

**UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y FILOSOFÍA**  
**“ALBERTO CAZORLA TALLERI”**



**“DESEMPEÑO DE LA PLANTA *Lepidium meyenii* Walp.  
“MACA” EN PARCELAS EXPERIMENTALES  
LOCALIZADAS EN DIFERENTES ALTITUDES: LA  
INFLUENCIA DEL SUELO Y LA PROCEDENCIA DE LAS  
SEMILLAS”**

**TESIS**  
**PARA OBTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**  
**LICENCIADA EN BIOLOGÍA**

**AUTOR:**  
**Alejandra Lucía Lozano Canales**

**Lima – Perú**  
**2017**

**ASESOR:**

**Dr. Wilfredo Antonio Gonzales Lozada**

**JURADO CALIFICADOR:**

**PRESIDENTE: Dr. Daniel Clark Leza**

**SECRETARIO: MSc. Luis Rossi Mayo**

**VOCAL: Lic. Camilo Díaz Santibáñez**

## **DEDICATORIA**

*A mis padres y a mi hermana,  
quienes me enseñaron que con  
humildad y esfuerzo, los retos se  
convierten en aventuras y logros.*

## AGRADECIMIENTOS

Ante todo, quisiera agradecer a Dios y a mi familia quienes me dieron siempre la fortaleza para no rendirme ante las pequeñas dificultades que se presentaron a lo largo de este proceso. Gracias por su amor incondicional y por enseñarme a ponerle pasión y ganas a cada reto que me propongo.

Con mucho cariño quisiera agradecerle a mi asesor de tesis, el Dr. Wilfredo Antonio Gonzales Lozada, por su confianza, paