) y presentan marcadas diferencias en su composición florística en respuesta a variaciones altitudinales, suelos, topografía, clima y manejo. En la región andina, la actividad ganadera ha sido la base del sustento de la población (Flores, 1989).

El cambio en los patrones de precipitación en el ecosistema de pastizal puede afectarlo de dos maneras: reduciendo el promedio de disponibilidad de agua e incrementando su variabilidad (Yahdjian y Sala, 2006). Las sequías extremas tienen como consecuencia; a corto plazo, la reducción en la producción primaria y; a mediano y largo plazo, cambios en la composición florística (Yahdjian y Sala, 2011). En el Perú existe muy escasa literatura respecto de los cambios que podrían ocurrir a futuro en los pastizales como consecuencia de la reducción de la precipitación; por tanto, la presente investigación tiene como objetivo estimar el impacto provocado por la reducción de la precipitación sobre la composición florística y productividad del ecosistema de pastizal de la sierra central de Junín. Esta información contribuirá a diseñar estrategias para lidiar con los posibles escenarios futuros en cuanto a la sostenibilidad de los pastizales (Grant et al., 2014).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Ecosistema del pastizal, productividad y composición florística

Los pastizales alto andinos son los ecosistemas de mayor extensión geográfica en nuestro país, abarcan aproximadamente 14 300 000 hectáreas (Yaranga, 2009) en ellas se desarrolla más del 80% de la ganadería extensiva en el país, por lo cual juegan un rol muy importante en la economía de la población dedicada a esta actividad. (Flores, 2007). En la región Junín donde se ubica el área de investigación, los pastizales abarcan una extensión aproximada de 291 652 de hectáreas casi el 26,94% de su territorio (Yaranga, 2009).

Este ecosistema en general está dominado por gramíneas de porte alto y bajo al igual que por la presencia de plantas herbáceas. El ecosistema de pastizal en la región Junín se encuentra dominada por especies de crecimiento mediano aproximadamente 50-70 cm (Tovar, 1993) como gramíneas, gramínoideas y herbáceas de bajo crecimiento. Entre las gramíneas dominantes que se encuentran son la *Festuca dolichophylla*, *Festuca rigescens*, *Festuca humillor*, *Calamagrostis vicunarum*, *Calamagrostis rigescens*, *Muhlenbergia fastigiata*, *Muhlenbergia ligularis*, *Muhlenbergia peruviana*, *Poa sp*, *Luzula vulcanica*, *Werneria nubigena*, *Bromus lanatus*; y en las gramínoideas tenemos a las Ciperáceas como *Carex sp* y *Trichophorum rigidum*. De otro lado, está el césped de puna que se caracteriza por especies de crecimiento bajo y postrado. Tanto los pajonales como los céspedes de puna contienen en su estructura herbáceas como *Alchemilla pinnata*, *Aphanactis villosa*, *Belloa kunthiana*, *Paranephelius sp*, *Hipochoeris stenocephala*, *Gentiana cedifolia*, *Azorella compacta* y *Trifolium sp.*, entre otros.

Las variaciones estacionales que se dan en temperatura y disponibilidad de agua afectan significativamente el desarrollo de productividad de las especies en la comunidad vegetal (Huete 2006, Steinaker y Wilson 2008). En el ecosistema de pastizal donde la disponibilidad de agua es un factor limitante, la producción puede verse afectada negativamente por el aumento de la temperatura, resultado de una mayor tasa de evapotranspiración y menor ciclaje de nutrientes (Larcher 2000). Además, un incremento

de la temperatura puede significar un aumento del período y los ciclos diarios de crecimiento (Peñuelas y Filella 2001, Sherry et al.2007, Yu et al. 2010); de esta manera, las alteraciones en la disponibilidad estacional de agua y calor pueden afectar la funcionalidad de los ecosistemas (McCarty 2001) a través del adelanto o retraso del rebrote, senescencia de la vegetación, y en consecuencia; la productividad primaria neta anual.

Se ha observado que el pasto empieza a crecer cuando la temperatura del suelo se mantiene por encima de 4°C por 3-4 días como mínimo (Pearson, 1942), aunque Flores y Malpartida (1987) señalan que hay mucha evidencia respecto a la temperatura en la cual los pastizales empiezan a crecer, alrededor de 6.1°C aproximadamente. Barón y Belángier (2007) encontraron que la temperatura ambiente óptima de crecimiento, donde la velocidad de desarrollo aumente rápidamente para especies de estación fría, usualmente está entre 20-25 °C, pero crecen lentamente por debajo de 5 a 7°C. En especies como la *Festuca dolichophylla*, *F. Rigescens*, *Muhlenbergia ligularis*, *M. peruviana* y *Calamagrostis vicunarium* se necesitó de 200 días para llegar desde el inicio del crecimiento en noviembre hasta diseminar semilla en mayo, para luego en junio entrar en estado de dormancia entre noviembre y enero, durante el crecimiento hasta la floración (Flores y Bryant, 1984; Bueno, 1984).

La productividad de los pastizales dominados por gramíneas puede llegar hasta 5 Tn/MS/ha en condiciones climáticas y de manejo adecuado. Así mismo, la productividad primaria del ecosistema de pastizal y la composición de especies están directamente relacionadas con la distribución estacional y las cantidades anuales de las precipitaciones, que fluctúan entre años y también están controlados por otras variables climáticas, como la temperatura y el tipo de suelo (Yahdijan, 2011). Esta relación entre producción primaria neta y precipitación es muy similar en distintas regiones geográficas, con un incremento de producción anual entre 0,5 y 0,75g/m² por cada milímetro de lluvia (Mcnaughton et al., 1993). A su vez, la productividad primaria neta determina la cantidad de herbívoros, tanto domésticos como silvestres, puesto que constituye la fuente de alimento de estos animales (Mcnaughton et al., 1989).

2.2. Características del suelo

Los suelos de pastizales son suelos bien desarrollados, profundos y de textura franca o franco arenoso, corresponden en su mayoría al orden de Mollisol y contienen un horizonte

A con buen contenido de materia orgánica lo cual le confiere una coloración oscura, un horizonte B que en general presenta contenido de arcilla, lo que evidencia un buen desarrollo del perfil. Los suelos de pastizales tiene una gran capacidad de retener agua gracias al alto contenido de materia orgánica; a pesar del buen contenido de materia orgánica los suelos de pastizales son deficientes de iones disponibles de nitrógeno debido a las bajas tasas de mineralización que ocurren por las temperaturas bajas que predominan en estos ambientes.

En el caso de los pastizales de la región Junín, ubicados generalmente por encima de los 3400 msnm, los suelos por lo general presentan baja aptitud para la agricultura, bajos niveles de potasio, fósforo, nitrógeno, materia orgánica medianamente alta y valores de pH altamente cambiables tanto ácidos como alcalinos. En cuanto a la conductividad eléctrica, por lo general no presentan problemas de sales, presentan una textura franca y un pH ligeramente ácido, entre 6.2 a 6.6 (Castañeda, 2007).

2.2.1. Humedad de suelo

La humedad del suelo juega un papel crítico en cómo un ecosistema responde al ambiente físico a través de su influencia en la cantidad de energía superficial y la división de las precipitaciones en escorrentía y/o infiltración (Joshi et al., 2011). Esto se da principalmente en los pastizales templados áridos y semiáridos donde la disponibilidad de agua es un factor limitante muy importante para las funciones del ecosistema (Zhang y Liu, 2014). En el ecosistema de pastizal andino, la humedad del suelo es fundamental, ya que la cantidad de agua proveniente de las precipitaciones y/o irrigación; y la fuerza capilar con la cual el agua es retenida en los poros de los suelos serán claves para el ciclo de vida de las plantas; en consecuencia, su disponibilidad de agua (Aguirre, 1985). Además, el tipo de suelo, específicamente el grosor y la distribución de los poros determinará la cantidad de agua capilar que se queda en las capas superficiales y la cantidad de agua que descenderá y será almacenada o utilizada (Flores y Malpartida, 1987).

En el mundo, varios estudios de campo han detectado los cambios temporales en la humedad del suelo en ambientes áridos y semiáridos dominados por diversos ecosistemas. Zhang y Liu (2014) simularon los flujos de agua durante la temporada de crecimiento en la cuenca del río Xilin usando el Modelo de Productividad del Paisaje de Praderas (MPPP). Sus resultados demostraron que los flujos de agua variaban en respuesta a las

variaciones espaciotemporales en los factores ambientales y los cambios asociados en las características fenológicas y fisiológicas de las plantas. Li et al. (2011) examinaron las variaciones espaciales y temporales de la humedad del suelo en China utilizando un modelo climático regional, CLM3.5, y encontró que las regiones áridas y semiáridas tenían las mayores variaciones de humedad del suelo durante las últimas cinco décadas. En gran medida, los recursos hídricos del suelo dependen de la profundidad del suelo además del clima local (Jia y Shao, 2014).

En la espeta patagónica de Argentina, Yahdjian y Sala (2002) analizaron el impacto de la reducción de la precipitación en el contenido de agua de suelo (figura 1), para lo cual simularon escenarios de sequía con 30%, 55% y 80% de niveles de intercepción y un control que recibió el normal de lluvia. Los resultados que encontraron fue que el contenido de agua en el suelo fue significativamente mayor en las parcelas de control que en las parcelas con refugio de lluvia en todas las fechas, excepto en el verano (enero).

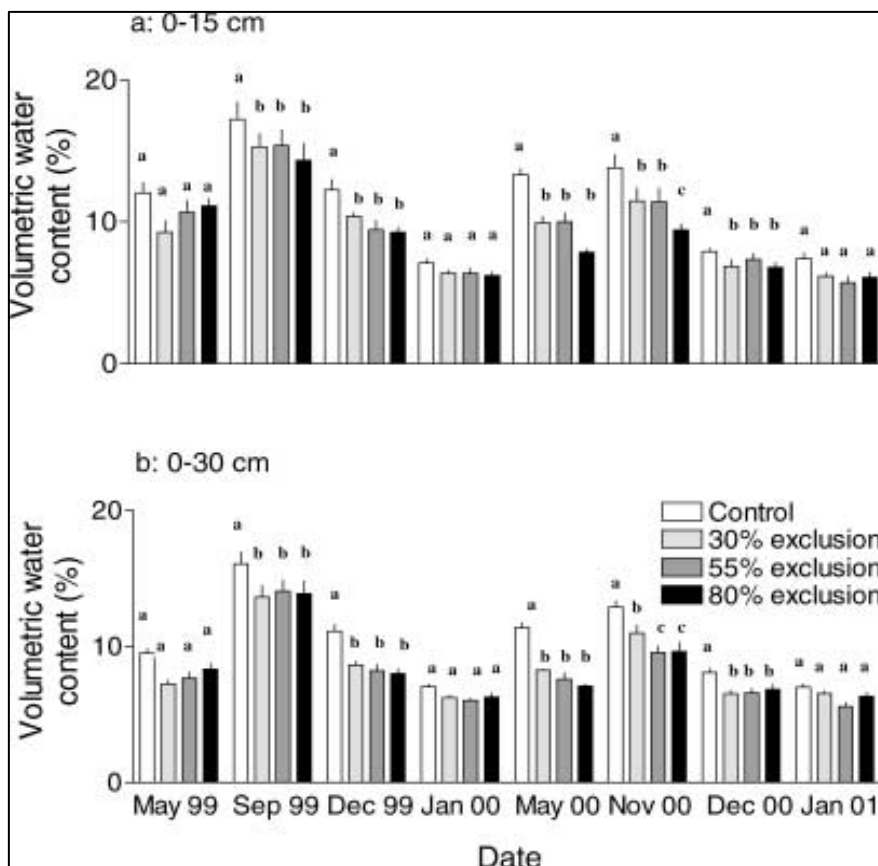


Figura 1: Efectos de los interceptores de lluvia (rainout shelters) sobre el contenido de agua del suelo a una profundidad de 0-15 cm (a) y 0-30 cm (b) de profundidad (media \pm 1 SE) durante ocho fechas (mayo y setiembre de 1999, enero, mayo, noviembre y diciembre del 200; y enero del 2001). Los niveles de intercepción de lluvias son 0% (control), 30%, 55% y 80% de la exclusión de las lluvias. Las letras representan las las diferencias significativas para una fecha dada ($P < 0.05$)

Una deficiencia o un exceso de agua del suelo limitan el crecimiento de la raíz. El agua en sí misma no es directamente perjudicial para las raíces, como lo demuestra su vigoroso crecimiento en soluciones nutritivas bien ventiladas, pero un exceso de agua en el suelo desplaza el aire de los poros no capilares y produce deficiencia de oxígeno que puede reducir el crecimiento y el funcionamiento y causar la muerte de raíces. Una deficiencia severa del agua del suelo generalmente provoca una reducción o cesación del crecimiento de las raíces y poco o ningún crecimiento de la raíz ocurre en el suelo secado hasta el porcentaje de marchitez permanente, lo cual inhibe la absorción de agua y minerales.

En la Unidad Productiva de Consac, perteneciente a la Sociedad Agrícola de Interés Social “SAIS Túpac Amaru”, la humedad del suelo oscila entre 21 a 27% durante todo el año, siendo mayor en los meses de enero a mayo; y menor entre junio y noviembre; donde el mes de menor humedad es junio con 21.3% (Ñaupari, 2000).

2.2.2. Temperatura de suelo

La temperatura del suelo varía en el tiempo, espacio y profundidad, pues está en función de la radiación solar incidente, humedad, tipo de suelo, profundidad, cambios estacionales en la temperatura del aire y cobertura vegetal de la zona. Debido a la capacidad calorífica del suelo, mucho mayor en relación con la del aire, el aislamiento térmico proporcionado por la vegetación y las capas superficiales del suelo; los cambios estacionales en la temperatura del suelo a distintos niveles de profundidad son mucho menores y quedan muy por detrás de los cambios estacionales en la temperatura del aire.

Es por eso que este parámetro juega un papel importante en muchos procesos que ocurren en el suelo, tales como reacciones químicas e interacciones biológicas; por ejemplo, la habilidad de las plantas para la conversión de azúcares durante el crecimiento y consecuentemente cambios en la población de microorganismos del suelo (Korte y col, 1987). Estos efectos se propagan en el perfil del suelo por los procesos de transferencia de calor y son influenciados por la capacidad de calor específico y la conductividad térmica del suelo.

La principal causa de la disminución de la absorción de agua a bajas temperaturas es el aumento de la resistencia de las raíces al movimiento del agua a través de las raíces,

causado en parte por el aumento de la viscosidad del agua (Kramer, 1993). Durante la época de lluvia, la temperatura del suelo tiende a ser mayor que en la época seca debido a una mayor conductividad del calor en suelo húmedo. En estos dos períodos, las temperaturas son mayores a 10 °C, el mínimo necesario para un adecuado desarrollo de las plantas.

La producción del ecosistema se verá incrementada aproximadamente 8 Kg.MS./ha/día durante la primavera cuando el suelo alcanza una temperatura entre 5.5 a 10 °C (Korte y col, 1987). Mientras que en otoño, el incremento de la temperatura entre 7 a 17°C, implica una reducción aproximado de 4 Kg.MS./ha/día debido a un estado de estrés generado por la pérdida de humedad y la absorción de agua que se reduce en suelos fríos.(Korte y col, 1987). El estrés hídrico causado por el enfriamiento de las raíces reduce la conductancia estomática y puede reducir la conducción no estomática en la fotosíntesis, por tanto, también la productividad (DeLucia, 1986).

2.3. Déficit hídrico en pastizales

El déficit hídrico o estrés hídrico se inicia cuando las tasas de transpiración de agua superan a las tasas de absorción que provoca respuestas como la pérdida considerable en la cantidad de hojas (Buxton, 1996, Reddy et al., 2003). No obstante, Las sequías largas inhiben el crecimiento de macollos y la ramificación de las plantas, además de acelerar la muerte de los tallos y la senescencia de las hojas puesto que reubican las proteínas, el nitrógeno y los carbohidratos solubles de las hojas a las raíces, con lo cual se reduce el valor nutritivo de la especie. (Buxton, 1996; Al., 2010).

En algunas especies, el azúcar y la prolina se acumulan con el estrés hídrico, lo cual mejora la recuperación de las plantas durante la sequía (Saglam et al., 2008). Con los impactos del cambio climático, la calidad forrajera de los pastizales no solo se alterará directamente a través de cambios en los factores abióticos que gobiernan el crecimiento y desarrollo de las plantas, sino también a través de alteraciones en la composición florística (Kreyling et al., 2011b, Stampfli y Zeiter, 2004). El valor nutritivo de los pastizales está fuertemente influido por la composición de la comunidad debido principalmente a la gran variación de especies, los compuestos químicos, las etapas fenológicas, los grupos funcionales y las vías fotosintéticas (Huyghe et al., 2008, Andueza et al., 2010) .

La mayor variabilidad de las precipitaciones ocasiona un aumento la variabilidad de la humedad del suelo, lo que conduce a un aumento del estrés hídrico de las plantas y, por lo tanto, altera la productividad de los pastizales (Fay, 2009; Grant et al., 2014; Nippert et al., 2006). El forraje y la producción de cultivos se alterarán directamente a través de los cambios climáticos e indirectamente a través de cambios en la disponibilidad de nutrientes, lo que resultará en una mayor variabilidad de la producción y calidad forrajera. (Buxton, 1996; Olesen et al., 2011).

En la ausencia de condiciones climáticas extremas, el factor más importante que influye en la calidad del forraje de una especie dada es la etapa de maduración de la planta (Buxton, 1996). Con el avance de la madurez y el aumento de la edad dentro de una determinada temporada de crecimiento, la calidad del forraje disminuye (Ball et al., 2001; Bruinenberg et al., 2002) lo cual se refleja en una disminución en la digestibilidad de los componentes de la planta y en la disminución del contenido de nitrógeno.

El déficit hídrico moderado ralentiza la maduración de la planta y, si no causa una pérdida severa de las hojas, la calidad del forraje y la digestibilidad pueden mantenerse o incluso mejorarse ligeramente (Buxton, 1996; Reddy et al., 2003). Sin embargo, los sucesos prolongados y extremos de la sequía inhiben el tallado y la ramificación, aceleran la muerte de los tallos y la senescencia de las hojas, y reubican proteínas, nitrógeno y carbohidratos solubles de las hojas a las raíces, reduciendo el valor nutritivo de la planta (Buxton, 1996; Al., 2010).

La sequía también afecta la nutrición del nitrógeno de las partes de las plantas por encima del suelo debido a la menor absorción y uso del nitrógeno mineral del suelo (Durand et al., 2010). No obstante, se encontró que el contenido de proteínas aumentaba bajo sequía en las plantas en simbiosis con hongos micorrízicos arbusculares (Subramanian y Chest, 1995). En algunas especies, el azúcar y la prolina se acumulan con el estrés hídrico, lo cual mejora la recuperación de las plantas de la sequía (Saglam et al., 2008). Con el cambio climático global, la calidad de los pastizales no sólo será alterada directamente a través de cambios en la actividad abiótica, que es un factor importante que rige el crecimiento y desarrollo de las plantas, sino también a través de alteraciones en la composición de la comunidad (Kreyling et al., 2011, Stampfli y Zeiter, 2004). El valor nutritivo de los pastizales está fuertemente influido por la composición de la comunidad debido principalmente a la fuerte variación en las identidades de las especies,

composición química, estadios fenológicos, grupos funcionales y caminos fotosintéticos (Andueza et al., 2010).

2.4. Impactos del cambio climático en los pastizales y tolerancia de especies al estrés hídrico

El calentamiento global a menudo viene acompañado de mayor frecuencia de sequías que podría reducir la producción primaria en muchos pastizales templados (De Boek et al., 2008). Las sequías leves y el calentamiento no conducen a una mayor resistencia o recuperación de una sequía recurrente extrema en los pastizales. Además, los pastizales que experimentan una sequía recurrente demuestran una mayor disminución en la cobertura vegetal (Pendall et al, 2004). Se espera que el calentamiento climático acelere directamente la respiración del suelo al estimular las actividades de la fauna del suelo, los microbios y las raíces de las plantas, y puede acelerar indirectamente la respiración del suelo estimulando la mineralización de N, pero también la cantidad y calidad de la entrada del mantillo (Sanaullah et al, 2012). En general, los escenarios de sequía muestran que el calentamiento puede causar una mayor aridez del ecosistema y, por lo tanto, estimular aún más la respiración del suelo. Se espera que el aumento de las temperaturas afectará a la descomposición más que la productividad primaria (Davidson y Janssens, 2006).

Las plantas varían en su tolerancia al déficit hídrico, en Nueva Zelanda, Baker y Caradus (2005) identificaron algunas especies abundantes en ambientes moderadamente secos (Jackson, 1974 citado por Baker y Caradus, 2005) como la gramíneas *Dactylis glomerata* y la *Festuca arundinacea*, mientras que la *Andropogon gerardii* y la *Agropyron cristatum* son más abundantes en ambientes secos (Barnes, 1985, Frank et al., 1996, citados por Baker y Caradus, 2005). Estas especies tienen rasgos que confieren tolerancia tanto al déficit hídrico como a la severidad y el grado que pueda alcanzar este estrés hídrico, con lo cual contribuyen a la adaptación de la comunidad de pastizales para sobrevivir y mantener la producción durante la eventual sequía. Se ha encontrado algunas experiencias exitosas con la utilización del trébol subterráneo (*Trifolium subterraneum*), ya que esta especie tiene una amplia presencia en ambientes secos y puede reemplazar el trébol blanco (*T. repens*) en pastos no irrigados (Rickard y Fitzgerald, 1970, citados por Baker y Caradus, 2005). Algunos estudios han encontrado que, durante su fase de crecimiento, las especies anuales tienen mayor sensibilidad a la sequía que las perennes; y además, las sequías fuera de temporada que se pudieran presentar también provocarían una

disminución de la abundancia de anuales en pastos naturales (Espigares y Peco, 1995). Tillman y Downing (1994) observaron una fuerte relación positiva entre la riqueza de especies y la recuperación de la sequía en pastizales. Estos hallazgos contrastan con Sankaran y McNaughton (1999), quienes encontraron el mayor rendimiento de las mezclas de especies más simples en un medio seco. Conceptualmente, se podría imaginar que una mezcla de especies (y genotipos dentro de una especie) podría ser más idóneo de explotar para contrarrestar los efectos impactos de la sequía en un ambiente seco variable, pero no se han reunido pruebas suficientes para cuantificar completamente todas las circunstancias en las que esto podría aplicarse.

En el caso de las respuestas morfológicas, se conocen ejemplos como el rye grass, el cual, cuando está en estrés hídrico, presenta hojas más pequeñas, más gruesas y más cortas, bordes más profundos en las superficies adaxiales de las hojas, una tasa de expansión foliar más lenta y una aparición más lenta de las hojas (Leafe et al., 1977). Colectivamente, estas respuestas tienen valor adaptativo ya que reducen la carga de radiación en las hojas y reducen el uso del agua. Ritchie y Burnett (1971) encontraron que la evapotranspiración es menor que la evapotranspiración potencial en el sorgo y el algodón cuando el índice de área foliar disminuye por debajo de tres.

Por encima de una temperatura del suelo de 17 ° C, el potencial hídrico del suelo era el factor limitante dominante para el crecimiento de raíces en los experimentos de Teskey y Hinckley (1985) pero por debajo de 17 ° C, la temperatura era la mayoría de las veces limitante. Durante su estudio, la temperatura del suelo fisiológicamente óptima y el potencial del agua del suelo nunca ocurrieron simultáneamente, siendo uno o el otro siempre limitante. Los déficits hídricos del suelo a menudo reducen el crecimiento de los brotes antes de que se reduzca el crecimiento de las raíces, lo que da como resultado un aumento de las proporciones raíz-rama en plantas moderadamente estresadas por el agua. El estrés hídrico leve de la planta también puede reducir el crecimiento foliar antes de que se reduzca la fotosíntesis (Boyer, 1970, citado por Kramer 1993), dando como resultado un exceso de carbohidratos que están disponibles para el crecimiento de las raíces. A medida que se desarrolla el estrés hídrico, disminuye el contenido relativo de agua de la planta y el potencial hídrico de las hojas. Dado que el crecimiento está relacionado con la turgencia celular, el primer proceso de la planta a ser afectado es la tasa de expansión celular. Con el tiempo, esto da como resultado una reducción del tamaño de la planta, una mayor densidad estomática, células epidérmicas más pequeñas y una mayor

concentración de clorofila en comparación con los controles regados (Leafe et al., 1977; citado por Barker y Caradus, 2001). Como consecuencia directa de la deshidratación, los contenidos celulares se concentran y el potencial osmótico disminuye, la fotosíntesis continúa y la reducción de la utilización de carbohidratos solubles en agua contribuye a una disminución adicional del potencial osmótico (Brown y Blaser, 1970).

Este ajuste osmótico tiene un valor adaptativo considerable ya que ayuda a mantener la turgencia celular y contribuye al crecimiento compensatorio al volver a regar (Horst y Nelson, 1979). La reducción de la turgencia foliar, en última instancia, perjudica la función estomática y provoca la laminación de la hoja. Estos procesos aumentan la resistencia estomática, reducen el intercambio de CO₂ y elevan la temperatura de la hoja.

Las plantas con metabolismo C4 son relativamente menos afectadas ya que su única vía de CO₂ permite que la acumulación de carbono continúe a pesar de una mayor conductancia estomática. A niveles moderados de estrés, la expresión del ácido abscísico (ABA) provocará innumerables respuestas bioquímicas y moleculares como precursores de la pérdida total de la función de la hoja (o en casos extremos de la planta). A medida que se desarrolla el estrés hídrico, se inician procesos de senescencia, comenzando con la exportación de metabolitos foliares hacia áreas meristemáticas y finalmente resultando en escisión de las hojas.

El ajuste osmótico también ocurre en las puntas de las raíces (Sharp et al., 1990, citado por Kramer, 1995), prolongando la expansión de las células de la raíz, y el resultado combinado es que el tamaño absoluto de los sistemas radiculares de las plantas ligeramente estresadas a veces excede al de las plantas bien regadas (Jupp y Newman, 1987, Sharp y Davies, 1979; citados por Kramer 1995). Sin embargo, Westgate y Boyer (1985) encontraron un ajuste osmótico similar en hojas y raíces de maíz, pero las raíces crecieron más que las hojas durante un período de estrés hídrico.

La diferencia en el crecimiento de los dos órganos se atribuyó a factores internos distintos del estrés hídrico, ya que la diferencia se mantuvo cuando el potencial hídrico fue el mismo en las raíces y las hojas. Si la elongación de la raíz se detiene por el estrés hídrico del suelo, las raíces tienden a ser suberizadas hasta sus puntas. Esto a veces se considera una adaptación protectora, especialmente en las plantas del desierto, ya que disminuye la pérdida de agua de las raíces a la sequedad del suelo, pero también reduce su capacidad de absorber el agua cuando el suelo se rehumedece. Svenningsson y Liljenberg (1986)

encontraron que las raíces expuestas a la deshidratación repetida contenían mucho menos lípidos de membrana que los controles y que la composición de lípidos era diferente (Svenningsson y Liljenberg, 1986; Norberg y Liljenberg, 1991).

2.5. Proyecciones futuras de cambios en los patrones de precipitación

Los modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) son una representación espacial y temporal aproximada de los principales procesos físicos que ocurren en la atmósfera y de sus interacciones con otros componentes del ambiente. En la actualidad, son las herramientas más confiables para la investigación del clima futuro, sus fluctuaciones y variaciones. Estos modelos predicen que la precipitación anual disminuirá en el centro y sur de los Andes, sobre todo durante el verano, mientras que en la región tropical de Sudamérica las proyecciones son variables, oscilando entre una reducción de 20-40% de las lluvias hasta un aumento de 5-10% para el 2080 (Yahdjian, 2008).

En el año 2002, el Instituto de Investigación Meteorológica (MRI), la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) y la Organización Tecnología de Ciencias Avanzadas de la Tierra (AESTO) dirigieron en nuestro país un proyecto de investigación de cinco años denominado "Desarrollo de modelos globales climáticos de alta resolución y modelos regionales del clima", financiado por el Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología de Japón (MEXT) en cooperación con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

En sectores entre los 3500 a 4200 msnm, las proyecciones de estos modelos indican que la disminución de lluvias en verano será de alrededor de 6%; situación que se prolongará hasta el otoño (5%), mientras que en invierno se estima que la reducción de lluvias será aproximadamente de 35%. Si a ello superponemos un escenario más cálido en el que las temperaturas extremas se incrementarán entre 2.5 °C y 3.3 °C; para finales de siglo sobre este sector estaríamos frente a una zona altamente vulnerable a los cambios del clima en el mediano y largo plazo (SENAMHI, 2007). Estos resultados se tornan más consistentes al ser contrastados con los resultados encontrados por Marengo (2005) en un estudio de escenarios climáticos sobre Arequipa. Ellos encontraron que para fines de siglo, los pisos altitudinales por encima de los 4000 msnm experimentarán un aumento significativo de la temperatura mayor a 5°C, además de una reducción de las lluvias de 2-3 mm/día (en un escenario pesimista de emisión), previéndose el crecimiento de los denominados “desiertos altoandinos” con el consecuente impacto sobre la ganadería y la agricultura en

los valles interandinos (SENAMHI, 2007). En un estudio realizado para el Banco Mundial denominado “Evaluación de los Impactos del Cambio Climático en hidrología de montaña- Desarrollo de una metodología a través de un estudio de caso en los andes del Perú” (Vergara et al., 2011); se simularon las precipitaciones medias anuales tanto para el período de futuro cercano (2015-2039) y finales del siglo XXI (2075-2099). Estos datos se compararon con los datos disponibles sobre la precipitación media. El panorama general del cambio de precipitación simulado por los modelos de 20 y 60 km de resolución es similar.

La comprensión de dónde tendrán lugar estos cambios en los extremos es importante para reconocer dónde se necesitan medidas de adaptación. Se pueden identificar dos impactos distintos: Cambios en la precipitación intensa (medidos a través del máximo total en cinco días, denominado RX5D, en milímetros) y días sin lluvia (medidos a través del número de días secos consecutivos). Estos dos índices extremos de precipitación fueron calculados para ilustrar los cambios en las precipitaciones extremas sobre Perú. La figura 2 muestra los cambios proyectados de las precipitaciones en comparación con los actuales, tanto en las resoluciones de 60 km como en las de 20 km para el futuro próximo y finales del siglo.

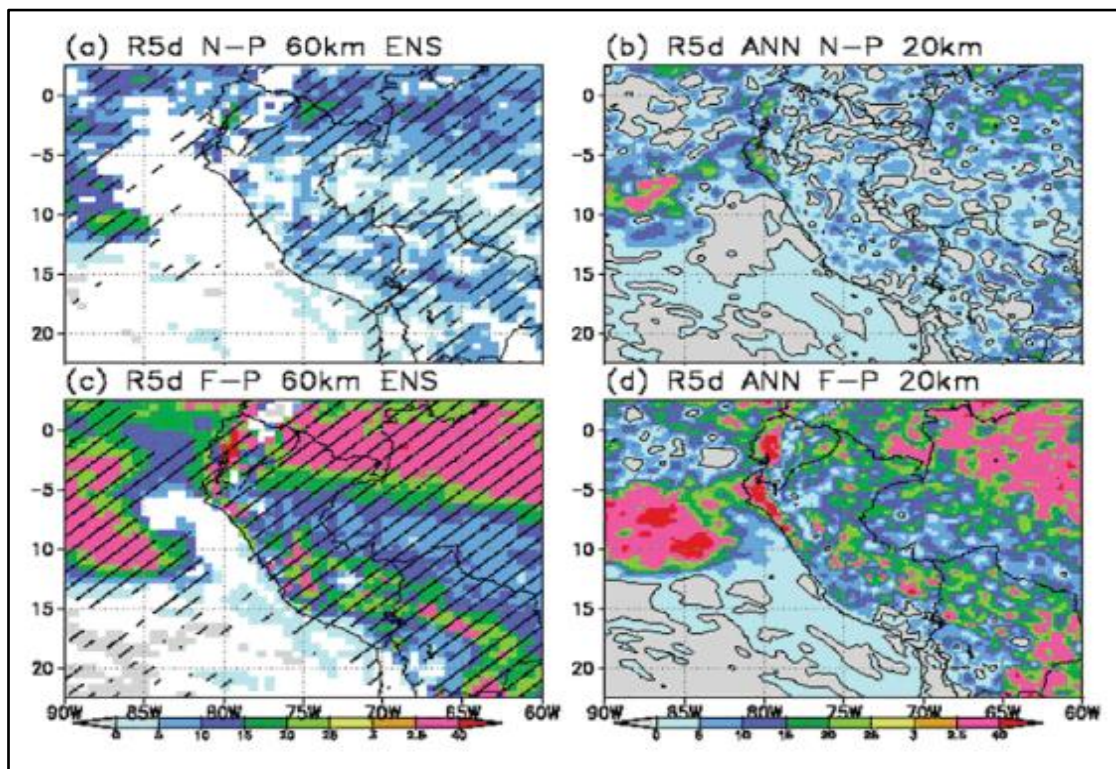


Figura 2: Cambios en los valores de precipitación máxima de 5 días (en mm) para el futuro cercano (a y b) de 2015-2039 y para finales del siglo XXI (c y d) de 2075-2099 para resoluciones de 60 y 20 kilómetros respectivamente.

Las anomalías más grandes se observan sobre la cordillera de los Andes, mientras que los cambios más pequeños se observan en las tierras bajas del este y las zonas costeras del sur. El calentamiento global no solo puede ocasionar cambios en las condiciones medias de las variables climáticas, sino también puede aumentar la amplitud y la frecuencia de los eventos extremos. El modelo sugiere que habrá un aumento de los aguaceros más fuertes en todo el Perú, lo que conducirá a una mayor probabilidad de inundaciones y una menor estabilidad de los flujos de la corriente. Como se ve en la figura 2, el modelo proyecta aumentos aún mayores en las precipitaciones fuertes hacia fines del siglo con una mayor resolución (20 km).

En general, la mayor intensidad de lluvias se encuentra sobre la costa noroeste y la Cordillera de los Andes. Según el modelo MRI-AGCM3.1, es probable que el cambio climático no solo causará una intensificación de la lluvia, sino también conduciría a un aumento del número de días sin lluvia. La figura 3 muestra los cambios en el número máximo de CDD (días secos consecutivos) sobre Perú para el futuro cercano y final del siglo a 20 km y 60 km.

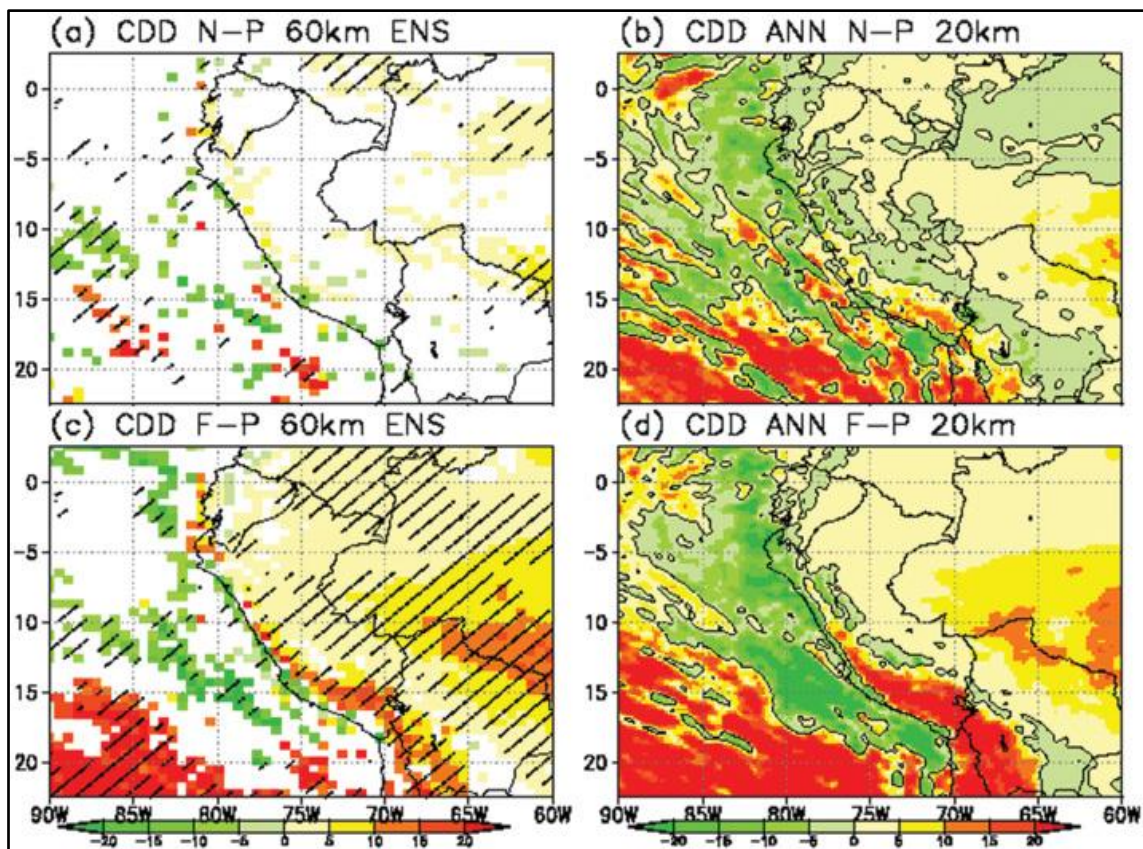


Figura 3: Cambios en los máximos anuales de días secos consecutivos para mediados del siglo (a, b) y para finales del siglo (c y d) para resoluciones de 60 y 20 kilómetros respectivamente. Fuente: Figura generada en el marco del Memorandum de Entendimiento (MOU) entre el MRI y el Banco Mundial.

Para ilustrar los cambios en la extensión de la estación seca, los días secos consecutivos CDD fueron estimados para el mismo periodo que las fuertes lluvias, donde un "día seco" se define como un día con una precipitación de menos de 1 mm/día. Se prevé que el número de días secos aumente en todo el país, lo cual puede conducir a un aumento de las sequías en el tiempo.

La hidrología superficial se verá afectada como resultado de los cambios en la precipitación. Un parámetro clave para la hidrología superficial es el contenido en agua del suelo (humedad) de la capa superior del suelo (WETSL1) 7, que puede estimarse sobre la base de un cálculo del presupuesto hídrico basado en los resultados de modelado del GCM. Los cálculos incluyeron una estimación del cambio en la humedad superior del suelo hecho sobre la base de la evaporación y los cambios en las precipitaciones y los períodos secos. Los resultados de los cálculos se indican que el suelo se volvería considerablemente más seco en la mayor parte del país y que la sequedad aumentaría con el tiempo. Según la cifra, se prevé que la Cordillera de los Andes experimentará cambios mixtos en el contenido de humedad del suelo.

En otro estudio realizado por el ya extinto Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) en el 2005 en el trabajo titulado "Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del Mantaro" se encontró que, en promedio, la tendencia es de una disminución de 3% de las precipitaciones actuales por década (15% en 50 años).

Tabla 1: Cambios porcentuales en precipitación estimados para diferentes regiones de la cuenca. Fuente: CONAM 2005

CENTRO	ESCENARIO	SUBCUENCA CHINCHAYCOCHA	CUENCA MEDIA	CUENCA A BAJA
MPIfM	A2	-12.1%	-22%	-15.8%
	B2	-7.7%	-14%	-10.1%
CCCma	A2	-8.4%	-15.4%	-11.1%
	B2	-8.1%	-14.9%	-10.7%
CCSR/NIE S	A1	-14.4%	-26.3%	-18.8%
	A2	-11.4%	-20.8%	-14.9%
	B2	-9.2%	-16.8%	-12.0%
NCAR	A1	-10.5%	-19.2%	-13.8%
CSIRO	A1	-12.8%	-23.4%	-16.8%
	A2	-11.3%	-20.6%	-14.8%
	B2	-11.5%	-21.0%	-15.1%
PROMEDIO		-10.4%	-19.1%	-13.7%
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		1.5%	2.7%	1.9%

Los cambios en precipitación se estimaron directamente de los resultados de 12 combinaciones de modelos climáticos globales de la IPCC y escenarios de emisión distintos para luego obtener los resultados descritos en la tabla 1 donde se puede apreciar un resumen de las proyecciones realizadas para la cuenca del Mantaro al año 2050.

En resumen, de acuerdo al estudio, los escenarios climáticos para el año 2050 son los siguientes:

- Aumento en las temperaturas medias en verano de 1,3°C.
- Aumento en la humedad específica durante el verano en 1 g/kg
- Disminución en la humedad relativa en verano de 6%.
- Disminución en las precipitaciones en las zonas norte, centro y sur en 10%, 19% y 14% respectivamente.
- Incremento en el rango diurno de temperatura de aproximadamente 1°C.
- Incremento en el número de días con heladas en los meses de verano de 30 días.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

Esta investigación se desarrolló en la Unidad de Consac perteneciente a la Sociedad Agrícola de Interés Social “SAIS Túpac Amaru” ubicado en la provincia de Jauja, región Junín. El área experimental abarca una extensión de terreno de 1200 m² (30m x 40m), entre las coordenadas UTM 8677252.58 S y 423525.68 O, y 8677293.76 S y 423555.43°, la cual, según la clasificación de Holdridge (1967) pertenece a la zona de vida de Páramo muy húmedo-subalpino tropical.

De acuerdo a la clasificación climática basada en el Mapa de Clasificación Climática del Perú (SENAMHI, 1988) y según el sistema mundial de Clasificación de Climas de Werren Thorntwaite; el tipo de clima de la zona de estudio es un “BrB’1H4”, el cual se describe como lluvioso (B), con precipitación abundante en todas las estaciones (r), semicálido (B’1) y muy húmedo (H4). La duración de esta investigación abarcó desde octubre del 2014 hasta mayo del 2016, el cual se dividió entre octubre del 2014 a junio del 2015 para el primer año, y de octubre del 2015 a junio del 2016 para el segundo año.

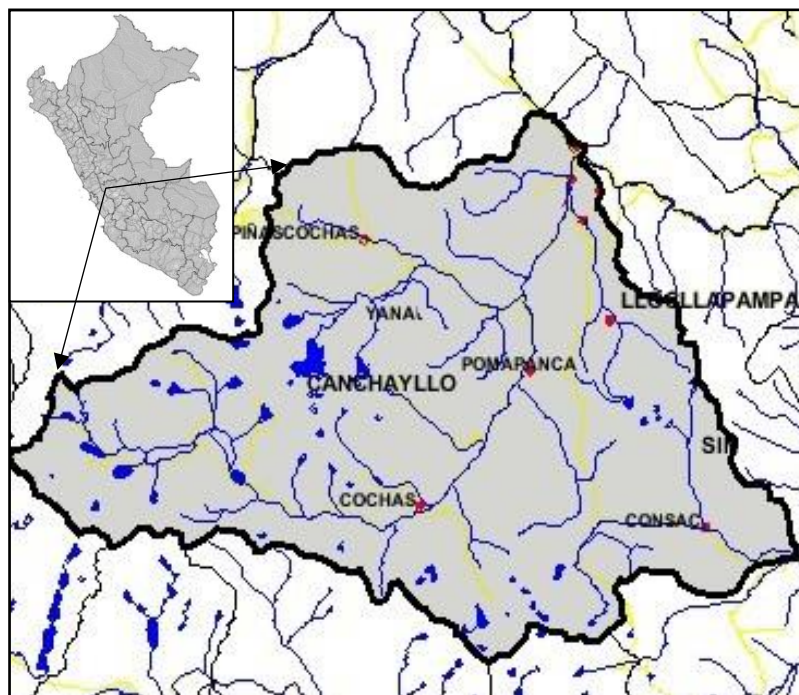


Figura 4: Ubicación de la zona de investigación

El patrón de precipitación de la zona alto andina está dividido en época lluviosa, la cual se extiende desde octubre hasta marzo, y la época seca que abarca los meses de abril hasta setiembre, donde los valores promedio de precipitación varían aproximadamente entre 600 a 800 mm/año. Los meses más lluviosos en general son diciembre, enero y febrero, mientras que los meses entre junio y agosto registran las menores precipitaciones durante el año.

Los patrones de temperatura ambiental muestran una temperatura máxima promedio entre 8 a 14 °C y temperatura mínima promedio entre -1 a 3°C (SENAMHI, 2007). El área de estudios, y los lugares aledaños, se caracterizan por ser zonas de pastoreo de ganado vacuno, ovino y camélidos sudamericanos. Así mismo, se puede apreciar que, en términos generales y épocas de plena lluvia, la condición de los pastizales es buena de acuerdo a Yaranga (2009). Respecto a la flora de esta zona, la composición florística encontrada dentro del área de estudio comprende especies que pertenecen a los 3 grupos funcionales, los cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2: Total de especies registradas en el área de estudios

Gramíneas	Graminoides	Herbáceas
<i>Agrostis breviculmis</i>	<i>Carex peruviana</i>	<i>Azorella compacta</i>
<i>Bromus lanatus</i>	<i>Carex ecuadorica</i>	<i>Arenaria digyna</i>
<i>Calamagrostis antoniana</i>	<i>Carex sp</i>	<i>Cerastium crassipes</i>
<i>Calamagrostis spicigera</i>	<i>Eleocharis albibracteata</i>	<i>Eryngyum humile</i>
<i>Calamagrostis vicunarum</i>	<i>Luzula racemosa</i>	<i>Geranium andicola</i>
<i>Festuca dolichophylla</i>	<i>Scirpus rigidus</i>	<i>Geranium jaekelae</i>
<i>Festuca humilior</i>		<i>Gentiana sedifolia</i>
<i>Festuca rigescens</i>		<i>Gentiana sp</i>
<i>Luzula sp</i>		<i>Hypochaeris sp</i>
<i>Muhlenbergia fastigiata</i>		<i>Hypochaeris taraxacoides</i>
<i>Muhlenbergia peruviana</i>		<i>Lachemilla pinnata</i>
<i>Poa spicigera</i>		<i>Nassella brachyphylla</i>
<i>Poa sp</i>		<i>Plantago rigida</i>
		<i>Plantago tubulosa</i>
		<i>Taraxacum officinale</i>
		<i>Werneria caespitosa</i>
		<i>Werneria nubigena</i>
		<i>Werneria pectinata</i>

Durante todo el tiempo que duró la investigación, se identificaron un total de 36 especies, de las cuales, al inicio solo se encontraron 13 especies: *Calamagrostis Vicunarum*, *Festuca dolichophylla*, *Plantago tubulos*, *Carex sp*, *Muhlebergia fastigiata*, *Geranium jaekelae*, *Lachemilla pinnata*, *Eryngyum humile*, *Eryngyum humile*, *Cerastium crassipes*, *Azorella compacta* y *Arenaria digyna*. Del mismo modo, se registraron valores de precipitación en el área de estudios mediante un pluviómetro manual.

3.2. Precipitación de la zona de estudio

El procedimiento se realizó mediante una lectura diaria a las 7 am desde octubre del 2014 hasta mayo del 2015, y desde octubre del 2015 hasta junio del 2016 tal y como lo muestra la figura 5. De los registros obtenidos, se observa que los niveles de precipitación registrados para cada temporada fueron de 708.35 y 622.11 respectivamente, lo cual significa un descenso de los niveles de precipitación con respecto a la primera temporada evaluada. Por reportes meteorológicos, se sabe que el 2015-2016 fue un año donde se presentó el fenómeno del niño, por lo que es posible que esto haya afectado en la reducción de las precipitaciones en esta zona, aunque todavía se encuentra en el rango normal del promedio anual de precipitación descrito anteriormente.

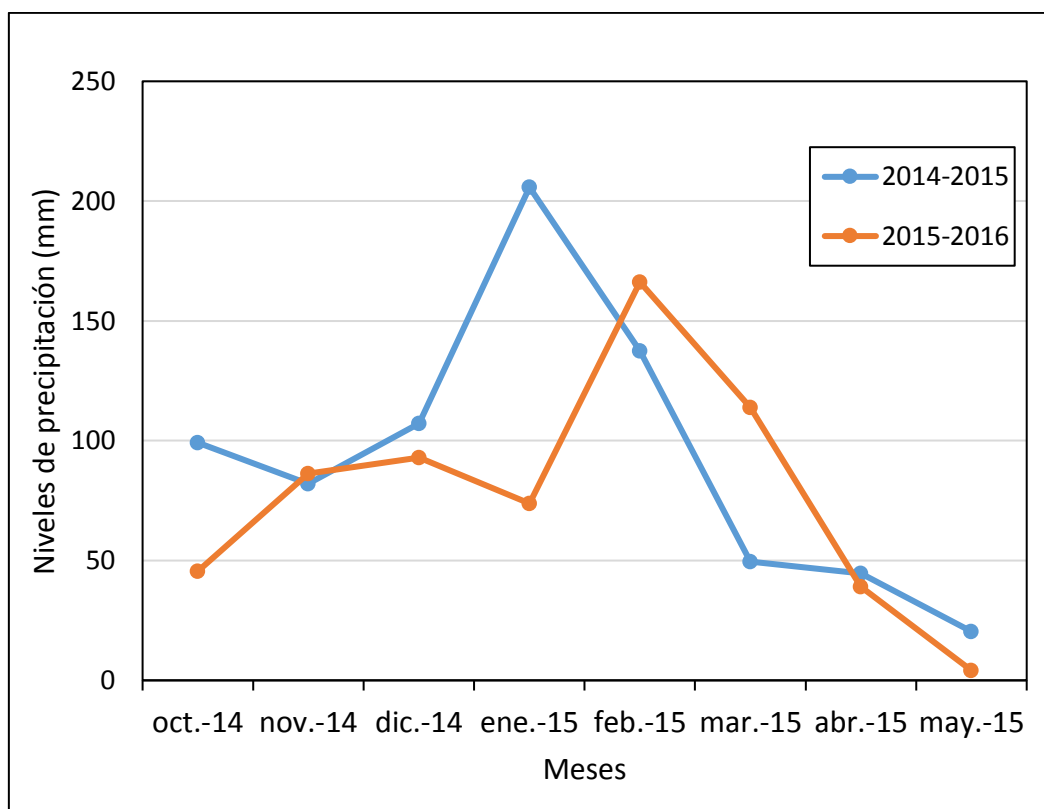


Figura 5: Niveles de precipitación en la zona de estudio para los dos años de investigación desde octubre del 2014 junio de 2016.

3.3. Construcción de interceptores de lluvia (Rainout shelters)

Como muchas veces sucede en evaluaciones de campo, los experimentos manipuladores representan una manera directa de explorar las relaciones temporales entre la precipitación anual y la productividad de los pastizales. Sin embargo, la exclusión del agua generalmente implica el uso de refugios de lluvia, que en general están formados por un techo completo que intercepta el 100% de la lluvia y requieren mecanismos complicados para mover el refugio en su lugar. El diseño de estos interceptores de lluvia (rainout shelter) descritos aquí representa una posibilidad de evaluación de las variaciones de lluvia y simular escenarios de sequía con ubicación fija.

El estudio involucró la simulación de tres niveles de suplementación de lluvia, con este fin se construyeron los “rainout shelters” (interceptores de lluvia) con los que se simularon dos escenarios de sequía. Estos interceptores se confeccionaron utilizando piezas de acrílico transparente de 1.85 metros de largo por 11 cm de ancho con una concavidad en todo el largo para poder drenar el agua de lluvia, donde el área de cada unidad fue de 2.83 m^2 ($1.85\text{m} \times 1.53\text{m}$); y así, con un techo compuesto de bandas de este material se logra interceptar diferentes cantidades de lluvia mientras que mínimamente afectan a otras variables ambientales.

Este equipo es una adaptación de otro modelo de intercepción de lluvias elaborado por Yahdjian y Sala (2002), quienes los elaboraron para una investigación en los cambios de productividad la estepa patagónica Argentina (2002). El diseño incluyó cuatro soportes de madera, dos de 1.7 metros y los otros dos de 1.1 metros, con el objetivo de tener una inclinación de 30° para facilitar la colección de la lluvia. Finalmente, las piezas de acrílico se entornillaron a una estructura de madera y luego esta estructura se entornilló a los soportes mencionados para su armado final. Se colocó una canaleta de metal de 2m de longitud en los dos soportes delanteros de madera (los de 1.53 m) con el fin de acumular el agua interceptada.

Las variaciones en la elaboración de estos interceptores realizadas en esta investigación fue principalmente las alturas respecto al suelo, área del techado de acrílicos y el material de los soportes, ya que los interceptores elaborados por Yahdjian y Sala (2002) estuvieron a una altura de 0.45 y 1.1 metros con respecto al suelo, su área fue 3.76m^2 ($2\text{m} \times 1.88\text{m}$) y utilizó soportes de metal. Las modificaciones en nuestro diseño se adecuaron de acuerdo a la altura potencial que puede llegar los grupos funcionales de nuestro ecosistemas,

especialmente las gramíneas que en su periodo de máximo crecimiento pueden alcanzar 1.3 metros (Tovar, 1993), y se utilizó madera debido a las características climáticas de la zona por la presencia de rayos y la cercanía a cables de alta tensión. Para esta investigación se simularon dos escenarios de sequía, para los cuales se diseñó dos tipos de interceptores de lluvia (figuras 5 y 6) además de un control que recibió la cantidad normal de lluvia, los cuales se describen a continuación:

- Tratamiento 1 (T1): Es el tratamiento control, el que recibirá la cantidad normal de lluvia (100% precipitación).
- Tratamiento 2 (T2): Este tendrá una reducción de 30% de las lluvias, por lo cual recibió un nivel de precipitación del 70% respecto a la cantidad normal.
- Tratamiento 3 (T3): Este tendrá una reducción de 70% de las lluvias, por lo cual recibió un nivel de precipitación del 30% respecto a la cantidad normal.

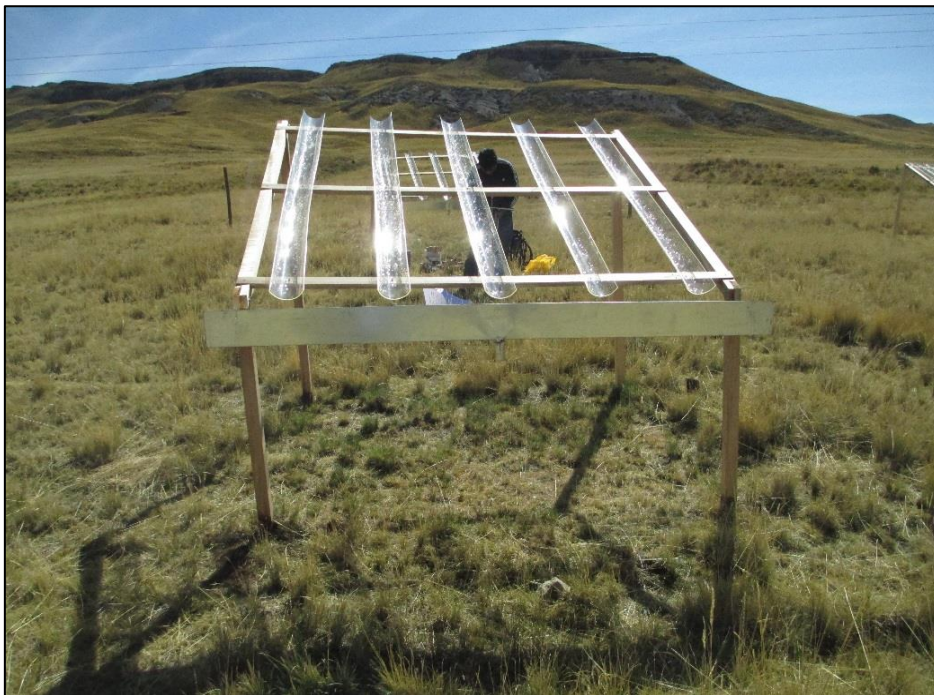


Figura 6: Modelo de interceptor de lluvia que recibe el 70% de la precipitación (T2)

En la figura 6 se muestra el modelo de interceptor para un nivel de precipitación del (70%), el cual está compuesto de 5 piezas de acrílico, a diferencia de la figura 7 que presenta 10 piezas de acrílico para simular el escenario de sequía más extremo (nivel de precipitación del 30%). En total, se construyó ocho interceptores de lluvia y las otras cuatro unidades experimentales se marcaron con estacas de madera, las cuales recibieron la cantidad normal del total de lluvias (nivel de precipitación del 100%). De esta forma, se completaron las 12 unidades experimentales que incluye la investigación.

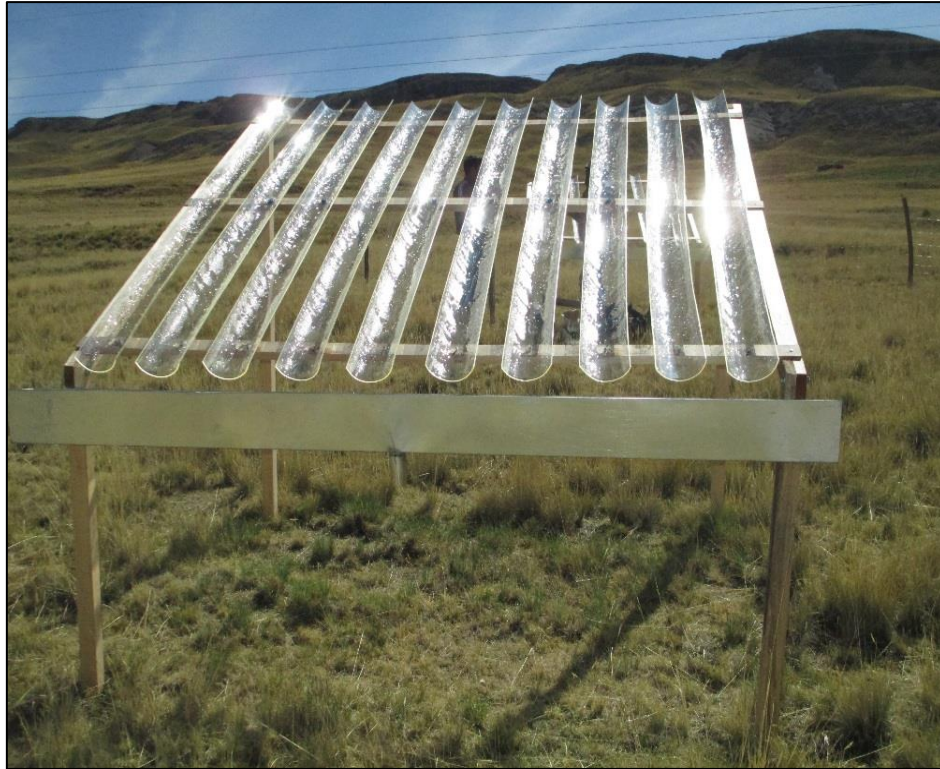


Figura 7: Modelo de interceptor de lluvia que recibe el 30% de la precipitación (T3)

La duración de esta investigación fue dividida en cuatro épocas para cada uno de los dos años de estudio, estas épocas fueron:

- Inicio de lluvias: Fecha cerca al comienzo de las primeras lluvias, representadas por los meses de octubre del 2014 y octubre del 2015 para cada año
- Pico de lluvias: Fechas donde se registraron los mayores niveles de precipitación, representados por los meses de febrero de 2015 y febrero de 2016 para cada año.
- Final de lluvias: Toma de muestra realizada inmediatamente después del final de la temporada de lluvias, representado por los meses de abril del 2015 y abril del 2016.
- Época seca: Fecha donde históricamente se registra poca o ausencia total de lluvia. Los datos fueron tomados los últimos días de junio de 2015 y junio del 2016.

3.4. Parámetros evaluados

3.4.1. Composición florística

La evaluación florística se realizó con el método de la apreciación visual de la cobertura vegetal a nivel de los tres grupos funcionales estudiados: gramíneas, graminoides y herbáceas. Para estos parámetros, cada unidad experimental se dividió en 6 cuadrantes, los cuales fueron elaborados a base de madera y tuvieron dimensiones de 0.45m x 0.5m.



Figura 8: Medición de la composición florística

Así mismo, estos cuadrantes fueron divididos en seis partes para mejorar la identificación de las especies que pertenecen a los 3 grupos funcionales estudiados. En cada cuadrante se registró el porcentaje de cobertura vegetal estimada de cada especie, para luego identificarlas y clasificarlas como gramínea, graminoide y herbácea. Una vez registrado estos valores, se realizó un promedio de grupo funcional a nivel de unidad experimental y también de tratamientos, para así determinar la composición florística de las mismas en el área estudiada y después analizar los cambios observados en la proporción de los grupos funcionales durante la duración de la investigación.

3.4.2. Vigor

Para este parámetro, se estimó la variación del volumen de dos especies claves elegidas en cada una de las épocas de estudio: *Festuca dolichophylla* y *Calamagrostis vicunarum*. Este volumen, se estimó en función de las medidas de diámetro basal, diámetro de canopia y la altura del esqueje a la hoja bandera, con las cuales se simula las dimensiones de un tronco de cono invertido bajo la siguiente relación:

$$\text{Volumen de esqueje planta: } \frac{(D + d)^2}{2} \times \pi \times h$$

Donde:

D: diámetro de canopia

d: diámetro basal

h: altura de hoja bandera

Para el diámetro basal, se midió el esqueje de cada especie clave con una regla al ras del suelo, mientras que para el diámetro de canopia se midió la longitud máxima del esqueje. Finalmente, se midió la altura de la hoja bandera con respecto al suelo. Este procedimiento se realizó en cada una de las subunidades experimentales, las cuales habían seis por cada unidad experimental (12 en toda el área de estudio); lo cual, nos da un total aproximado de 72 plantas monitoreadas para cada especie.

3.4.3. Biomasa de especies claves

Este parámetro fue estimado a partir de los resultados obtenidos del vigor de las mismas especies claves mencionadas anteriormente: *Festuca dolichophylla* y *Calamagrostis vicunarum*. Se seleccionaron seis ejemplares de cada una de las especies claves (12 en total) en tres épocas distintas: inicio de lluvia, pico de lluvia y final de lluvia.

Estas especies claves fueron colectadas y llevadas al laboratorio para pesarlas en una balanza electrónica. Con los datos de los pesos medidos y los volúmenes (vigor) calculados con la metodología descrita en el punto anterior, se elaboraron ecuaciones alométricas a partir de un análisis de regresión del peso en función al volumen calculado para cada planta, la cual se expresa de la siguiente manera.

$$peso = b(volumen) \pm e$$

De esta forma, se puede estimar la producción de biomasa de las especies claves en función a su relación peso-volumen.

3.4.4. Humedad de suelo

La humedad de suelo se midió con un barreno de tubo del Laboratorio de Utilización y Ecología de Pastizales (LEUP) de la universidad Nacional Agraria La Molina. Este tipo de barrero está hecho en su totalidad de metal, tiene aproximadamente 55 cm de longitud, un diámetro de aproximadamente 3 cm y tubo abierto de muestreo de 40 cm en el cual se colecta la porción de suelo extraído.

Para esto, el barreno se enterró mediante presión hasta los 15 cm de profundidad. Luego, se retiró el barrero con la porción de suelo colectado en su interior y finalmente se dividió en tres porciones: 0-5cm, 5-10 cm y 10-15cm. Cada muestra de suelo fue llenada en una bolsa ziploc y debidamente codificada para llevarlo después a secar en el horno del laboratorio. Este procedimiento se repitió en cada unidad experimental y las muestras se

clasificaron por tratamiento para luego medir el peso fresco de cada muestra con la balanza electrónica del laboratorio y después colocarlas en el horno a 150 °C durante 24 horas para secarlas para luego volver a pesarlas sin el contenido de agua.

La humedad fue calculada mediante gravimetría, para lo cual, se calculó la diferencia entre los pesos fresco y seco de cada muestra y luego expresarla en porcentaje respecto al peso fresco.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{peso fresco}_g - \text{peso seco}_g)}{\text{peso fresco}_g}$$

De esta forma se estimó la humedad de suelo en cada una de las unidades experimentales y luego se realizó el análisis temporal para los dos años que duró la investigación.

Es necesario mencionar que para las dos últimas mediciones, la humedad se calculó mediante el uso de un TDR (Time Domain Reflectometry) 300 adquirido por el laboratorio. La medición se basa en la medida del retraso (eco) de una señal eléctrica enviada a través del agua contenida en el suelo, mediante el cual, una onda emitida sufrirá una reflexión cada vez que se encuentre ante un cambio de medio. Para su correcto uso, se realiza una calibración tanto en agua como al aire libre para luego recién enterrar los sensores en las profundidades estudiadas.

Cada sensor tarda solo unos segundos para la medición del porcentaje de humedad del suelo, los cuales son almacenados en una memoria ubicada en el interior del TDR y luego son leídos en el software propio del equipo. Tal y como sucedió para el caso de la temperatura, los resultados obtenidos solo incluyen el análisis de los datos obtenidos a 15cm de profundidad.

3.4.5. Temperatura de suelo

La temperatura de suelo se midió utilizando los geotermómetros del Laboratorio de Utilización y Ecología de Pastizales (LEUP) de la universidad Nacional Agraria La Molina. Para esto, los geotermómetros se enterraron a tres niveles de profundidad: 5, 10 y 15 cm, y en cada lectura de datos se esperó 5 minutos para que el sensor pudiera estabilizarse. Este procedimiento se repitió en las demás unidades experimentales para cada profundidad. Por metodología, las tomas se realizaron alrededor de las 9 am, aunque varió cuando las condiciones meteorológicas (lluvias) no lo permitieron. Para visualizar mejor, los resultados presentados solo incluyen los datos a profundidad de 15cm.

3.5. Diseño estadístico

El diseño estadístico determinado para esta investigación fue una parcela dividida en bloques con arreglo factorial de 4 réplicas, 3 niveles de precipitación, 3 épocas y 2 años de datos.

De esta forma, tenemos el siguiente modelo aditivo lineal:

$$Y_{ijkl} = \mu + \beta_l + P_i + \varepsilon(P)_{il} + E_j + A_k + (PE)_{ij} + (PA)_{ik} + (EA)_{jk} + (PEA)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

$l = 1, 2, \dots, a$ (hasta "a" niveles precipitación)

$j = 1, 2, \dots, b$ (hasta "b" épocas)

$k = 1, 2, \dots, c$ (hasta "c" años)

$l = 1, 2, \dots, r$ (repeticiones)

Aquí:

μ = Media poblacional.

β_l = efecto del l-ésimo bloque

P_i = El efecto del i-ésimo nivel de precipitación.

$\varepsilon(P)_{ij}$ = error asociado a las parcelas grandes (niveles de precipitación y años)

E_j = Efecto de la j-ésima época.

A_k = efecto del k-ésimo año

$(PE)_{ij}$ = Efecto de la interacción del i-ésimo nivel de precipitación con la j-ésima época

$(PA)_{ik}$ = Efecto de la interacción del i-ésimo nivel de precipitación con el k-ésimo año.

EA_{jk} = Efecto de la interacción de la j-ésima época con el k-ésimo nivel del factor Caño

$(PEA)_{ijk}$ = Efecto de la interacción de los tres factores (precipitación, años y épocas)

ε_{ijkl} : Error residual de la interacción del i-ésimo nivel de precipitación, la j-ésima época y el k-ésimo año.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Composición florística

La composición florística es un parámetro que nos permitió la proporción de especies nativas presente en el área de estudios para luego analizar los cambios a nivel de los 3 grupos funcionales identificados para este estudio: Gramíneas, graminoides (pseudogramíneas) y herbáceas. La figura 9 se dividió en 4 partes correspondientes a cada una de las épocas estudiadas donde se realizó la comparación de los dos años de estudio.

Como era de esperarse, para cada una de las épocas encontramos que existen diferencias significativas para los tres grupos funcionales ($p < 0.0001$) y del mismo modo, también encontramos diferencias significativas en los años dos años de estudio ($p < 0.0077$).

Para la época de inicios de lluvia (a), en el primer año (2014-2015) no se observan muchas variaciones en entre los tres grupos funcionales en los tres tratamientos, sin embargo, se observó que la proporción de herbáceas fue mayor en el T1 (100% de lluvia recibida) con un 16.81%, mientras que para el T2 (70% de lluvias) y T3 (30% de lluvias) se obtuvo 15.84 y 13.32% respectivamente. La variación de este grupo en los distintos niveles de precipitación será fundamental para el análisis ya que, al ser especies de porte bajo, tener raíces cortas en su mayoría y además de ser predominada por especies anuales, es el grupo que más se verá afectado por los escenarios de sequía simulados en los tratamientos T2 y T3 (70 y 30 % de lluvia recibida respectivamente).

Para el caso de los graminoides, también se obtuvo 11.57% para el T1, que fue ligeramente mayor que el encontrado en el T2 (10.04%) y en mayor proporción que el T3 (8.01%). Respecto al grupo de las gramíneas, aparentemente se observa un incremento en los T2 y T3 (78.67 y 7.12% respectivamente) respecto al T1 (71.62%), lo cual solo se dio a nivel proporcional mas no cualitativo, pues estos resultados fueron llevados al 100% para el análisis exclusivo de los grupos funcionales. En el segundo año (2015-2016) para esta misma época, observamos que las variaciones en todos los grupos aumentaron considerablemente pues se redujo el porcentaje de graminoides en todos los tratamientos,

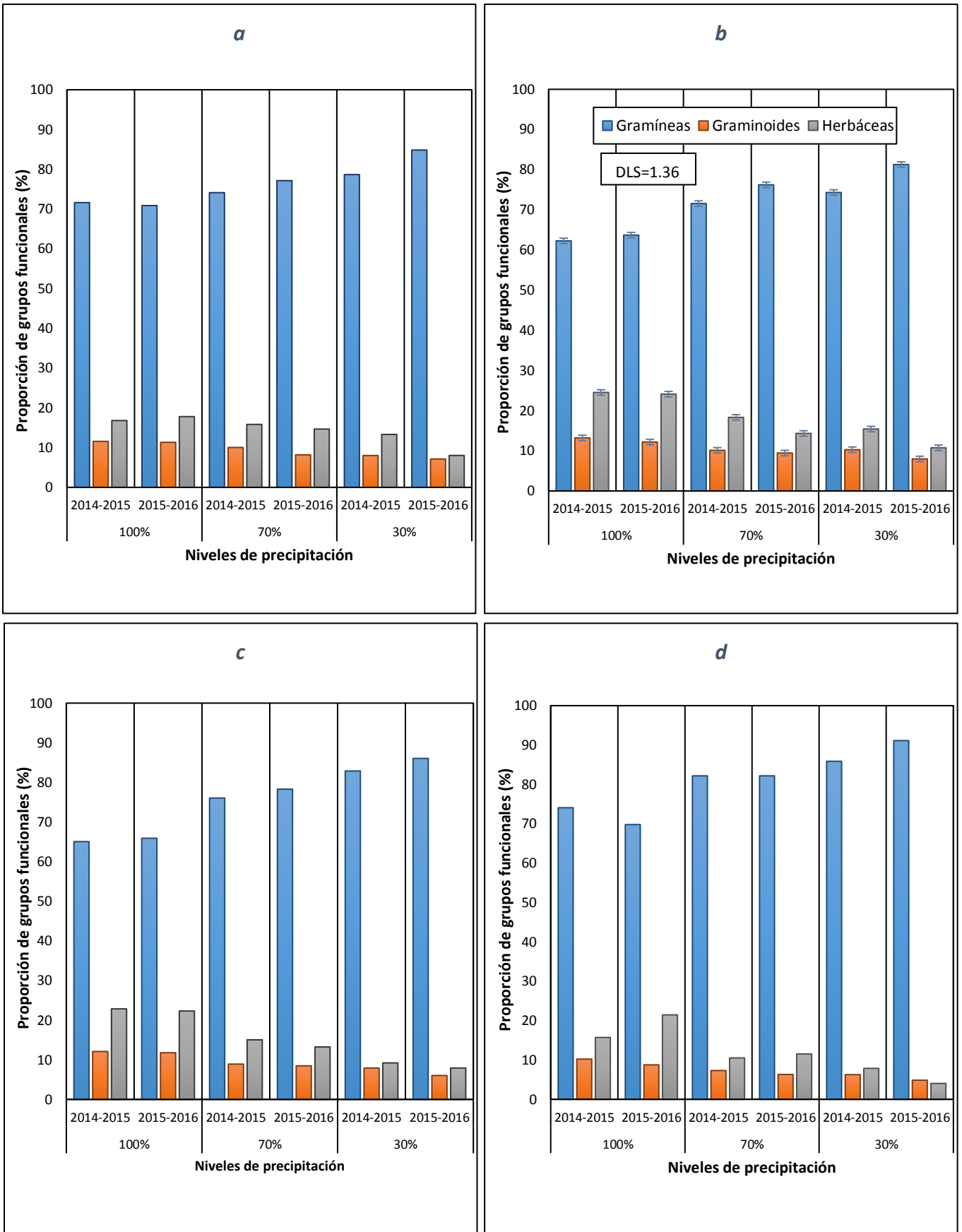


Figura 9: Variación de grupos funcionales a nivel de precipitación recibida y años para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.

mientras que en las herbáceas, solo al 100% de precipitación se registró un aumento de este grupo (17.8%), a diferencia de los descensos observados a 70% de precipitación (14.56%) y especialmente a 30% de precipitación, (8.03%) casi un 38% respecto al año anterior. Estos resultados indican que el ecosistema no vuelve a recuperarse de la misma forma a su estado anterior, y esta diferencia se hace notoria aún más en los escenarios de sequía simulados en la investigación de 70 y 30% de precipitación.

Durante la época de pico de lluvia (b), se obtuvieron los mayores porcentajes de herbáceas en el T1 para ambos años de estudio (24.53 y 24.11% respectivamente) donde hubo una ligera reducción para el 2015-2016. No obstante, para el T2 y T3, se obtuvieron mayores reducciones (14.33 y 10.75%), las cuales indican que, aún en el período de mayor cantidad de precipitaciones de todo el año, los grupos funcionales ven alterados su proporción significativamente tal y como pasó en el período de inicio de lluvias.

Para la época de Final de lluvia (c), se muestra una disminución notoria en el primer año (2014-2015) de las herbáceas en los tratamientos T2 y T3 (15.04 y 9.2% respectivamente) respecto al T1 (22.85%). Y en ambos casos, se observa que el grupo de las Gramíneas es mucho mayor en el T2 y T3 (76.05 y 82.88%, respectivamente) mientras que en el T1 fue de 65.06%. Respecto al grupo de los Graminoides, se observa un comportamiento muy similar al de las Herbáceas, donde se muestran incrementos mayores para el T1 y descensos más notorios en el T2 y T3. Como era de esperarse, en el segundo año se presentó la misma tendencia, y, al igual que pasó en las dos época anteriores, los porcentajes de graminoides y herbáceas fueron menores que los encontrados en los mismos tratamientos respecto al primer año de estudio.

Para la época seca (d), en el primer año se muestra que las herbáceas disminuyeron drásticamente en todos los tratamientos si los comparamos con los períodos de inicio de lluvia y especialmente en pico de lluvia. Como se observó anteriormente, en el T3 se observa la menor proporción de Herbáceas (7.86%) respecto a los otros dos grupos funcionales y aproximadamente un 40% menos que su valor inicial (13.32%). Sin bien es cierto que no se observan diferencias significativas en la interacción de los tres factores analizados (niveles de precipitación, época y año; $p=0.9935$), se observa claramente una tendencia en la variación de los 3 grupos funcionales. En cuanto al comportamiento de las gramíneas, si bien es cierto que para los tratamientos T2 y T3 se observa un aumento porcentual el cual alcanza su máximo valor en todos los años de investigación, como lo habíamos mencionado anteriormente, esto no se refleja en un aumento de la cantidad de

este grupo, sino refleja la reducción de los otros 2 grupos funcionales. Estas reducciones se hacen más notorias tanto para el segundo año, donde se observa un valor crítico de las herbáceas en el T3 de 4.03%, casi un 50% menos que el valor observado para el mismo período del primero año (7.86%) y más de 75% menos si se lo compara con el valor observado al inicio de la investigación (16.81%). Si bien es cierto que la prueba de medias de los años estudiados en un mis época no fueron significativos ($DLS=1.35$), se observa una tendencia clara de la reducción especialmente las herbáceas y la variación de los grupos funcionales en los dos años de estudios, las cuales, al ser procesos ecológicos, los cambios se manifiestan con mayor notoriedad en periodos de 3 a 5 años.

Estos resultados reflejan el impacto de las precipitaciones en el crecimiento y desarrollo de las plantas, pues ante eventos de sequía, la disminución de agua afecta al desarrollo y crecimiento de las raíces, las etapas fenológicas e incluso las vías fotosintéticas (Huyghe et al., 2008a, Andueza et al., 2010). Además, se encontró que, después de un período de sequía, en un pastizal de estepa patagónica muestra rezagos en su respuesta a una mayor disponibilidad de agua (Yahdjian y Sala, 2006).

Los rezagos en la recuperación de este pastizal fueron una consecuencia de las restricciones estructurales que la vegetación impuso a la recuperación de la florística de la zona de estudio. Durante la sequía, se redujo tanto la producción como la densidad especies herbáceas y arbustivas. Cuando el agua se hizo disponible después de la sequía, la densidad de las plantas apareció como el principal factor que limitaba la capacidad de la vegetación para responder al aumento de la entrada de agua (Yahdjian y Sala, 2006).

Del mismo modo, Golluscio et al. (1998) realizaron un experimento manipulador en la estepa patagónica que encontró que las gramíneas respondían siempre a los grandes eventos experimentales de precipitación de verano, mientras que los arbustos sólo lo hacían al presentarse altas precipitaciones cuando el potencial hídrico del suelo en capas profundas era bajo. La diversidad se redujo en parcelas donde se excluyó el 80% de la precipitación, lo que se explicó por una reducción en la uniformidad de las especies.

4.2. Vigor de especies claves

Como se mencionó anteriormente, las especies claves consideradas para este parámetro fueron *Festuca dolichophylla* y *Calamagrostis vicunarum*. En la figura 10 se observan los valores de vigor obtenidos para la *Festuca dolichophylla*, la cual también fue dividida en cada una de sus épocas para un mejor análisis de las variaciones del vigor en estos dos

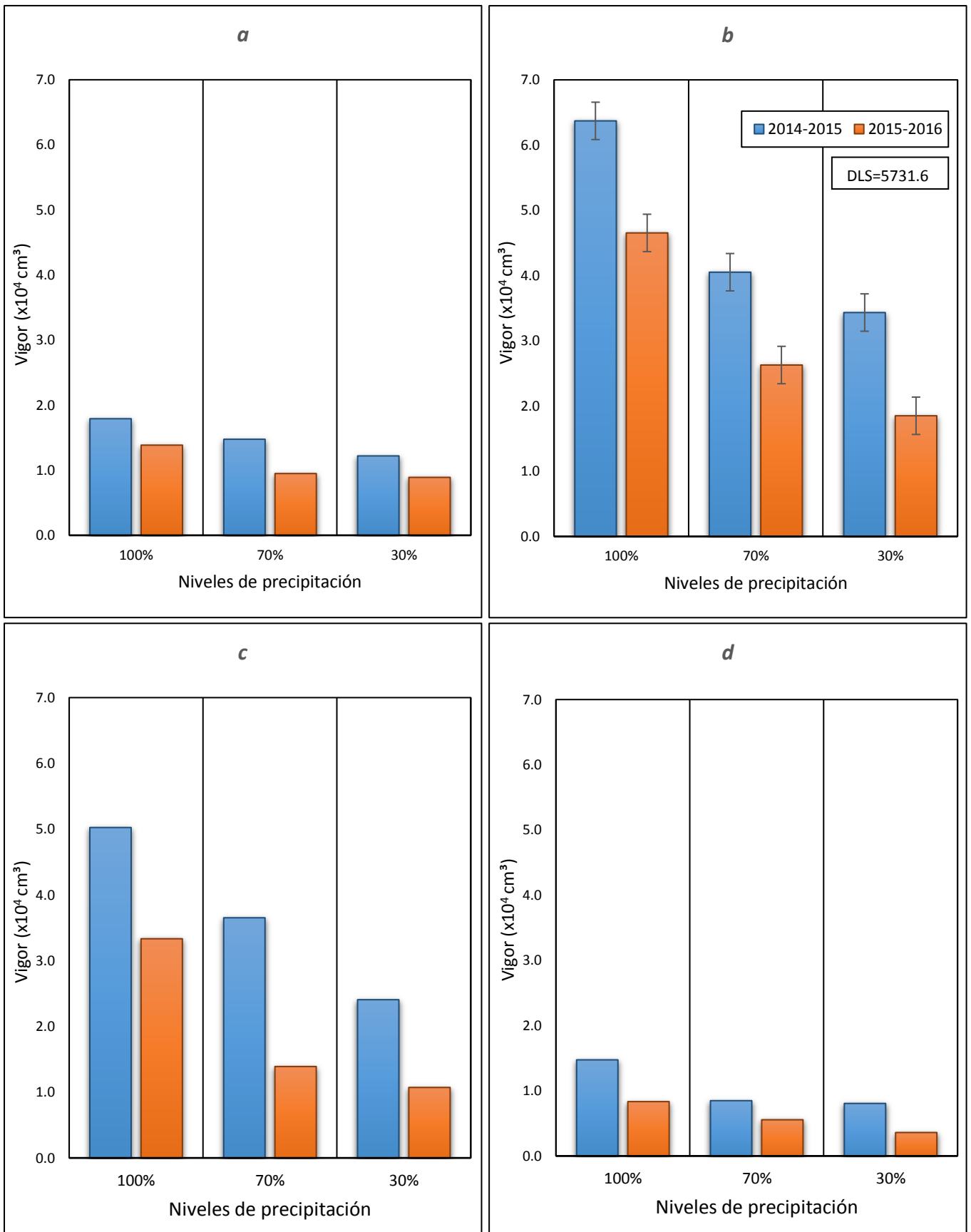


Figura 10: Variación de los valores de vigor de la *Festuca dolichophylla* para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.

años de investigación. Los resultados obtenidos en las figuras 10 mostraron diferencias significativas tanto para los niveles de intercepción ($p < 0.0001$) como los dos años de estudio ($p < 0.0001$), y como era de esperarse, también fue muy significativo para las épocas ($p < 0.0001$). Nuestro análisis resultó también significativo en la comparación de los resultados obtenidos entre los dos años para una misma época (DLS=5731.6) para ambas especies.

En el de inicio de lluvia (a), se nota el efecto de las primeras precipitaciones en el desarrollo de las plantas para la *Festuca dolichophylla*, pues en el vigor obtenido para esta especie en el T1 (100% de precipitación) fue de 179816.86 cm³, superior a los observados en el T2 (70% de precipitación) y T3 (30% de precipitación) con 14763.44 y 12206.33 cm³. Si bien se observan diferencias entre 2500 a 5000 cm³ entre cada uno de los valores obtenidos anteriormente, éstos no se reflejaron al momento de la realización de toma de datos, las plantas tuvieron dimensiones similares de diámetro basal, diámetro de canopia y altura de hoja bandera, lo cual era esperable por ser la primera toma de datos, aunque igual los resultados reflejaron el efecto de la reducción de las primeras lluvias en el crecimiento de las plantas. Cuando comparamos los valores obtenidos para el segundo año durante esta misma época encontramos que el vigor disminuyó en los 3 niveles de precipitación estudiados, entre 4000 a 5000 cm³ en todos los tratamientos. Esto nos muestra que el vigor de las especies no vuelve a recuperarse después de un evento de sequía, incluso cuando la planta recibió el nivel normal de precipitaciones.

Para la época de pico de lluvias (b), se registraron los mayores valores de vigor, específicamente a 100% de precipitación (63711.5cm³) durante el primer año (2014-2015). Sin embargo, tal y como lo muestra la figura 10, los resultados obtenidos indicaron que en esta época se encontraron las diferencias más altas entre los dos años de estudio, especialmente en aquellas unidades experimentales que recibieron el 100% de las precipitaciones, donde se observaron disminuciones de 27, 35 y 46% para T1 (100% de precipitación), T2 (70% de precipitación) y T3 (30% de precipitación) respectivamente para el segundo año.

Esta tendencia se repitió incluso con mayor intensidad para el final de lluvias (c), donde se observaron reducciones del 34, 62 y 55% para cada uno de los tratamientos T1 (100% de precipitación), T2 (70% de precipitación) y T3 (30% de precipitación), respectivamente. En la época seca (d) también se encontraron reducciones drásticas de vigor en todos los tratamientos, especialmente a un 30% de precipitación en el segundo

año (3596.81 cm³) respecto al primer año (8058.34 cm³), casi un 54% menos. Estos resultados reflejan un gran impacto de los eventos de sequía simulados en esta especie, y también de las diferencias altamente significativas que se dan en las cuatro épocas y los niveles de precipitación ($p=0.0062$), que si bien no se encontró diferencias significativas en la interacción de los tres factores estudiados ($p=0.9795$); sí se observa una tendencia clara del impacto de la reducción de las precipitaciones en el vigor de la *Festuca dolichophylla*, las cuales, en promedio general para los tres tratamientos en las cuatro épocas analizadas y los dos años estudiados fue de aproximadamente de 40%.

Para el caso de la *Calamagrostis vicunarum*, también se observó la misma tendencia que la obtenida anteriormente en la otra especie clave, las cuales se muestran en a figura 11, que al igual que el caso anterior, fue dividido en cuatro épocas (DLS=5731.6). Para inicios de lluvia (a) se reportó 8586.76 cm³ a un 100% de precipitación para el primer año, mientras que para la misma época y tratamiento del segundo año, se obtuvo 6773.27 cm³, valores que fueron muy superiores a los tratamientos T2 (70% de intercepción) y T3 (30% de intercepción), las cuales mostraron que el vigor de esta especie se redujo en 66 y 61% respetivamente para el segundo año de evaluación. Para la época de pico de lluvia (b), a un nivel de 100% de precipitación se observó una disminución (18%) ligeramente menor que la observada en el inicio de lluvia (21%) en el segundo año respecto al primero, pero en términos de cantidades (cm³), para el segundo año se registró 23816.41 cm³, poco más de 5000 cm³ menos que los mostrados en el año anterior (28902.65cm³). No, obstante, en los niveles de 70 y 30% de intercepción (T2 y T3), las reducciones obtenidas estuvieron en el orden de 49 y 41%, con 9517.27 y 7210.05cm³ respectivamente.

Tal y como sucedió para la *Festuca dolichophylla*, las diferencias más significativas en todos los tratamientos se observaron en el final de lluvias (c). Las reducciones observadas para el segundo año en cada uno de los tratamientos fueron de 46% para el T1 (100% de precipitación), 53% para el T2 (70% de precipitación) y 58% para el T3 (30% de precipitación). Para la época seca (d), las mayores diferencias las encontramos en los tratamientos T2 (70% de precipitación) y T3 (30% de precipitación), donde se obtuvieron 1463.82 y 581.07 cm³, lo cual significó una reducción del 63 y 71% del vigor de esta especie en el segundo año.

Esto muestra que la reducción de las precipitaciones ocasiona grandes impactos en el crecimiento celular de estas especies, las cuales a pesar de ser gramíneas, tampoco se recuperan de la misma forma ante eventos de sequía moderados y extremos como los que

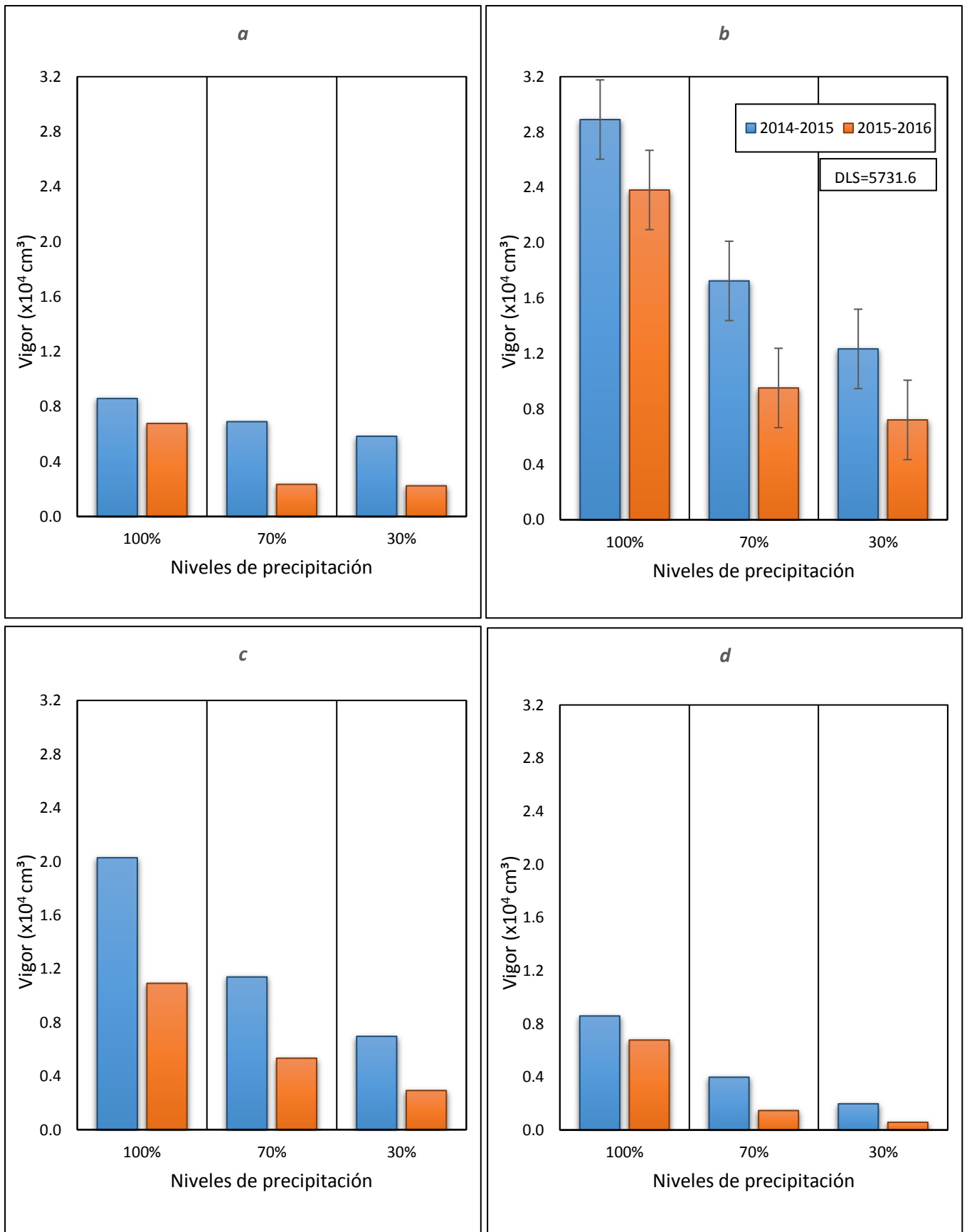


Figura 11: Variación de los valores de vigor de la *Calamagrostis vicunarum* para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.

hemos simulado en la investigación. En promedio, *Calamagrostis vicunarum* se redujo un 47% en el segundo año respecto al primero, lo cual fue un 7% más que la reducción observada en la *Festuca dolichophylla* (40%).

4.3. Biomasa

Los resultados de biomasa fueron obtenidos mediante ecuaciones alométricas que se desarrollaron descritos en el capítulo anterior, donde se muestra los valores para *Festuca dolichophylla* (figura 12) y *Calamagrostis vicunarum* (figura 13). Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas para todos los tratamientos ($p < 0.0001$), donde observamos una tendencia similar en ambas especies. Así mismo, también se encontró diferencias significativas entre las épocas estudiadas ($p < 0.0001$), los años estudiados ($p < 0.0001$); en la interacción de los niveles de precipitación y las épocas ($p < 0.0001$); y finalmente en la prueba de medias de los años dentro de una misma época (DLS=0.998). Para la *Festuca dolichophylla* (figura 12) encontramos valores de biomasa muy parecidos en los tres tratamientos para el primer año en el inicio de lluvias (a), aunque, de todas maneras, la biomasa obtenida a 100% de precipitación fue el valor más alto (17.49 gr.) respecto a los obtenidos a 70% de precipitación (16.23 gr.) y a 30% de precipitación (15.91 gr.). No obstante, para el segundo año, se observaron reducciones de biomasa de aproximadamente de 12% en el T1 (100% de precipitación), 18% para el T2 (70% de precipitación) y de 19% para el T3 (30% de precipitación), con valores de 15.47, 13.32 y 12.29 gramos respectivamente para cada tratamiento.

En la época de pico de lluvia (b), se nota una mayor variación de los valores de biomasa en los tres tratamientos, especialmente en los niveles de precipitación de 70 y 30% (T2 y T3), donde la biomasa estimada para el segundo año (2015-2016) fue de 26.53 y 24.05 gramos, lo cual significó una reducción del 36 y 27% en comparación del primer año respectivamente. Para el final de lluvias (c) se obtuvieron los descensos más significativos en los tres tratamientos (entre 4 a 5 gramos aproximadamente para cada tratamiento), que fueron de 22% para el T1 (100%), 36% para el T2 (70% de precipitación) y 27% para el T3 (30% de precipitación). En la época seca (d), las variaciones disminuyeron en todos los tratamientos, donde las reducciones más altas en el segundo año fueron de 16% para el T1 y de 13% para el T2.

Para el caso de la *Calamagrostis vicunarum*, se observó la misma tendencia. A inicios de lluvia (a), las diferencias más notorias entre los dos años de estudio fueron observadas en

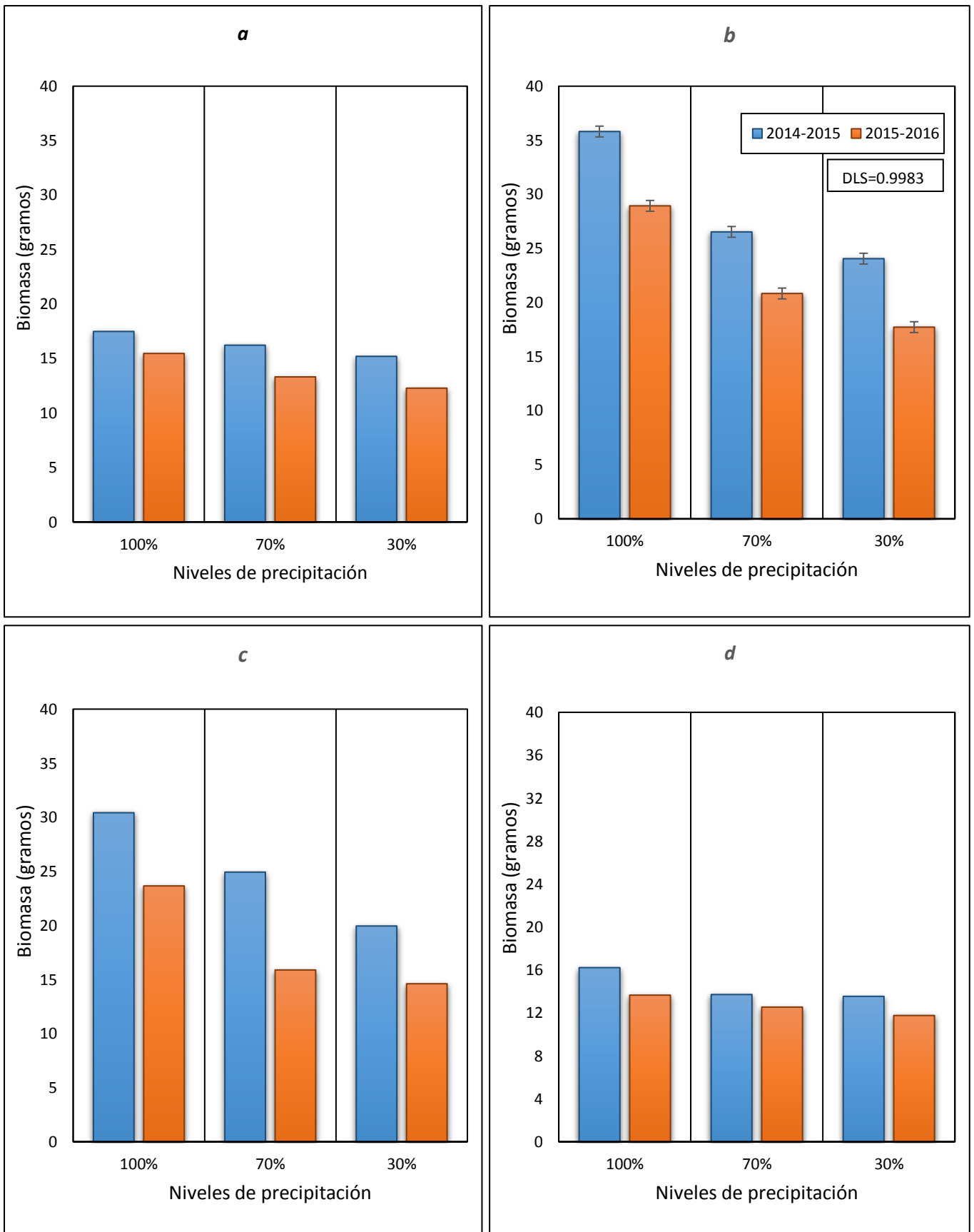


Figura 12: Variación de los valores de biomasa de la *Festuca dolichophylla* para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.

70 y 30 % de precipitación, con reducciones de 28 y 24% para cada uno. Para la época de pico de lluvia (b), estas diferencias aumentaron en todos los tratamientos, pues la biomasa en el segundo año fue de 26.43 gr. para el T1 (100% de precipitación), 15gr. para el T2 (70% de precipitación) y 13.15 gramos para el T3 (30% de precipitación), lo cual significó una variación del 13, 29 y 24% respectivamente en comparación con la biomasa obtenida en el primer período, los cuales fueron de 30.50 gr. (T1), 21.18 gr (T2) y 17.25 gr. (T3).

Tal y como pasó con el vigor, en la época de final de lluvia (c) se observaron las mayores disminuciones de biomasa en los 3 tratamientos, las cuales fueron de aproximadamente de 32% para el T1, 29% para el T2 y 25% para el T3 en el segundo año. Finalmente, en la época seca (d), las diferencias disminuyeron en los tres tratamientos, aunque las mayores variaciones se observaron en el T2 (70% de precipitación) y T3 (30% de precipitación), donde la biomasa estimada para el segundo año fue de 8.55 y 7.85 gr. en cada tratamiento, lo cual significó una reducción del 19 y 12% respectivamente en comparación al primer año.

Por lo tanto, los resultados obtenidos en las figuras 12 y 13 indican que, en promedio para el segundo año (2015-2016) en todas las épocas, la *Festuca dolichophylla* disminuyó su biomasa un 20% respecto al primer año de estudio (2014-2015), mientras que la *Calamagrostis vicunarum* redujo su biomasa en 20%. Si bien la interacción entre los tres factores evaluados (niveles de precipitación, años y épocas) no resultaron significativos, ($0.96 > 0.493$) como en los otros casos evaluados, sí se observa una tendencia clara del impacto de la disminución de las lluvias en la biomasa de ambas especies claves, más aún si comparamos las diferencias entre los años dentro de una misma época (DLS=.998) que sí resultaron significativas, lo cual confirma que la biomasa también se ve fuertemente afectada ante un evento de sequía moderado a extremo.

En una investigación realizada en la estepa de la Patagonia argentina, Yahdjian encontró mayores valores de producción primaria neta (PPNA) total en parcelas que no habían experimentado sequía que en parcelas con un historial de déficit de precipitación. Este resultado se observó tanto en parcelas de regadío, donde simuló un año húmedo, como en parcelas que recibieron la cantidad de precipitación del sitio durante el tercer año experimental. Además, estos niveles de PPNA también apoyaron la hipótesis de que los retrasos en la recuperación de los PPNA después de los períodos de sequía son proporcionales a la intensidad de la sequía previa. Como consecuencia, el legado relativo de la sequía aumentó con el aumento de la intensidad de la sequía, pues se observó que la

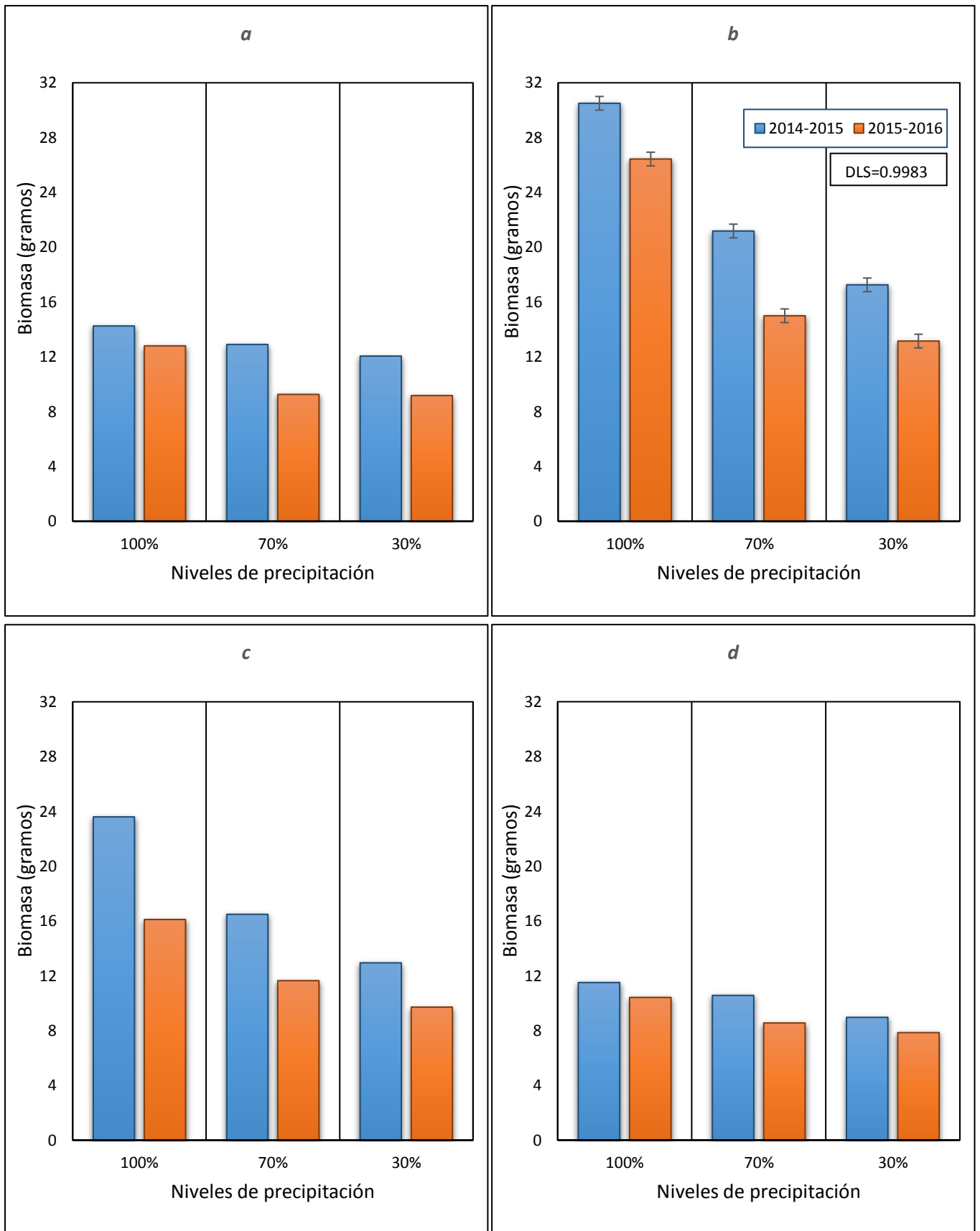


Figura 13: Variación de los valores de biomasa de la *Calamagrostis vicunarium* para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.

PPNA en parcelas que tuvieron 80% de intercepción (es decir, que solo recibieron un 20% de lluvia), fue menor que aquellas que tuvieron un 33 y 50% de intercepción (Yahdjian y Sala, 2006).

4.4. Humedad de suelo

Los resultados obtenidos de la humedad de suelo se muestran en la figura 14, en la cual, como se dijo en el capítulo anterior, solo se analizará la variación de la humedad de suelo a una profundidad de 15 cm. La figura 14 muestra que se encontraron diferencias significativas entre los niveles de precipitación ($p < 0.0001$), lo cual se refleja en todas las épocas de estudio, donde también encontramos diferencias significativas ($p < 0.0001$). A nivel de años de estudio, también encontramos diferencias significativas ($p < 0.0001$), donde la tendencia se repite en todas las épocas del segundo año. Para las interacciones época-niveles de precipitación, también se encontraron diferencias significativas ($p = 0.0037$), al igual que las interacciones entre los niveles de precipitación y años resultaron significativos ($p = 0.0017$); lo cual se hizo más notorio en la prueba de medias entre los años de estudio una misma época ($DLS = 0.9534$) que también fue significativo.

Para el período de inicio de lluvia (a) la diferencias encontradas entre el primer y segundo año fue de apenas 1.17% a 100% de precipitación (29.47% para el 2014-2015 y 29.3% para el 2015-2016); mientras que al 70% de precipitación, la humedad varió 3.15% (de 27.04% en el primer año a 23.88% en el segundo año) y al 30% de precipitación se redujo en 3.42% (de 26.2% en el primer año a 22.78% en el segundo año); así mismo, entre los tratamientos observamos que en ambos años la humedad fue mucho mayor a 100% de precipitación ue en los otros dos tratamientos.

Para la época de pico de lluvia (d), encontramos diferencias similares entre los años de estudio, las cuales se redujeron un 2.57% para el T2 (70% de precipitación) y 1.95% para el T3 (30% de precipitación). Durante el final de lluvia (c), encontramos una reducción importante del contenido de humedad para los tres tratamientos, especialmente en los T2 (70% de precipitación) y T3 (30% precipitación), las cuales se redujeron en los do años de estudio de 28.45 a 25.98% y de 26.55 a 22.42% respectivamente.

Para la época seca (d) observamos descensos significativos en los niveles de humedad, donde encontramos una marcada diferencia entre el 20.78% encontrado para el T3 respecto al 24.68% y 22.68% encontrado para el T1 y T2 respectivamente durante el primer año. En el segundo año, encontramos 16.86% de humedad a 30% de precipitación,

una reducción de más de 4% respecto al primer año, que equivaldría a un 25% menos, muy por debajo de los niveles mínimos reportado por Ñaupari (2000) de 21% para los lugares aledañas al área de investigación.

Como en el caso de la humedad de suelo, se observa una tendencia de la reducción de la humedad en los diferentes niveles de precipitación en las cuatro épocas de estudio y el segundo año, pero no encontramos diferencias significativas entre la interacción de estos 3 factores ($p=0.3363$). Esto se confirma con los resultados obtenidos en el segundo año, donde observamos reducciones de 4 a 6% de humedad para los T2 y T3 para el inicio de lluvias, mientras que el T1 solo se redujo en 1.17% (20.3%) para la misma época respecto al primer año. El contenido de humedad varía con las profundidades y tiende a ser relativamente complejo y variable debido a la alta recarga de agua del suelo de precipitación y evapotranspiración; por tanto, ante eventos de sequías, la escasez de agua conduce a una menor conductancia estomática ya una fotosíntesis reducida, así como a una menor producción de biomasa (Chaves et al., 2002).

Leitinger et al. (2015) realizaron una investigación acerca de los efectos de la sequía en dos pastizales alpinos de diferentes características climáticas, sitios que fueron denominados como Lautaret y Stubai. En cuanto a los efectos globales de la sequía en cada sitio, Lautaret reveló mayores valores de humedad del suelo que Stubai, aunque Lautaret se caracteriza por un clima más seco, por lo cual, se esperaba que la sequía tuviese un efecto más fuerte sobre la humedad del suelo. Sorprendentemente, en condiciones "normales", no se encontraron diferencias claras en los patrones de humedad del suelo entre los dos sitios. Este resultado sugiere que, aunque la humedad media del suelo a lo largo de la temporada no difirió significativamente entre los dos sitios, la mayor dinámica de la humedad del suelo reportada por Obojes et al. (2014) en el sitio más seco del Lautaret promovió el establecimiento de comunidades vegetales adaptadas a condiciones generalmente más secas. Estos resultados confirman

En otras palabras, el agotamiento de la humedad del suelo en condiciones secas fue menor en Lautaret que en Stubai, lo que indica diferentes retroalimentaciones de la planta impulsadas por diferentes condiciones climáticas (es decir, ya sea la cantidad de precipitación o la frecuencia). El impacto de la sequía en Lautaret fue la reducción de la humedad del suelo que osciló entre el 22,7% y el 36,4%. Estos resultados están en línea con los hallazgos del estudio de Benot et al. (2013), quienes observaron una disminución de la humedad media del suelo de entre 28% y 32% en un sitio de praderas subalpinas en

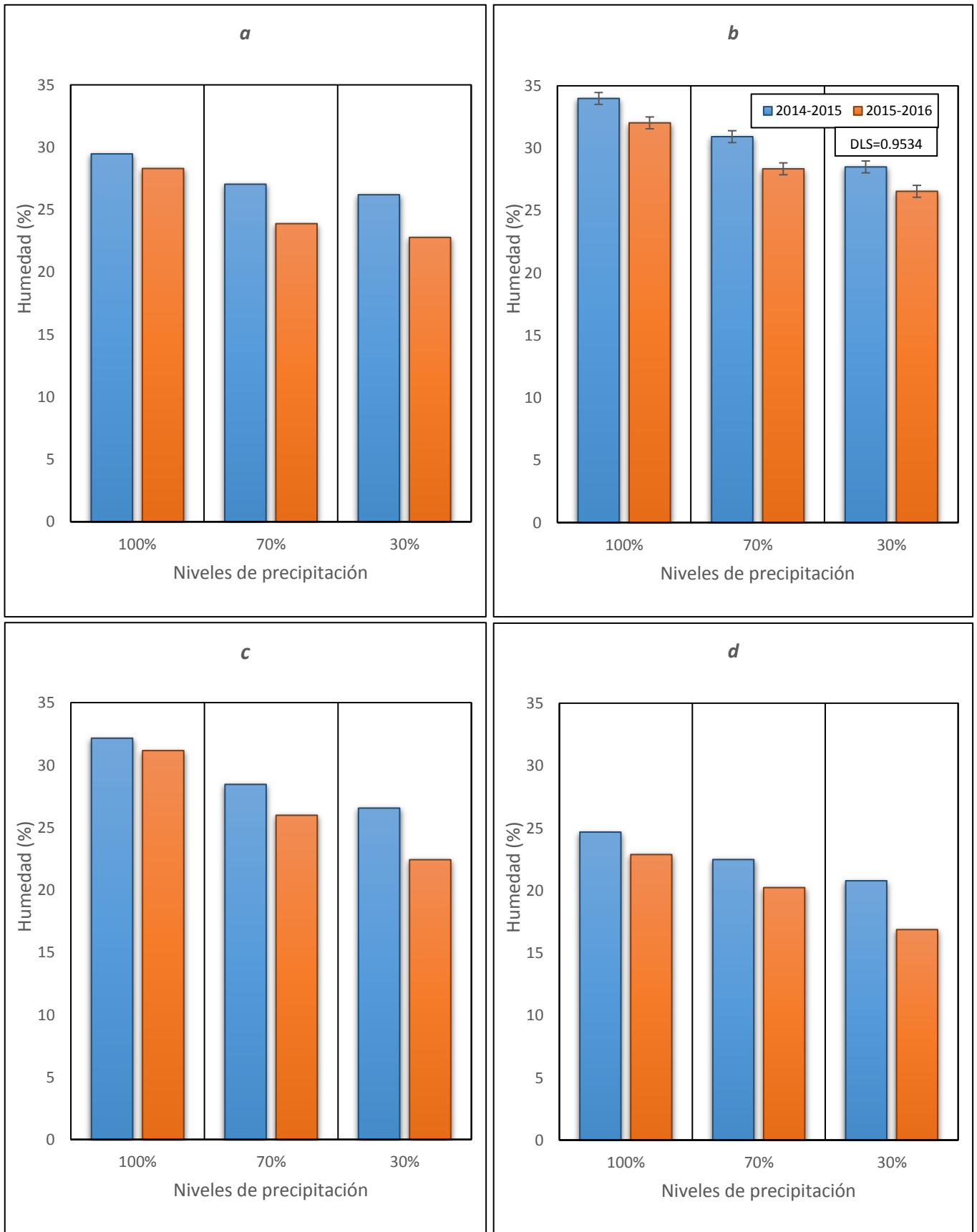


Figura 14: Variación de los valores de humedad de suelo para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.

Lautaret (alpes franceses) durante una sequía extrema simulada en julio y agosto (precipitación del 80%). La humedad del suelo restante fue superior a su punto de marchitez, lo que indica que las comunidades de plantas seguían una estrategia de "ahorro de agua" para evitar daños estructurales o fisiológicos. Esto es corroborado por los hallazgos del estudio de Benot et al. (2013a) en Lautaret, donde la estructura comunitaria de una pradera subalpina no se vio afectada después de 2 años de sequía consecutiva en verano debido a comunidades de plantas bien adaptadas. Por el contrario, en Stubai, la humedad del suelo disminuyó entre 26,3% y 43,3%, alcanzando el punto de marchitez para la mayoría de los tipos de pastizales. Los experimentos realizados por Brillì et al. (2011) confirmaron que al menos las especies de plantas dominantes no eran sensibles a largos periodos de sequía hasta alcanzar una humedad del suelo muy baja ($<0,10\text{m}^3\text{m}^{-3}$). Estas investigaciones apoyan los resultados obtenidos en la variación de la composición florística descrita anteriormente, donde se ve que, ante eventos de sequía (30 y 70% de intercepción de lluvias), el grupo de las gramíneas fue el que menos se redujo en comparación a los gramínoideos y sobre todo, a las herbáceas, las cuales tienen mecanismos de adaptación ante eventos de estrés hídrico que las ayudan a soportar mejor la falta normal de suministro de agua.

Estos resultados están en línea con los encontrados por Yadhjian y Sala (2002) en la estepa patagónica de Argentina, quienes analizaron el contenido de agua a tres niveles de intercepción (30%, 50% y 80%); además de un control que recibió el normal de lluvias. La humedad de suelo a 0-15 y 0-30 cm de profundidad fue significativamente menor ($P < 0.05$) en las parcelas de los tratamientos que en los controles excepto en enero (pico de la estación de crecimiento y mínimo de precipitación), pero no se encontraron diferencias entre los tres niveles de los tratamientos de intercepción de seis de las siete fechas que ellos evaluaron (de mayo de 1999 a enero del 2001). Sólo en noviembre de 2000 la humedad del suelo bajo el tratamiento del 30% fue significativamente mayor que la humedad del suelo bajo los tratamientos de 50% y 80% de sequía. El contenido de agua del suelo más allá de 20 cm de profundidad fue significativamente menor y diferente del contenido de agua del suelo fuera de los interceptores de lluvia (control).

Della Chiesa et al. (2014) evaluaron los cambios en el ciclo hidrológico de las praderas a lo largo de un gradiente de elevación en los Alpes. Sus resultados indicaron las condiciones de estrés hídrico de la vegetación en cada año a menor altitud (1000 msnm) y una temperatura media anual de 8.1-9.5°C y una precipitación anual de 580 a 636 mm.

A medianas altitudes (1500 msnm., temperatura media de 5.3-7.1 ° C, precipitación de 632-686mm), solo un año más cálido y más seco causó sequía, mientras que no se observó estrés hídrico a mayor altitud (2000 msnm, temperatura media de 2,5-3,5 ° C, precipitación de 620 - 706 mm). En nuestro estudio, sí encontramos una disminución importante de la humedad de suelo a diferentes escenarios de sequía, las cuales se acentuaron más en el segundo año para aquellos que tuvieron mayor intercepción de lluvias (T3). Esto corrobora nuestros hallazgos de que las comunidades de plantas bien adaptadas pueden hacer frente fácilmente a las reducciones en la precipitación sin afectar fuertemente a ET.

En otro estudio realizado en el norte de China, Zheng et al. (2015) encontraron que la humedad del suelo disminuyó con la profundidad en los sitios forestales, mientras que aumentó en los 30 cm superiores y luego disminuyó por debajo de 30 cm en pastizales. Se consumía más agua del suelo más profundo por los árboles de raíces profundas, y se consumía más agua del suelo superficial por pastos de poca profundidad (18-25 cm); Y el agua del suelo fue recargada menos en un suelo profundo (40 cm) tanto en el bosque como en el pastizal.

Li, Xia y Ma (2015) encontraron que un aumento en la temperatura del suelo superficial corresponde a una disminución en el contenido de humedad del suelo y que a la vez se correlaciona negativamente con los cambios de temperatura diurna. También Zhen et al. (2015) encontraron que la temperatura y la humedad en el suelo superficial (10 cm) están generalmente correlacionadas negativamente, pero las variaciones entre temperatura y humedad están positivamente correlacionadas en un suelo más profundo (30 cm y 40 cm de profundidad). Además, encontró que la evaporación del suelo superficial es alta cuando la temperatura del suelo también es alta, donde el calor específico y la conducción de calor se son aproximadamente 3 y 24 veces más altos, respectivamente, en el suelo que en el aire (Zhu et al., 2014). Esto indica que el suelo con mayor humedad es más capaz de conducir la energía térmica del suelo superficial durante el día y mantener una humedad de suelo estable en la noche, que puede explicar la relación positiva entre la temperatura del suelo y el contenido de humedad de suelo a mayores profundidades según ese estudio. Este contenido de humedad también fue correlacionado significativamente con otras propiedades del suelo como porosidad, pH, densidad del suelo, contenidos de materia orgánica y nitrógeno total del suelo, lo cual confirma la importancia de la humedad del suelo en el crecimiento y desarrollo de los pastizales.

4.5. Temperatura de suelo

Los resultados obtenidos de la temperatura de suelo se muestran en la figura 15, en la cual, al igual que sucedió con la humedad de suelo, solo se analizará la variación de la temperatura de suelo a una profundidad de 15 cm. En la figura observamos nuevamente se encontraron diferencias significativas entre los niveles de precipitación ($p < 0.0001$), lo cual se refleja en todas las épocas de estudio, donde también encontramos diferencias significativas ($p < 0.0001$).

Para el período de inicio de lluvia (a) la temperatura encontrada tanto a 100 como a 70% de precipitación en el primer año de estudio fueron las mismas (8.1°C), mientras que a 30% de precipitación fue de 7.5°C . Para la época de pico de lluvia (b), encontramos diferencias más notorias entre los tres tratamientos, los cuales, como en el caso de la humedad, fueron los mayores valores de humedad de todo el año en los tres tratamientos, donde se obtuvo 11.8°C para T1 (100% de precipitación), 11.3°C para el T2 (70% de precipitación) y finalmente 10.1°C para el T3 (30% de precipitación).

Para la época de final de lluvia (c), encontramos una reducción de la temperatura en los tres tratamientos, aunque en este caso, la temperatura en el T3 (9.5°C) fue mayor que en el T2 (9.4°C). No obstante, estos datos fueron ligeramente superiores que los encontrados a inicio de la temporada de lluvia. Sin embargo, para la época seca (d) observamos descensos significativos en las temperaturas, donde encontramos una marcada diferencia entre el muy bajo para el T3 con 6.6°C respecto a los, igualmente bajos, 8.8 y 7.8°C encontrado para el T1 y T2 respectivamente. A nivel de años de estudio, también encontramos diferencias significativas ($p < 0.0001$), las cuales se observan en la figura 14 donde la tendencia se repite en todas las épocas del segundo año.

Las interacciones entre niveles de precipitación-época ($p = 0.0002$) y las de épocas-año ($p < 0.0001$) fueron bastante significativas; mientras que la interacción de los tres parámetros ($p: 2.69 > 0.0207$) no fue muy significativa al igual que tampoco se encontró diferencias significativas entre las medias de los años de estudio en una misma época ($\text{DLS} = 0.594$); al igual que entre los niveles de precipitación-años de estudio (0.7775). No obstante, sí se observa una tendencia de la reducción de la temperatura en los diferentes niveles de precipitación en las cuatro épocas de estudio y el segundo año. Para el inicio de lluvias del segundo año (a), se observa aumentos de temperatura de 1.3° para el T1 (100% de precipitación) y para el T2 (70% de precipitación), los cuales fueron de 9.4°C

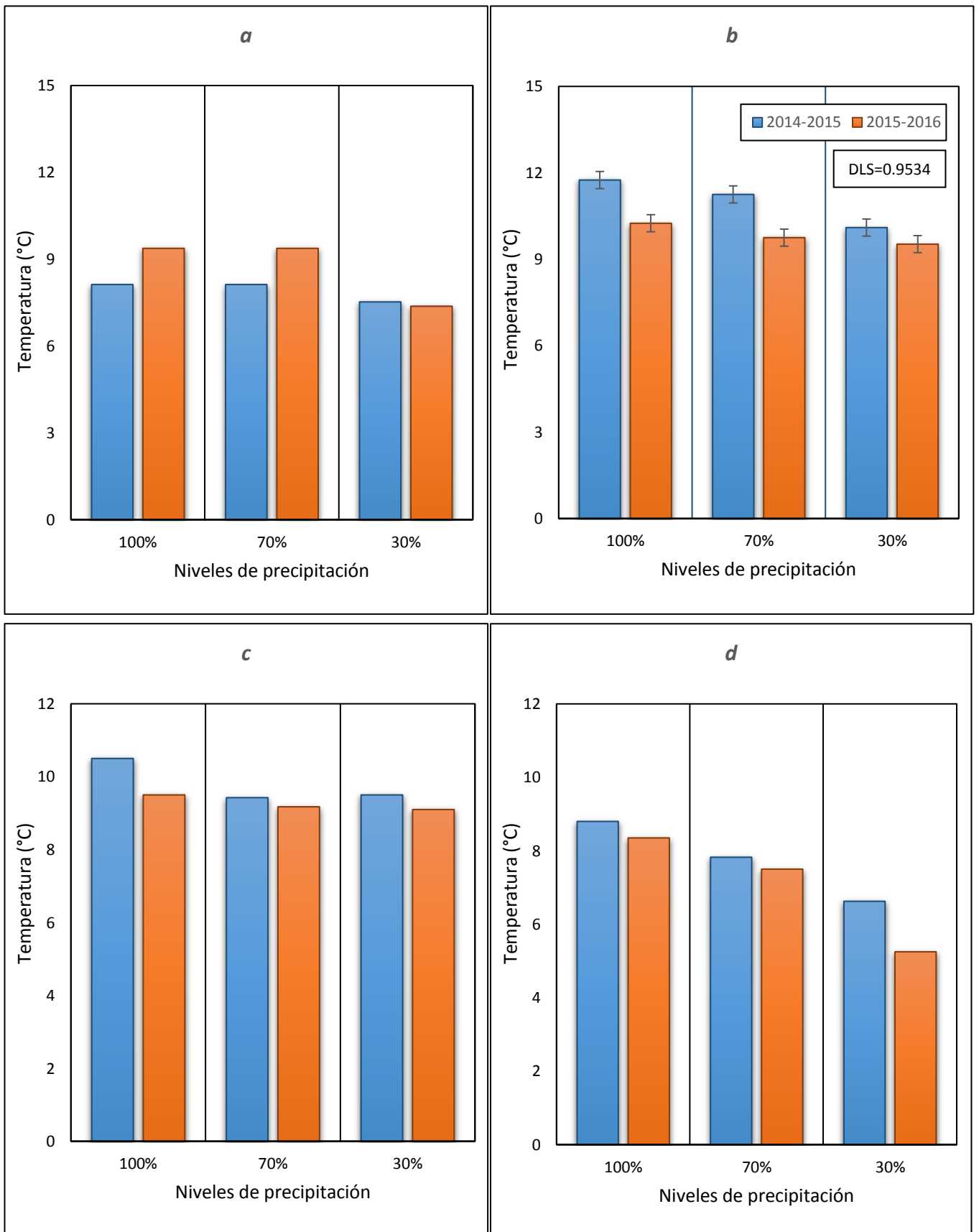


Figura 15: Variación de los valores de humedad de suelo para cada una de las épocas estudiadas: inicio de lluvias (a, b, c y d). Los tratamientos T1, T2 y T3 representan un nivel de precipitaciones al 100, 70 y 30% respectivamente.

en ambos casos, mientras que la temperatura del T3 (30% de precipitación) fue de 7.4°, ligeramente menor que la obtenida el año anterior en la misma época (7.5°C). Para el período de pico de lluvia (b), se observaron reducciones de temperatura para los tres tratamientos, donde nuevamente la temperatura registrada en el T3 (9.5°C) fue menor que los registrados en el T1 y T2 (10.3 y 9.4°C respectivamente). Para el final de lluvia (c) se observa una tendencia similar a la época anterior, mientras que las mayores reducciones de temperatura de suelo se observan para la época seca del segundo año (d), donde encontramos valores bajos de temperatura de 8.4°C para T1, 7.5°C para T2 y un valor muy crítico de 5.5°C para el T3, 1.1°C menos que el encontrado para el mismo periodo en el primer año, y 2.8°C menos (35%) que el encontrado al inicio de la investigación en el T1. para.3, casi un 25% menos que el año anterior para la misma época, y una reducción de aproximadamente 43% respecto al valor inicial de humedad de suelo encontrado. Estas temperaturas finales de la época seca (d) fueron mucho menores a 7°C recomendado por Korte y col (1987), el cual es el mínimo necesario para un adecuado desarrollo y crecimiento de la planta, por lo que es posible especular que, las plantas de las unidades experimentales que están con solo un 30% de precipitación ya estaría atravesando por un estrés hídrico.

Guntiñas et al. (2013) encontraron que la mineralización total de materia orgánica en los tres suelos de pastizales distintos es más sensible a la temperatura que la mineralización de materia orgánica recalcitrante y que además encontró que es evidente que las variaciones en la humedad del suelo alteran la sensibilidad a la temperatura del proceso de descomposición y pueden amplificar o reducir los efectos directos de la temperatura en la respiración del suelo.

Muchos estudios han sugerido que la germinación de la semilla y el crecimiento de la estación temprana estaban más correlacionados con la temperatura máxima del suelo diario (siempre y cuando los mínimos no sean letales) que con la temperatura del aire. (Green, Harder y Oliver, 1984). Song et al. (2013) encontraron que la reducción de la altura y densidad de la vegetación disminuyó la diferencia entre las temperaturas del aire y del suelo en la estación de crecimiento. Esto es causado por la reducción de la altura y densidad de la vegetación que puede aumentar el flujo de calor entre el suelo y la atmósfera. La variación de la diferencia entre las temperaturas del aire y del suelo puede alterar el microambiente y afectar la estructura y dinámica de las comunidades vegetales (Song et al., 2013). Por ejemplo, la tasa de crecimiento subterráneo y subterráneo de las

plantas respondería a la variación de temperatura (Green, Harder y Oliver, 1984), lo que a su vez influiría en las interacciones y reacciones entre la planta y el suelo. Zheng (2011) encontró que la disminución de la diferencia de temperatura entre el suelo y el aire afectadas significativamente la siembra de altura y masa, la longitud de raíz, el número de raíces finas de convólculo así como su distribución.

En otros estudios, Russell y Appleyard (1915, citados por Wildung et al. 1975) encontraron que la concentración de CO₂ del aire del suelo dependía de la temperatura en los meses más fríos y del agua del suelo en los meses más cálidos. Por otra parte, los estudios actuales que indicaron que la tasa de respiración era generalmente mayor a temperaturas del suelo por encima de 15°C y con contenido de agua por encima del 6-10 %, los cuales difieren de los valores obtenidos en temperatura, pues ninguno llegó 15°C, aunque es necesario mencionar que solo se analizó la temperatura tomadas a 10 cm profundidad y a las 9 am, las cuales en pico de lluvia aumentaron y también se registró temperaturas por encima de los 12°C en el tratamiento T1 a 5cm de profundidad. Sin embargo, en la estepa arbustiva, los organismos del suelo respondieron a los cambios en el contenido de agua en el suelo a temperaturas tan bajas como 6 ° C y a los cambios en la humedad del suelo a un contenido tan bajo como 1-2%, lo cual habla de la adaptación y los mecanismos contra la sequía de estas estepas arbustivas.

El efecto positivo del contenido de agua en la tasa de respiración indicó que las condiciones aeróbicas requeridas para la descomposición heterotrófica prevalecieron por encima de 6 °C (Raney, 1965; Thimann, 1967). Este dato resulta muy interesante, pues en nuestros resultados, encontramos temperaturas extremas de 5.3°C para el T3 en el segundo año, donde se ve claramente la disminución porcentual del grupo de las herbáceas debido a la alteración en el metabolismo como consecuencia del estrés hídrico y esta alta disminución de temperatura.

El efecto del contenido de agua en la tasa de respiración dependía de la temperatura, lo que sugiere que se produjeron cambios distintos en los tipos de organismos, números y actividad metabólica (Thimann, 1967) en respuesta a los cambios de temperatura. Se puede concluir que la temperatura y la humedad del suelo fueron los principales factores que influyeron en la descomposición de la raíz de las plantas y la tasa de CO₂ en los suelos de los pastizales. Además, a largo plazo, este efecto combinado de la temperatura y la humedad será más que importante para influir en el flujo de C en el suelo.

V. CONCLUSIONES

- La proporción de herbáceas disminuyó con la reducción de la precipitación en los dos niveles simulados (70 y 30 %) para el primer año, en tanto que las gramíneas se aumentaron relativamente en estos dos escenarios. Este efecto varió según los años de estudio y en las cuatro épocas, cuyas diferencias se hicieron más notorias en el segundo año y en la época seca.
- El vigor de las especies claves se redujo considerablemente en los escenarios de sequía creados (70 y 30 % de precipitación), lo cual se hizo más notorio en el segundo año en en la época seca. Entre estas dos especies evaluadas, la *Calamagrostis vicunarum* tuvo mayor reducción de vigor (47%) respecto a la *Festuca dolichophylla* (casi un 40%), lo cual indica que esta última especie se adaptó mejor a la ausencia de lluvias.
- La biomasa estimada de las dos especies claves también mostró una tendencia similar a la observada en los resultados de vigor de ambas especies. Sin embargo, a diferencia del vigor, las mayores variaciones entre los dos años de estudio las encontramos al final de lluvias, (28% para *Festuca dolichophylla* y 29% para *Calamagrostis vicunarum*), las cuales variaron en promedio 20 y 21% de su biomasa respectivamente.
- La humedad del suelo fue influenciada directamente por la disponibilidad de agua en las cuatro épocas. En tanto, debido a la menor precipitación del segundo año respecto al primero, las variaciones se hicieron más notorias para el segundo año, especialmente en la época seca, donde se observó reducciones de 25% respecto del primer año e incluso llegando a valores críticos de 14.4% a un nivel de 30% de precipitación.
- La temperatura de suelo mostró una tendencia similar a la humedad, aunque se registró un incremento en el inicio de lluvias del segundo año a un nivel de 100 y 70 % de precipitación. No obstante, la mayor diferencia se notó en la época seca, especialmente a un nivel de precipitación del 30%, donde se una diferencia de 2°C y un valor crítico de 5.4 °C, por debajo de la temperatura límite para el crecimiento radicular.

VI. RECOMENDACIONES

- Esta investigación tuvo como principal objetivo estudiar la variación de los grupos funcionales con la reducción de las precipitaciones, por tanto, para analizar mejor la estructura florística, se recomienda incluir el análisis de especies anuales y perennes de cada grupo funcional para un mejor conocimiento de la adaptabilidad de las especies a la sequía.
- Así mismo, será importante extender más el tiempo de estudio de esta investigación pues los cambios a nivel ecológico son más notorios entre períodos de 3 a 5 años de monitoreo. Así mismo, para estudiar mejor el efecto de las sequías, es importante seleccionar un lugar adecuado lejos de zonas de acumulación de agua y alto drenaje hidráulico, donde el único suplemento de agua disponible para las plantas sea las precipitaciones.
- El vigor de las especies se analizó en términos de volúmenes obtenidos de sus dimensiones florales, sin embargo, se recomienda hacer un seguimiento de las etapas fenológicas de cada especie para tener un mayor conocimiento de impacto de la reducción de las lluvias en el crecimiento y desarrollo de estas especies..
- La biomasa fue estimada utilizando ecuaciones alométricas en relación al vigor obtenido anteriormente, por tanto, se recomienda realizar tomas de muestra en campo y hacer un seguimiento durante las épocas y años de estudio para observar con mayor detalle los cambios en la producción de biomasa aérea.
- La toma de datos de temperatura y humedad de suelo solo fue analizada a un nivel de profundidad específico (10 cm) y solo una vez al día, por lo cual se recomienda aumentar el número de muestras por lo menos tres veces al día para estudiar el efecto de los cambios de temperatura a distintas horas del día y también la variación a distintas profundidades.
- El estudio de las especies fue importante para analizar la capacidad de adaptación de cada una a los distintos niveles de sequía simulados. No obstante, ambas pertenecen al

grupo de las gramíneas, por lo tanto, será importante incluir especies que pertenezcan a los otros 2 grupos de familias florísticas (graminoides y herbáceas) para un mejor estudio de la capacidad de adaptación de los pastizales altoandinos a los efectos del cambio climático.

- Este estudio resulta importante porque la simulación pudo ser controlada dentro de un área de trabajo relativamente pequeña. No obstante, si se quiere analizar ecosistemas de pastizales de mayor extensión, será importante el uso de tecnología como los sistemas de información geográfica y los sensores remotos con el debido seguimiento para ver las variaciones en el tiempo-espacio.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, T. L. 1985. Soil-plant water relation in the altiplano of Peru. M.S. Thesis, Texas Tech University. Lubbock, TX.

Andueza, D., Cruz, P., Farruggia, A., Baumont, R., Picard, F., Michalet-Doreau, B., 2010. Nutritive value of two meadows and relationships with some vegetation traits. *Grass Forage Sci.* 65, 325–334.

Aldridge G.D., W. Inouye, J.R.K. Forrest, W.A. Barr y A.J. Miller-Rushing. 2011. Emergence of a mid-season period of low floral resources in a montane meadow ecosystem associated with climate change. *Journal of Ecology* 99: 905-913.

Avalos O., P.Y. 2006. Dinámica de la producción forrajera y perfil alimentario de vacas lecheras al pastoreo en una asociación gramínea – leguminosa en la sierra central. Tesis Mag. Sci. Lima – Perú. 117 p.

Archer S. 1996. Assessing and interpreting grass-woody plant dynamics. 101-134 in J. Hodgson and A. W. Illius, editors. *The ecology and management of grazing systems.* CAB International, Wallingford, UK.

Ball, D., Collins, M., Lacefield, G., Martin, N., Mertens, D., Olson, K., Putnam, D., Under-sander, D., Wolf, M., 2001. Understanding forage quality. *American Farm Bureau Federation Publication 1-01*, Park Ridge, IL.

Barnes, P.W. (1985). Adaptation to water stress in the big bluestem – sand bluestem complex. *Ecology*, 66: 1908-1920.

Barker, D.J., Caradus, J.R., 2001. Adaptation of forage species to drought. In: *Proceedings of the XIX international grassland congress: Grassland ecosystems: An outlook into the 21st Century*, pp. 241–246.

Baron, V.S., and G. Belanger. 2007. Climate and forage adaptation. p. 83–104. In R.F Barnes et al. (ed.) *Forages: The science of grassland agriculture.* 6th ed. Blackwell, Ames, IA.

- Bassiri Rad, H. y Radin, J W.(1992)"Temperature-dependent water and ion transport properties of barley and sorghum roots, II. Effects of abscisic acid" *Plant Physiol.*, 99,34-37
- Benot ML, Saccone P, Vicente R, Pautrat E, Morvan-Bertrand A, Decau ML, Grigulis K, Prud'homme MP, Lavorel S. 2013b. Subalpine grasslands. *Plant Ecology Divers* 6: 393–404. DOI: 10.1080/17550874.2013.784818.
- Blum, 2009. "Plant Breeding for Water-Limited Environments" Chapter 2, *Plant Water Relations, Plant Stress and Plant Production*, pp 11-52, oct 2010.
- Boyer, J., S, and Bowen, B, L (1970). Inhibition of oxygen evolution in chloroplasts isolated from leaves with low water potentials ..*Plant Physiol* 4.5,612-615.
- Brown, R.H. and Blaser R.E. (1970). Soil moisture and temperature effects on growth and soluble carbohydrates of orchardgrass (*Dactylis glomerata*). *Crop Science*, 10: 213-216.
- Buxton, D.R., 1996. Quality-related characteristics of forages as influenced by plantenvironment and agronomic factors. *Anim. Feed Sci. Technol.* 59, 37–49.
- Bruinenberg, M.H., Valk, H., Korevaar, H., Struik, P.C., 2002. Factors affecting digestibility of temperate forages from seminatural grasslands: a review. *GrassForage Sci.* 57, 292–301.
- Castañeda, Arellano, Sánchez, 2007. "Efecto de una quema controlada en los artrópodos epígeos de pasturas en la sais Túpac Amaru, Junín – Perú". Laboratorio de Ecología de Procesos. Departamento Académico de Biología. Universidad Nacional Agraria La Molina. Av. La Molina S/N. *Revista de Ecología Aplicada*.
- Flores A. 1989. Los Pastizales en el Perú. *Revista del INIA.* 1(3): 15.
- Chaves MM, Pereira JS, Maroco J, Rodrigues ML, Ricardo CPP, Osório ML, et al. . How plants cope with water stress in the field: photosynthesis and growth, *Annals of Botany* , 2002, vol. 89 (pg. 907-916).
- Chicahuala S. 2001. "Respuestas fenológicas de dos gramíneas C3 y dos C4, del pastizal natural de San Luis (Argentina), a variaciones de agua y temperatura.", Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires; Recursos naturales-EEA INTA San Luis.

Cleland E.E, N.R. Chiariello., S.R. Loarie, H.A. Mooney y C.B. Field. 2006. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 103: 13740-13744.

Colabelli, M.R., Agnusdei, M.G. y Durand J-L. 2011. "Grupos funcionales de plantas, producción de forraje y eficiencia de uso de radiación de pastizales naturales en condiciones potenciales y limitadas de agua y nitrógeno." *Revista de Investigación Agraria*. Vol 37 N31, Argentina.

Crespo G. 2011. "Comportamiento de la materia orgánica del suelo en pastizales, Instituto de Ciencia Animal", Apartado Postal 24, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, Tomo 45, Número 4.

Davidson, E.A.; Janssens, I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 2006, 440, 165–173.

Day, T. A" Heckathorn, S.,A., y DeLucia, E, H. (1991)., Limitations of photosynthesis in *Pinus taeda* L (loblolly pine) at low soil temperatures., *Plant Physio/.* 96, 1246-1254.

De Boeck, H.D.; Lemmens, C.; Zavalloni, C.; Gielen, B.; Malchair, S.; Carnol, M.; Merckx, R.; Van den Berge, J.; Ceulemans, R.; Nijs, I. Biomass production in experimental grasslands of different species richness during three years of climate warming. *Biogeosciences* 2008, 5, 585–594.

Della Chiesa S, Bertoldi G, Niedrist G, Obojes N, Endrizzi S, Albertson JD, Wohlfahrt G, Hörtnagl L, Tappeiner U. 2014. Modelling changes in grassland hydrological cycling along an elevational gradient in the Alps. *Ecohydrology* 7: 1453–1473. DOI: 10.1002/eco.1471.

DeLucia, E, H, (1986), Effect of low-root temperature on net photosynthesis, stomatal conductance and carbohydrate concentration in Engelmann spruce (*Picea engelmannii* Pany ex Engelm.) seedlings, *Tree Physiol*" 2, 143-154"

Durand, J.L., Gonzalez-Dugo, V., Gastal, F., 2010. How much do water deficits alter the nitrogen nutrition status of forage crops? *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 88,231–243.

Espigares, T. and Peco B. (1995). Mediterranean annual pasture dynamics: impact of autumn drought. *Journal of Ecology*, 83: 135-142.

FAO 2009. "Grasslands: enabling their potential to contribute to greenhouse gas mitigation". Informe anual preparado por un grupo de 27 expertos miembros del grupo de trabajo de Pastizales y Carbono en el marco del consejo mundial de la The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) reunido en Roma, Italia del 15 al 17 abril del 2009.

Fay, P.A., 2009. Precipitation variability and primary productivity in water-limited ecosystems: how plants leverage precipitation to finance growth. *New Phytol.* 181, 5–8.

Flores A. 1989. Los Pastizales en el Perú. *Revista del INIA.* 1(3): 15.

Florez A. 2005. *Manual de Pastos y Forrajes Altoandinas.* OIKOS. Lima-Perú. 53 p. & Malpartida E. 1987. *Manejo de praderas nativas y pasturas en la región alto andina del Perú.* Banco Agrario. Fondo del libro. Tomo I. Lima-Perú. 335 p.

Frank, A.B., Bittman S. and Johnson D.A. (1996). Water relations of cool-season grasses. In: *Cool-season forage grasses.* pp. 127-164. Madison: American Society of Agronomy.

Gilgen A. K. and N. Buchmann, 2009. "Response of temperate grasslands at different altitudes to simulated summer drought differed but scaled with annual precipitation". Institute of Plant Sciences, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

Grant, K., Kreyling, J., Dienstbach, L., Beierkuhnlein, C. y Jentsch, A. Water stress due to increased intra-annual precipitation variability reduced forage yield but raised forage quality of a temperate grassland, 2014. *Disturbance Ecology*, BayCEER, University of Bayreuth, 95440 Bayreuth, Germany. *Biogeography*, BayCEER, University of Bayreuth, 95440 Bayreuth, Germany.

Green F H W, Harding R J, Oliver H R. The relationship of soil temperature to vegetation height. *J Climatol*, 1984, 4: 229–240.

Golluscio RA, León RJC, Perelman SB (1982) Caracterización fitosociológica de la estepa del Oeste de Chubut; su relación con el gradiente ambiental. *Bol Soc Arg Bot* 21:299–324

Heisler-White, Knapp, Kelly Eugene. 2008. Increasing precipitation event size increases aboveground net primary productivity in a semi-arid grassland, July.

Holdridge LR (1967) Life zone ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. 206 pp.

Horst, G.L. and Nelson C.J. (1979). Compensatory growth of tall fescue following drought. *Agronomy Journal*, 71: 559-563.

Huete A.R., K. Didan, Y.E. Shimabukuro, P. Ratana, S.R. Saleska, L.R. Hutya, W. Yang, R.R. Nemani, y R. Myneni. 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season *Geophysical Research Letter*. 33: 1-4.

Huyghe, C., Baumont, R., Isselstein, J., 2008. Plant diversity in grasslands and feedquality. *Grassl. Sci. Eur.* 13, 375–386.

Instituto Geofísico del Perú, (IGP) 2005. Vulnerabilidad Actual y Futura ante el Cambio Climático y Medidas de Adaptación en la Cuenca del Río Mantaro. Consejo Nacional del Ambiente – CONAM. Av. Guardia Civil 205, San Borja.

Jackson, D.K. (1974). The course and magnitude of water stress in *Lolium perenne* and *Dactylis glomerata*. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)*, 82: 19-27.

JuPP, A P., and Newman, E. L (1987) ..Morphological and anatomical effects of severe drought on the roots of *Lolium perenne* L *New Phytol.* 105,393-402.

Kramer, P. J.; Boyer, J. S., 1995. Water relations of plants and soils. Department of Botany Duke University Durham, North Carolina. College of Marine Studies and College of Agriculture University of Delaware, Sharp Campus Lewes, Delaware.

Kreyling, J., Beierkuhnlein, C., Elmer, M., Pritsch, K., Radovski, M., Schloter, M., Wollecke, J., Jentsch, A., 2008. Soil biotic processes remain remarkably stable after 100-year extreme weather events in experimental grassland and heath. *Plant Soil* 308, 175–188.

Larcher W. 2000. Temperature stress and survival ability of Mediterranean sclerophyllous plants. *Plant Biosystems*. 134: 279-95.

Leafe, E.L., Jones M.B. and Stiles W. (1977). The physiological effects of water stress on perennial ryegrass in the field. *Proceedings of the 13th International Grassland Congress*. pp. 253-260.

Leitinger, G.; Ruggenthaler, R.; Hammerle, A.; Lavorel, S.; Schirpke, U.; Clement, J.C.; Lamarque, P.; Obojes, N.; Tappeiner, U.; 2015. Impact of droughts on water provision in

managed alpine grasslands in two climatically different regions of the Alps. *Ecohydrology*.

Li, M. X., Ma, Z. G., & Niu, G. Y. (2011). Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China. *Chinese Sci. Bull.*, 56(17), 1809-1820. <http://dx.doi.org/10.1007/s11434-011-4493-0>.

Li HX, Xia ZQ, Ma GH. Effects of water content variation on soil temperature process and water exchange. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*.2007; 35(2): 172–175.

Joshi, C., Mohanty, B. P., Jacobs, J. M., & Ines, A. V. M. (2011). Spatiotemporal analyses of soil moisture from point to footprint scale in two different hydroclimatic regions. *Water Resour. Res.*, 47(1), W01508. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR009002>.

Malpartida E. 1987. Manejo de praderas nativas y pasturas en la región alto andina del Perú. Banco Agrario. Fondo del libro. Tomo I. Lima-Perú. 335 p.

Marengo.2011. “Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twenty first century projections of regional temperature and precipitation over South America”.

McCarty J.P. 2001. Ecological consequences of climate change. *Conservation Biology*. 15: 320-331.

McNaughton, S. J., M. Oesterheld, D. A. Frank, and K. J. Williams. 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341:142–144.

McNaughton, S.J., O.E. Sala, and M. Oesterheld. 1993. Comparative ecology of African and South American arid to subhumid ecosystems, p. 548-567, In P. Goldblatt, ed. *Biological relationships between Africa and South America*. Yale University Press, New Haven, CT, USA.

Musser, R, L, Thomas, S.,A, y Kramer, P I. (1983),.Short and long term effects of root and shoot chilling of Ransom soybean,. *Plant Physio*{ . 73, 778-783.

Nippert, J.B., Knapp, A.K., Briggs, J.M., 2006. Intra-annual rainfall variability andgrassland productivity: can the past predict the future? *Plant Ecol*. 184,65–74.

Norberg, P, and Liljenberg, C (1991). Lipids of plasma membranes prepared from oat root cells. *Plant Physio.* 96, 1136-1141.

Obojes N, Bahn M, Tasser E, Walde J, Inauen N, Hiltbrunner E, Saccone P, Lochet J, Clément JC, Lavorel S, Tappeiner U, Körner Ch. 2014. Vegetation effects on the water balance of mountain.

Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., Micale, F., 2011. Impacts and adaptation of European cropproduction systems to climate change. *Eur. J. Agron.* 34, 96–112.

O'Mara F.P; 2012. The role of grasslands in food security and climate change. The Irish Agriculture and Food Development Authority, Research Directorate, Head Office, Oak Park, Carlow, Ireland.

Pearson, G.A., 1942. Herbaceous vegetation a factor in natural regeneration of ponderosa pine in the Southwest. *Ecol. Monogr.* 12, 315–338.

Pendall, E.; Bridgham, S.; Hanson, P.J.; Hungate, B.; Kicklighter, D.W.; Johnson, D.W.; Law, B.E.; Luo, Y.; Megonigal, J.P.; Olsrud, M. Below-ground process responses to elevated CO₂ and temperature: A discussion of observations, measurement methods, and models. *New Phytol.* 2004, 162, 311–322.

Peñuelas J., I. Filella y P. Comas. 2002. Changed plants and animal cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology.* 8: 531-544.

Rany W. A. (1965) Physical factors of the soil as they affect soil microorganisms. in: *Ecology of Soil-Borne Plant Pathogens* (K. F. Baker and W. C. Snyder. Ed.) pp. 1 15--i 19. University of California Press, Berkeley.

Reddy, B.V.S., Reddy, P.S., Bidinger, S., Blümmel, M., 2003. Crop management factors influencing yield and quality of crop residues. *Field Crops Res.* 84,57–77.

Ritchie, J.T. and Burnett E. (1971). Dryland evaporative flux in a sub-humid climate: II. Plant influences. *Agronomy Journal*, 63: 56-62.

Rickard, D.S. and Fitzgerald P.D. (1970). The effect of soil moisture and irrigation on pasture production in Canterbury, New Zealand. *Proceedings of the 11th International Grassland Congress* pp. 487-492.

- Russell E. J. and Appleyak A., (1915) The atmosphere of soil: its composition and the causes of variation. *1.&gric. Se/. 7. 1-48.*
- Saglam, A., Kadioglu, A., Terzi, R., Saruhan, N., 2008. Physiological changes in themin post-stress emerging *Ctenanthe setosa* plants under drought conditions. *Russ.J. Plant Physiol. 55, 48–53.*
- Sankaran, M. and McNaughton S.J. (1999). Determinants of biodiversity regulate compositional stability of communities. *Nature, 401: 691-693.*
- Sanaullah, M.; Chabbi, A.; Rumpel, C.; Kuzyakov, Y. Carbon allocation in grassland communities under drought stress followed by ¹⁴C pulse labeling. *Soil Biol. Biochem. 2012, 55, 132–139.*
- SENAMHI. 2007. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Centro de Predicción Numérica – CPN, “Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Mantaro para el año 2100”.
- SENAMHI PERÚ (1988). Mapa de clasificación climática del Perú. Método de Thornthwaite. Eds. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima. 9 pp.
- Sharp, R. E., and Davies, W. J (1979) .Solute regulation and growth by roots and shoots of waterstressed maize plants, *Planta 147, 43-49.*
- Sharp, R E., Hsiao, T.,G, and Silk, W..K (1990). Growth of maize primary root at low water potentials .II. Role of growth and deposition of hexose and potassium in osmotic adjustment *Plant Physiol 93, 1337-1346.*
- Sherry R.A., X. Zhou, S. Gu, J.A. Arnone, D.S. Schimel, P.S. Verburg, L.L. Wallace e Y. Luo. 2007. Divergence of reproductive phenology under climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA. 104: 198-202.*
- Stampfli, A., Zeiter, M., 2004. Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-year study in southern Switzerland. *J. Ecol.92, 568–576.*
- Steinaker D.F. y S.D. Wilson. 2008. Phenology of fine roots and leaves in forest and grassland. *Journal of Ecology. 96: 1222-1229.*

Subramanian, K.S., Charest, C., 1995. Influence of arbuscular mycorrhizae on the metabolism of maize under drought stress. *Mycorrhiza* 5, 273–278.

Svenningsson, H., and Liljenberg, C. (1986) ..Membrane lipid changes in root cells of rape (*Brassica napus*) as a function of water deficit stress. *Physiol. Plant* ..68,53-58.

Teskey, R. O., Grier, C C, and Hinckley, T M (1985) ..Relations between root system size and water inflow capacity of *Abies amabilis* growing in a subalpine forest. *Can J For Res* 15,669- 672.

Thimann K. V. (1967) *The Lijh of Bactwiu*. Macmilhan, New York.

Tilman, D. and Downing J.A. (1994). Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 367: 363-365.

Tovar.1993. “Las Gramíneas (Poaceae) del Perú” Volumen 13 de Monografías del Real Jardín Botánico Ruizia: Real Jardin Series. CSIC Press.

Vergara, W.; Deeb, A.; Leino, I.; Kitoh, A.; Escobar, M. Assessment of the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology: Development of a Methodology through a Case Study in the Andes of Peru.

Vogel, Fester, Eisenhauer, Scherer-Lorenzen, Schmid, Weisser, Weigelt 2013. “Separating Drought Effects from Roof Artifacts on Ecosystem Processes in a Grassland Drought Experiment”.

Westgate, M E.and Boyer, J. S.,(1985) ..Osmotic adjustment and the inhibition of leaf, root, stem and silk growth at low water potentials in maize,. *Planta* 164, 540-549.

Wildung, R. E.; Gauland, T. R.; and R. L. Buschbom, R.L. The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. Ecosystems Department. Battelle. Pacific Northwest Laboratories. Richland Washington 99352 U.S.A.

Yahdjian L., Sala O. E., A rainout shelter design for intercepting different amounts of rainfall, august 2002.

Yahdjian L., Sala O. E. 2008. Climate change impacts on South American rangelands.

Yahdjian L. y Osvaldo 2011. El futuro de los pastizales sudamericanos, feb. *Interciencia*, Vol. 36 N°2.

Yaranga. 2009. Alimentación de camélidos sudamericanos y manejo de pastizales, Módulo de Camélidos Sudamericanos I, Huancayo, Marzo.

Yu H., E. Luedeling y J. Xu. 2010. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Ecology*. 107: 22151-22156.

Zhang, N., & Liu, C. Y. (2014). Simulated water fluxes during the growing season in semi-arid grassland ecosystems under severe drought conditions. *J. Hydrol.*, 512, 69-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.056>.

Zheng H, Gao J, Teng Y, Feng C, Tian M.; 2015. Temporal variations in soil moisture for three typical vegetation types in inner Mongolia, northern China. *PLoS One*. 2015 Mar 17;10(3):e0118964. doi: 10.1371/journal.pone.0118964.

Zheng W. The study on plant seedling growth strategy. Doctor Dissertation. Changchun: Northeast Normal University, 2011.

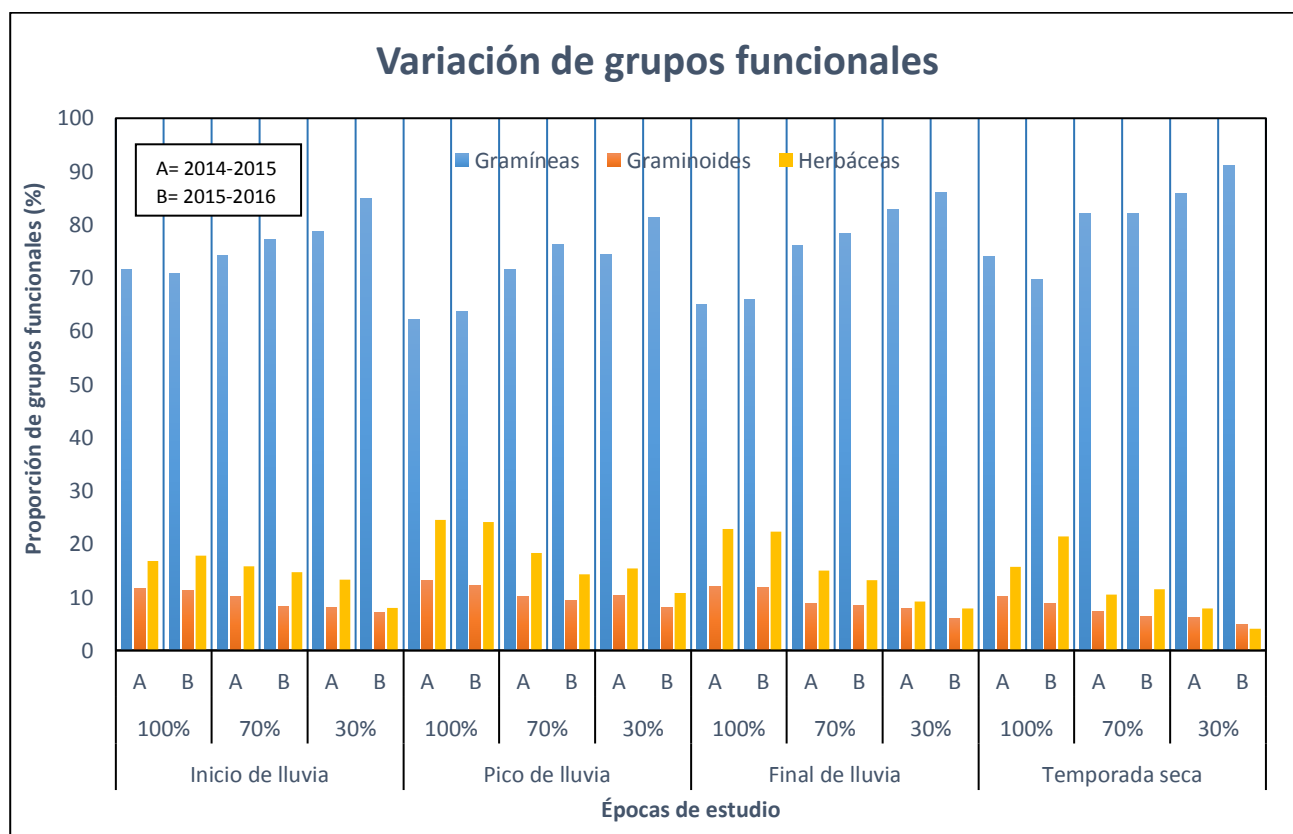
Zhu, H. D., Shi, Z. H., Fang, N. F., Wu, G. L., Guo, Z. L., & Zhang, Y. (2014). Soil moisture response to environmental factors following precipitation events in a small catchment. *Catena*, 120, 73-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.003>.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Variación temporal de los grupos funcionales en los dos años de estudio

Grupos funcionales (%)	Inicio de lluvia			Pico de lluvia			Final de lluvia			Temporada seca		
	Temporada 2014-2015											
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Gramíneas	71.62	74.12	78.67	62.26	71.56	74.31	65.06	76.05	82.88	74.07	82.17	85.87
Graminoides	11.57	10.04	8.01	13.21	10.12	10.27	12.09	8.91	7.91	10.22	7.31	6.27
Herbáceas	16.81	15.84	13.32	24.53	18.32	15.42	22.85	15.04	9.21	15.71	10.52	7.86
Temporada 2015-2016												
Gramíneas	70.87	77.14	84.84	63.7	76.22	81.27	65.91	78.29	86.05	69.79	82.17	91.12
Graminoides	11.33	8.19	7.13	12.19	9.45	7.98	11.78	8.47	6.03	8.76	6.31	4.85
Herbáceas	17.8	14.67	8.03	24.11	14.33	10.75	22.31	13.24	7.92	21.45	11.52	4.03

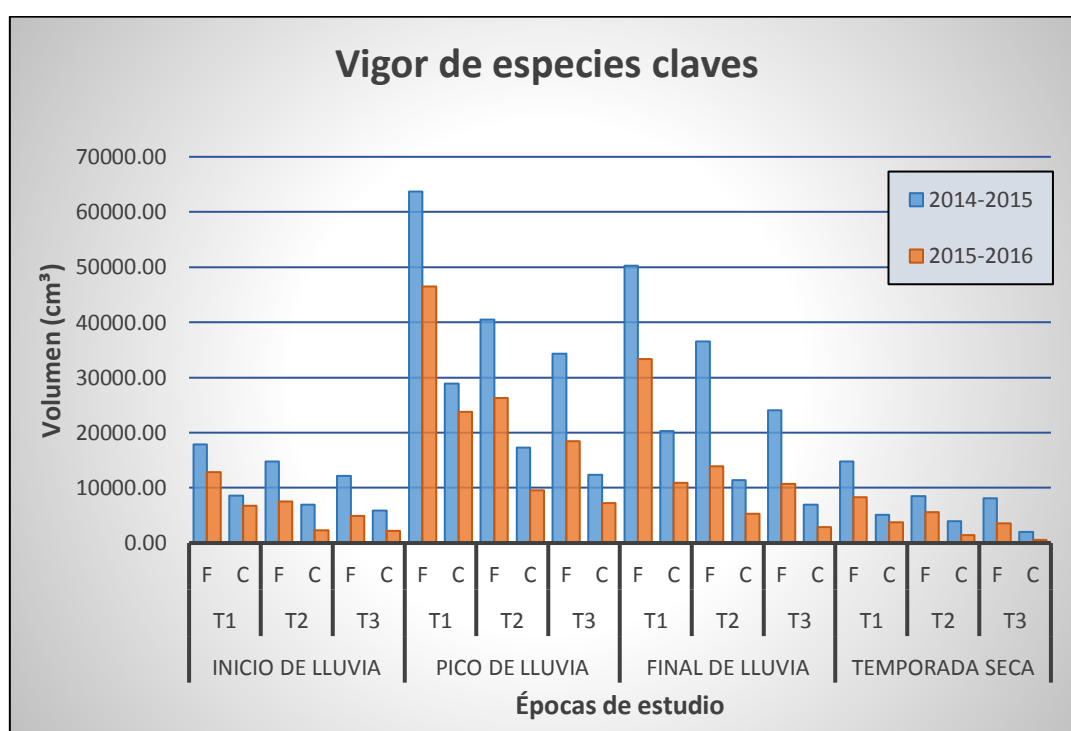
Anexo 2: Figura resumen del vigor de especies claves para los dos años de estudio



Anexo 3: Vigor de especies claves expresado en volúmenes (cm³).

Especies claves	Inicio de lluvia			Pico de lluvia			Final de lluvia			Periodo seco		
	Temporada 2014-2015											
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
<i>Festuca dolichophylla</i>	17918.86	14763.44	12206.33	63711.50	40511.57	34326.61	50246.26	36521.60	24065.97	14743.49	8482.30	8058.34
	12860.86	7494.96	4908.74	46533.27	26280.99	18499.56	33329.16	13902.65	10717.98	8339.37	5553.79	3596.81
Temporada 2015-2016												
<i>Calamagrostis vicunarum</i>	8586.76	6902.08	5840.22	28902.65	17250.49	12339.78	20272.50	11385.26	6958.00	5153.00	3976.08	1974.26
	6773.27	2341.40	2235.69	23816.41	9517.27	7210.05	10911.78	5329.81	2919.24	3793.34	1463.82	581.07

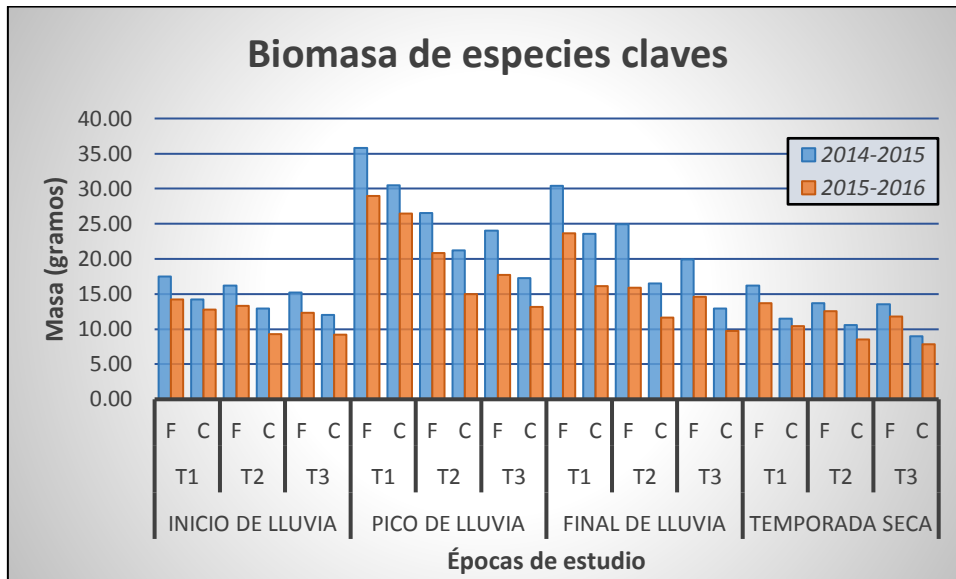
Anexo 4: Figura resumen de vigor de especies claves



Anexo 5: Resultados obtenidos para la biomasa de especies clave a partir de las ecuaciones alométricas en gramos.

Grupos funcionales	Inicio de lluvia			Pico de lluvia			Final de lluvia			Periodo seco		
	Temporada 2014-2015											
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
<i>Festuca dolichophylla</i>	17.49	16.23	15.21	35.81	26.53	24.05	30.42	24.93	19.95	16.22	13.72	13.55
	15.47	13.32	12.29	28.94	20.84	17.72	23.65	15.88	14.61	13.66	12.54	11.76
Temporada 2015-2016												
<i>Calamagrostis vicunarum</i>	14.25	12.90	12.05	30.50	21.18	17.25	23.60	16.49	12.95	11.50	10.56	8.96
	12.80	9.25	9.17	26.43	15.00	13.15	16.11	11.65	9.72	10.42	8.55	7.85

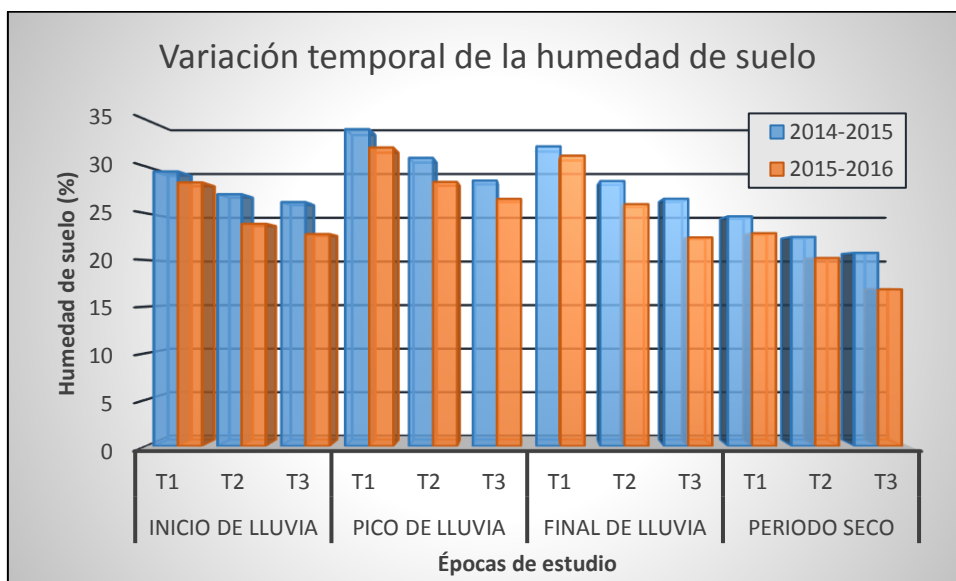
Anexo 6: Variación de la biomasa de especies claves a distintos niveles de precipitación, épocas y años de estudio tanto para F (*Festuca dolichophylla*) como para C (*Calamagrostis vicunarium*).



Anexo 7: Resultados de humedad de suelo medido a una profundidad de 15 cm expresados en porcentaje de contenido volumétrico de agua.

Año	Inicio de lluvia			Pico de lluvia			Final de lluvia			Periodo seco		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
2014-2015	29.47	27.04	26.20	33.99	30.93	28.50	32.15	28.45	26.55	24.68	22.48	20.78
2015-2016	28.30	23.88	22.78	32.03	28.35	26.55	31.16	25.98	22.42	22.88	20.23	16.86

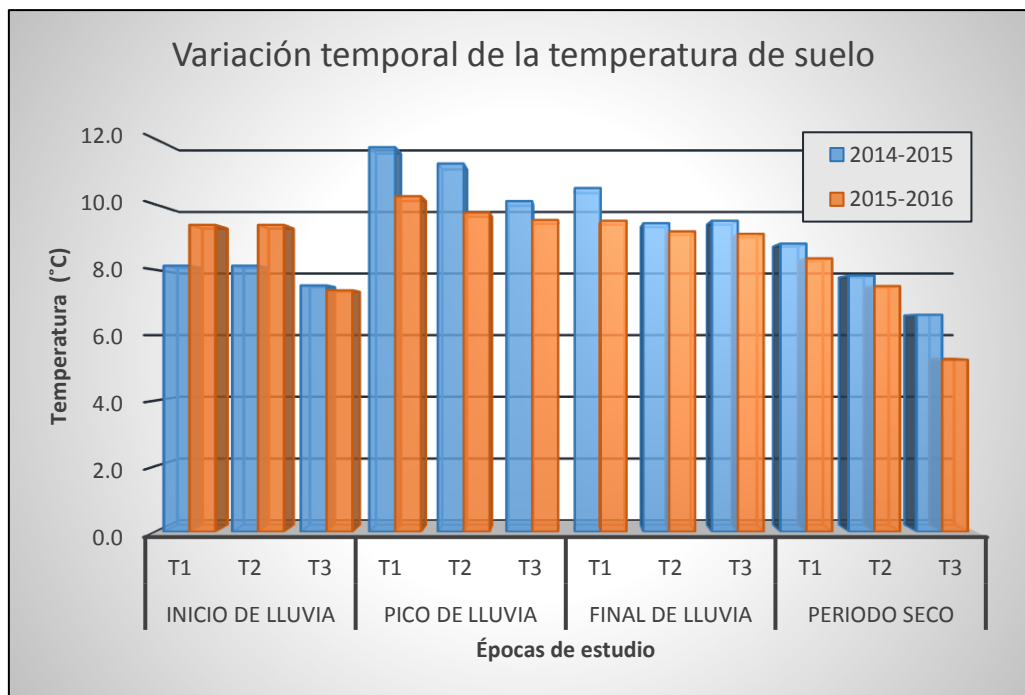
Anexo 8: Resultados de humedad de suelo medido a una profundidad de 15 cm expresados en porcentaje de contenido volumétrico de agua.



Anexo 9: Tabla resumen de datos de temperatura de suelo medido a una profundidad de 15 cm expresados en porcentaje de contenido volumétrico de agua.

Año	Inicio de lluvia			Pico de lluvia			Final de lluvia			Periodo seco		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
2014-2015	8.1	8.1	7.5	11.8	11.3	10.1	10.5	9.4	9.5	8.8	7.8	6.6
2015-2016	9.4	9.4	7.4	10.3	9.8	9.5	9.5	9.2	9.1	8.4	7.5	5.3

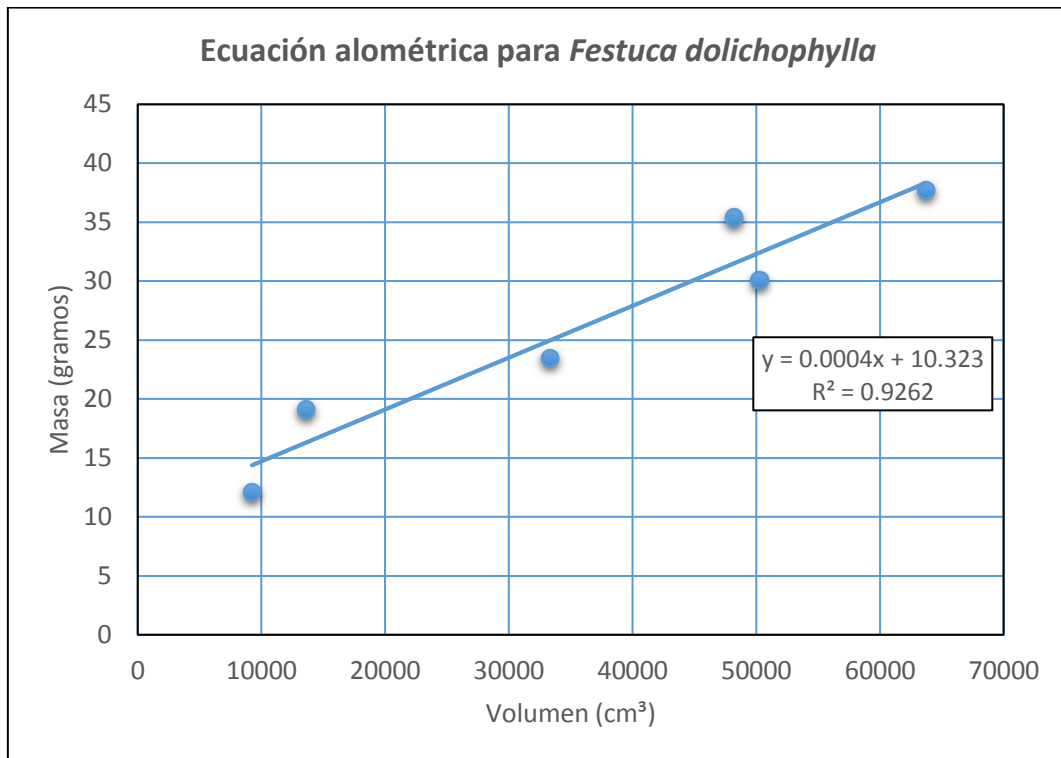
Anexo 10: Figura resumen de la variación de la temperatura medida a 15 cm de profundidad durante los dos años de estudio



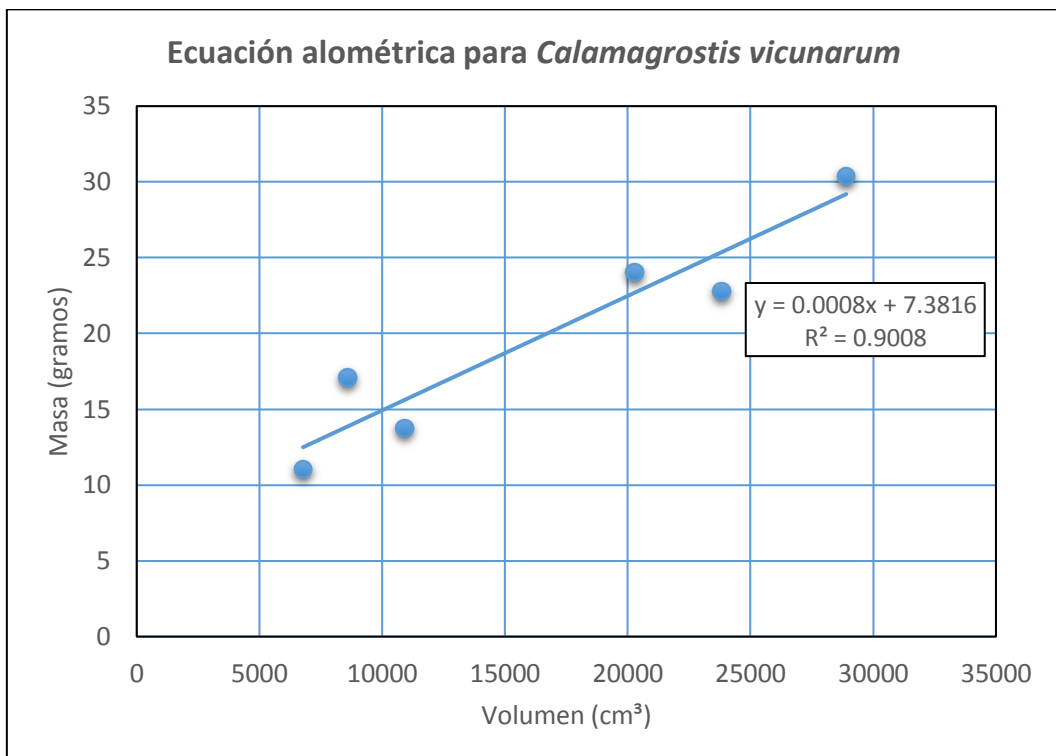
Anexo 11: Valores obtenidos de peso y volumen de especies claves

<i>Festuca dolichophylla</i>		<i>Calamagrostis vicunarum</i>	
Volumen (cm ³)	Peso verde (gr)	Volumen (cm ³)	Peso verde (gr)
9247.28	12.1	6773.27	11.05
13618.80	19.1	8586.76	17.1
33329.16	23.5	10911.78	13.8
48195.17	35.4	20272.50	24.05
50246.26	30.1	23816.41	22.8
63711.50	37.7	28902.65	30.4

Anexo 12: Ecuación alométrica de obtenida de la relación masa-volumen para *Festuca dolichophylla*.



Anexo 13: Ecuación alométrica de obtenida de la relación masa-volumen para *Calamagrostis vicunarum*



Anexo 14: Análisis estadístico para los grupos funcionales

23:19 Sunday, February 28, 1999 1

Obs	bloq	anho	lluvia	epoca	y
1	1	1	1	1	66.21
2	1	1	1	2	61.36
3	1	1	1	3	62.56
4	1	1	1	4	66.93
5	1	1	2	1	67.14
6	1	1	2	2	68.15
7	1	1	2	3	68.19
8	1	1	2	4	69.7
9	1	1	3	1	69.8
10	1	1	3	2	67.69
11	1	1	3	3	70.61
12	1	1	3	4	67.86
13	1	2	1	1	63.9
14	1	2	1	2	61.86
15	1	2	1	3	61.49
16	1	2	1	4	61.94
17	1	2	2	1	67.32
18	1	2	2	2	70.47
19	1	2	2	3	69.27
20	1	2	2	4	65.37
21	1	2	3	1	71.87
22	1	2	3	2	69.66
23	1	2	3	3	69.3
24	1	2	3	4	64.18
25	2	1	1	1	10.7
26	2	1	1	2	13.02
27	2	1	1	3	11.62
28	2	1	1	4	9.23
29	2	1	2	1	9.09
30	2	1	2	2	9.64
31	2	1	2	3	7.99
32	2	1	2	4	6.2
33	2	1	3	1	7.11
34	2	1	3	2	9.35
35	2	1	3	3	6.74
36	2	1	3	4	4.96
37	2	2	1	1	10.22
38	2	2	1	2	11.84
39	2	2	1	3	10.99
40	2	2	1	4	7.77
41	2	2	2	1	7.15

42	2	2	2	2	8.99
43	2	2	2	3	7.49
44	2	2	2	4	5.02
45	2	2	3	1	6.04
46	2	2	3	2	6.84
47	2	2	3	3	4.86
48	2	2	3	4	3.42
49	3	1	1	1	15.54
50	3	1	1	2	24.18
51	3	1	1	3	21.97
52	3	1	1	4	14.2
53	3	1	2	1	14.35
54	3	1	2	2	17.45
55	3	1	2	3	13.49
56	3	1	2	4	8.92
57	3	1	3	1	11.82
58	3	1	3	2	14.05
59	3	1	3	3	7.85
60	3	1	3	4	6.21
61	3	2	1	1	16.05
62	3	2	1	2	23.41
63	3	2	1	3	20.82
64	3	2	1	4	19.04
65	3	2	2	1	12.8
66	3	2	2	2	13.63
67	3	2	2	3	11.71
68	3	2	2	4	9.16
69	3	2	3	1	6.8
70	3	2	3	2	9.21
71	3	2	3	3	6.38
72	3	2	3	4	2.84

Class	Levels	Values
Bloq	3	1 2 3
lluvia	3	1 2 3
epoca	4	1 2 3 4
anho	2	1 2

Number of observations 72

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	47	51550.561	1096.82045	365.92	<.0001
Error	24	71.93847	2.99744		
Corrected Total	71	51622.4995			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	y Mean
0.998606	5.877178	1.731311	29.45819

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
bloq	2	50485.9884	25242.9942	8421.53	<.0001
lluvia	2	138.22004	69.11002	23.06	<.0001
bloq*lluvia	4	608.04381	152.01095	50.71	<.0001
epoca	3	130.41525	43.47175	14.5	<.0001
lluvia*epoca	6	19.05852	3.17642	1.06	0.4133
bloq*epoca(lluvia)	18	134.93239	7.49624	2.5	0.0186
anho	1	25.40657	25.40657	8.48	0.0077
lluvia*anho	2	4.69441	2.34721	0.78	0.4683
epoca*anho	3	1.7144	0.57147	0.19	0.9017
lluvia*epoca*anho	6	2.0872	0.34787	0.12	0.9935

Tests of Hypotheses Using the Type I MS for bloq*epoca(lluvia) as an Error Term

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
bloq	2	50485.9884	25242.9942	166.06	0.0001
lluvia	2	138.22004	69.11002	0.45	0.6639

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	18
Error Mean Square	7.496244
Critical Value of t	2.10092
Least Significant Difference	1.6605

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	66.7846	24	1
B	13.4117	24	3
C	8.1783	24	2

Prueba DLS para el factor “año”

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	18
Error Mean Square	7.496244
Critical Value of t	2.10092
Least Significant Difference	1.3558

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	anho
A	30.0522	36	1
A	28.8642	36	2

Prueba DLS para el factor "lluvia"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	18
Error Mean Square	7.496244
Critical Value of t	2.10092
Least Significant Difference	1.6605

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	lluvia
A	31.1188	24	1
A	29.5288	24	2
B	27.7271	24	3

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Prueba DLS para el factor "época"

23:19 Sunday, February 28, 1999 7

The GLM Procedure

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	18
Error Mean Square	7.496244
Critical Value of t	2.10092
Least Significant Difference	1.9174

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	lluvia
A	31.1556	18	2
A	29.6617	18	1
A	27.6294	18	3
B	27.3861	18	4

Anexo 15: Análisis estadístico para el vigor de especies claves

Obs	bloq	anho	lluvia	epoca	y
1	1	1	1	1	17918.86
2	1	1	1	2	63711.5
3	1	1	1	3	50246.26
4	1	1	1	4	14743.49
5	1	1	2	1	14763.44
6	1	1	2	2	40511.57
7	1	1	2	3	36521.6
8	1	1	2	4	8482.3
9	1	1	3	1	12206.33
10	1	1	3	2	34326.61
11	1	1	3	3	24065.97
12	1	1	3	4	8058.34
13	1	2	1	1	12860.86
14	1	2	1	2	46533.27
15	1	2	1	3	33329.16
16	1	2	1	4	8339.37
17	1	2	2	1	7494.96
18	1	2	2	2	26280.99
19	1	2	2	3	13902.65
20	1	2	2	4	5553.79
21	1	2	3	1	4908.74
22	1	2	3	2	18499.56
23	1	2	3	3	10717.98
24	1	2	3	4	3596.81
25	2	1	1	1	8586.76
26	2	1	1	2	28902.65
27	2	1	1	3	20272.5
28	2	1	1	4	5153
29	2	1	2	1	6902.08
30	2	1	2	2	17250.49
31	2	1	2	3	11385.26
32	2	1	2	4	3976.08
33	2	1	3	1	5840.22
34	2	1	3	2	12339.78
35	2	1	3	3	6958
36	2	1	3	4	1974.26
37	2	2	1	1	6773.27
38	2	2	1	2	23816.41
39	2	2	1	3	10911.78
40	2	2	1	4	3793.34
41	2	2	2	1	2341.4
42	2	2	2	2	9517.27

43	2	2	2	3	5329.81
44	2	2	2	4	1463.82
45	2	2	3	1	2235.69
46	2	2	3	2	7210.05
47	2	2	3	3	2919.24
48	2	2	3	4	581.07

Number of observations 48

The GLM Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
Bloq	2	1 2
lluvia	3	1 2 3
epoca	4	1 2 3 4
anho	2	1 2

Class Levels Values
The GLM Procedure

Dependent Variable: y

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	35	9232400850	263782881	16.08	<.0001
Error	12	196876752	16406396		
Corrected Total	47	9429277602			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	y Mean
0.979121	26.8537	4050.481	15083.51

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
bloq	1	2016837742	2016837742	122.93	<.0001
lluvia	2	1325648323	662824162	40.4	<.0001
bloq*lluvia	2	131191815	65595908	4	0.0467
epoca	3	3612567057	1204189019	73.4	<.0001
lluvia*epoca	6	537210568	89535095	5.46	0.0062
bloq*epoca(lluvia)	9	693319218	77035469	4.7	0.0076
anho	1	722192686	722192686	44.02	<.0001
lluvia*anho	2	5242875	2621438	0.16	0.8541
epoca*anho	3	171273738	57091246	3.48	0.0504
lluvia*epoca*anho	6	16916827	2819471	0.17	0.9795

Tests of Hypotheses Using the Type I MS for bloq*lluvia as an Error Term

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
bloq	1	2016837742	2016837742	30.75	0.031
lluvia	2	1325648323	662824162	10.1	0.0901

Tests of Hypotheses Using the Type I MS for bloq*epoca(lluvia) as an Error Term

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
epoca	3	3612567057	1204189019	15.63	0.0007
lluvia*epoca	6	537210568	89535095	1.16	0.4027

Prueba DLS para el factor "bloque"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	9
Error Mean Square	77035469
Critical Value of t	2.26216
Least Significant Difference	5731.6

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	lluvia
A	21.566	24	1
B	8601	24	2

Prueba DLS para el factor "año"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	9
Error Mean Square	77035469
Critical Value of t	2.26216
Least Significant Difference	5731.6

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	anho
A	18962	24	1
B	11205	24	2

Prueba DLS para el factor "lluvia"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	9
Error Mean Square	77035469
Critical Value of t	2.26216
Least Significant Difference	7019.8

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	anho
A	22243	16	1
B	13230	16	2
B	9777	16	3

Prueba DLS para el factor "época"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	9
Error Mean Square	77035469
Critical Value of t	2.26216
Least Significant Difference	8105.7

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	anho
A	27408	12	2
B	18880	12	3
C	8569	12	1
C	5476	12	4

Anexo 16: Análisis estadístico para la biomasa de especies claves

Obs	bloq	anho	lluvia	epoca	y
1	1	1	1	1	17.49
2	1	1	1	2	35.81
3	1	1	1	3	30.42
4	1	1	1	4	16.22
5	1	1	2	1	16.23
6	1	1	2	2	26.53
7	1	1	2	3	24.93
8	1	1	2	4	13.72
9	1	1	3	1	15.21
10	1	1	3	2	24.05
11	1	1	3	3	19.95
12	1	1	3	4	13.55
13	1	2	1	1	15.47
14	1	2	1	2	28.94
15	1	2	1	3	23.65
16	1	2	1	4	13.66
17	1	2	2	1	13.32
18	1	2	2	2	20.84
19	1	2	2	3	15.88
20	1	2	2	4	12.54
21	1	2	3	1	12.29
22	1	2	3	2	17.72
23	1	2	3	3	14.61
24	1	2	3	4	11.76
25	2	1	1	1	14.25
26	2	1	1	2	30.5
27	2	1	1	3	23.6
28	2	1	1	4	11.5
29	2	1	2	1	12.9
30	2	1	2	2	21.18
31	2	1	2	3	16.49
32	2	1	2	4	10.56
33	2	1	3	1	12.05
34	2	1	3	2	17.25
35	2	1	3	3	12.95
36	2	1	3	4	8.96
37	2	2	1	1	12.8
38	2	2	1	2	26.43
39	2	2	1	3	16.11
40	2	2	1	4	10.42
41	2	2	2	1	9.25

42	2	2	2	2	15
43	2	2	2	3	11.65
44	2	2	2	4	8.55
45	2	2	3	1	9.17
46	2	2	3	2	13.15
47	2	2	3	3	9.72
48	2	2	3	4	7.85

Class	Levels	Values
Bloq	2	1 2
lluvia	3	1 2 3
epoca	4	1 2 3 4
anho	2	1 2

Number of observations 48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	35	2034.31092	58.123169	69.81	<.0001
Error	12	9.99085	0.832571		
Corrected Total	47	2044.30177			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	y Mean
0.979121	0.995113	5.494775	0.912453

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
bloq	1	263.671875	263.671875	316.7	<.0001
lluvia	2	382.353329	191.176665	229.62	<.0001
bloq*lluvia	2	0.2013875	0.1006938	0.12	0.8872
epoca	3	969.876583	323.292194	388.31	<.0001
lluvia*epoca	6	157.266804	26.211134	31.48	<.0001
bloq*epoca(lluvia)	9	21.0308875	2.3367653	2.81	0.0494
anho	1	190.0848	190.0848	228.31	<.0001
lluvia*anho	2	1.9268375	0.9634188	1.16	0.3471
epoca*anho	3	43.1250167	14.3750056	17.27	0.0001
lluvia*epoca*anho	6	4.7733958	0.795566	0.96	0.493

Tests of Hypotheses Using the Type I MS for bloq*lluvia as an Error Term

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
bloq	1	263.671875	263.671875	2618.55	0.0004
lluvia	2	382.353329	191.176665	1898.6	0.0005

Tests of Hypotheses Using the Type I MS for bloq*epoca(lluvia) as an Error Term

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
epoca	3	969.876583	323.292194	138.35	<.0001
lluvia*epoca	6	157.266804	26.211134	11.22	0.001

Prueba DLS para el factor "bloque"

The GLM Procedure

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	9
Error Mean Square	2.336765
Critical Value of t	2.26216
Least Significant Difference	0.9983

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	18.9496	24	1
B	14.2621	24	2

Prueba DLS para el factor "anho"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	9
Error Mean Square	2.336765
Critical Value of t	2.26216
Least Significant Difference	0.9983

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	18.5958	24	1
B	14.6158	24	2

23:37 Sunday, February 28, 1999 6

Prueba DLS para el factor "lluvia"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	9
Error Mean Square	2.336765
Critical Value of t	2.26216
Least Significant Difference	1.2226

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	20.4544	16	1
B	15.5981	16	2
C	13.765	16	3

Prueba DLS para el factor "epoca"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	9
Error Mean Square	2.336765
Critical Value of t	2.26216
Least Significant Difference	1.4117

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	23.1167	12	2
B	18.33	12	3
C	13.3692	12	1
D	11.6075	12	4

Anexo 17: Análisis estadístico para la humedad de suelo

Obs	bloq	año	lluvia	epoca	y
1	1	1	1	1	28.67
2	1	1	1	2	32.35
3	1	1	1	3	30.9
4	1	1	1	4	26.3
5	1	1	2	1	26.02
6	1	1	2	2	32.1
7	1	1	2	3	29.1
8	1	1	2	4	22.8
9	1	1	3	1	26.59
10	1	1	3	2	29.6
11	1	1	3	3	26.9
12	1	1	3	4	21.2
13	1	2	1	1	28.12
14	1	2	1	2	31
15	1	2	1	3	29.78
16	1	2	1	4	23.6
17	1	2	2	1	24.13
18	1	2	2	2	29.64
19	1	2	2	3	27.74
20	1	2	2	4	20.3
21	1	2	3	1	24.28
22	1	2	3	2	27.07
23	1	2	3	3	22.42
24	1	2	3	4	17.7
25	2	1	1	1	29.77
26	2	1	1	2	35
27	2	1	1	3	32.25
28	2	1	1	4	24
29	2	1	2	1	27.67
30	2	1	2	2	30
31	2	1	2	3	28.6
32	2	1	2	4	21.6
33	2	1	3	1	25.94
34	2	1	3	2	28.4
35	2	1	3	3	27.4
36	2	1	3	4	18.9
37	2	2	1	1	28.24
38	2	2	1	2	32.11
39	2	2	1	3	31.11
40	2	2	1	4	22.5

41	2	2	2	1	24.19
42	2	2	2	2	27.36
43	2	2	2	3	25.08
44	2	2	2	4	21.1
45	2	2	3	1	21.68
46	2	2	3	2	25.35
47	2	2	3	3	23.4
48	2	2	3	4	15.9
49	3	1	1	1	29.16
50	3	1	1	2	34.6
51	3	1	1	3	32.05
52	3	1	1	4	25.3
53	3	1	2	1	27.54
54	3	1	2	2	31.3
55	3	1	2	3	27.4
56	3	1	2	4	23.6
57	3	1	3	1	25.69
58	3	1	3	2	28.3
59	3	1	3	3	26.6
60	3	1	3	4	20.7
61	3	2	1	1	27.82
62	3	2	1	2	32.77
63	3	2	1	3	30.91
64	3	2	1	4	24.3
65	3	2	2	1	23.95
66	3	2	2	2	27.45
67	3	2	2	3	24.29
68	3	2	2	4	20.1
69	3	2	3	1	22.08
70	3	2	3	2	26.96
71	3	2	3	3	23.3
72	3	2	3	4	16.7
73	4	1	1	1	30.28
74	4	1	1	2	34
75	4	1	1	3	33.4
76	4	1	1	4	23.1
77	4	1	2	1	26.93
78	4	1	2	2	30.3
79	4	1	2	3	28.7
80	4	1	2	4	21.9
81	4	1	3	1	26.57
82	4	1	3	2	27.7
83	4	1	3	3	25.3
84	4	1	3	4	22.3

85	4	2	1	1	29.02
86	4	2	1	2	32.26
87	4	2	1	3	32.83
88	4	2	1	4	21.1
89	4	2	2	1	23.27
90	4	2	2	2	28.95
91	4	2	2	3	26.8
92	4	2	2	4	19.4
93	4	2	3	1	23.1
94	4	2	3	2	26.81
95	4	2	3	3	20.55
96	4	2	3	4	17.15

23:58 Sunday, February 28, 1999 3

Number of observations 96

Class	Levels	Values
lluvia	3	1 2 3
epoca	4	1 2 3 4
anho	2	1 2

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	23	1673.49495	72.76065	71.32	<.0001
Error	72	73.453625	1.020189		
Corrected Total	95	1746.94857			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	y Mean
0.957953	3.831897	1.010044	26.35885

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
lluvia	2	493.746465	246.873232	241.99	<.0001
epoca	3	987.87027	329.29009	322.77	<.0001
lluvia*epoca	6	21.8597271	3.6432878	3.57	0.0037
anho	1	147.783251	147.783251	144.86	<.0001
lluvia*anho	2	14.2517896	7.1258948	6.98	0.0017
epoca*anho	3	0.8718948	0.2906316	0.28	0.8362
lluvia*epoca*anho	6	7.1115521	1.1852587	1.16	0.3363

Tests of Hypotheses Using the Type I MS for lluvia*epoca as an Error Term

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
bloq	2	493.746465	246.873232	67.76	<.0001
época	3	987.87027	329.29009	90.38	<.0001

Prueba DLS para el factor “anho”

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	6
Error Mean Square	3.643288
Critical Value of t	2.44691
Least Significant Difference	0.9534

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	27.5996	48	1
B	25.1181	48	2

Prueba DLS para el factor “lluvia”

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	6
Error Mean Square	3.643288
Critical Value of t	2.44691
Least Significant Difference	1.1676

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	29.3313	32	1
B	25.9159	32	2
C	23.8294	32	3

Prueba DLS para el factor “epoca”

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	6
Error Mean Square	3.643288
Critical Value of t	2.44691
Least Significant Difference	1.3483

t Grouping	Mean	N	bloq
A	30.0575	24	2
B	27.7838	24	3
C	26.2796	24	1
D	21.3146	24	4

Anexo 18: Análisis estadístico para la humedad de suelo

Obs	bloq	anho	lluvia	epoca	y
1	1	1	1	1	8
2	1	1	1	2	13
3	1	1	1	3	10
4	1	1	1	4	8.7
5	1	1	2	1	8
6	1	1	2	2	11
7	1	1	2	3	9
8	1	1	2	4	7.8
9	1	1	3	1	7
10	1	1	3	2	10.5
11	1	1	3	3	9
12	1	1	3	4	7
13	1	2	1	1	9.5
14	1	2	1	2	10
15	1	2	1	3	9.2
16	1	2	1	4	8
17	1	2	2	1	8.5
18	1	2	2	2	9.4
19	1	2	2	3	9
20	1	2	2	4	7.5
21	1	2	3	1	6
22	1	2	3	2	9.8
23	1	2	3	3	8.8
24	1	2	3	4	4
25	2	1	1	1	8.2
26	2	1	1	2	11
27	2	1	1	3	11
28	2	1	1	4	9
29	2	1	2	1	8
30	2	1	2	2	12
31	2	1	2	3	9.5
32	2	1	2	4	8
33	2	1	3	1	8
34	2	1	3	2	10
35	2	1	3	3	10
36	2	1	3	4	6
37	2	2	1	1	9
38	2	2	1	2	10
39	2	2	1	3	9.5
40	2	2	1	4	8.5
41	2	2	2	1	8.5
42	2	2	2	2	10
43	2	2	2	3	9.5
44	2	2	2	4	8
45	2	2	3	1	7.5
46	2	2	3	2	9.3
47	2	2	3	3	9.3

48	2	2	3	4	6
49	3	1	1	1	8.3
50	3	1	1	2	11
51	3	1	1	3	11
52	3	1	1	4	8.5
53	3	1	2	1	8
54	3	1	2	2	11
55	3	1	2	3	10
56	3	1	2	4	7.5
57	3	1	3	1	7.5
58	3	1	3	2	10.2
59	3	1	3	3	10
60	3	1	3	4	7.5
61	3	2	1	1	10
62	3	2	1	2	10
63	3	2	1	3	9.8
64	3	2	1	4	8.9
65	3	2	2	1	8.5
66	3	2	2	2	9.8
67	3	2	2	3	9.2
68	3	2	2	4	7.5
69	3	2	3	1	8.5
70	3	2	3	2	9.5
71	3	2	3	3	9.8
72	3	2	3	4	6
73	4	1	1	1	8
74	4	1	1	2	12
75	4	1	1	3	10
76	4	1	1	4	9
77	4	1	2	1	7.9
78	4	1	2	2	11
79	4	1	2	3	9.2
80	4	1	2	4	8
81	4	1	3	1	7.6
82	4	1	3	2	9.7
83	4	1	3	3	9
84	4	1	3	4	6
85	4	2	1	1	9
86	4	2	1	2	11
87	4	2	1	3	9.5
88	4	2	1	4	8
89	4	2	2	1	8.5
90	4	2	2	2	9.8
91	4	2	2	3	9
92	4	2	2	4	7
93	4	2	3	1	7.5
94	4	2	3	2	9.5
95	4	2	3	3	8.5
96	4	2	3	4	6

Number of observations 96

Class	Levels	Values
lluvia	3	1 2 3
epoca	4	1 2 3 4
anho	2	1 2

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	23	191.64	8.3321739	30.98	<.0001
Error	72	19.365	0.2689583		
Corrected Total	95	211.005			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	y Mean
0.908225	5.835296	0.518612	8.8875

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
lluvia	2	32.5575	16.27875	60.53	<.0001
epoca	3	131.6225	43.8741667	163.13	<.0001
lluvia*epoca	6	8.485	1.4141667	5.26	0.0002
anho	1	5.0416667	5.0416667	18.75	<.0001
lluvia*anho	2	0.1358333	0.0679167	0.25	0.7775
epoca*anho	3	9.4608333	3.1536111	11.73	<.0001
lluvia*epoca*anho	6	4.3366667	0.7227778	2.69	0.0207

Prueba DLS para el factor "anho"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	6
Error Mean Square	1.414167
Critical Value of t	2.44691
Least Significant Difference	0.594

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	9.1167	48	1
A	8.6583	48	2

Prueba DLS para el factor "lluvia"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	6
Error Mean Square	1.414167
Critical Value of t	2.44691
Least Significant Difference	0.7275

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	9.5813	32	1
B	8.925	32	2
C	8.1563	32	3

Prueba DLS para el factor "epoca"

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	6
Error Mean Square	1.414167
Critical Value of t	2.44691
Least Significant Difference	0.84

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	bloq
A	10.4375	24	2
B	9.5333	24	3
C	8.1458	24	1
C	7.4333	24	4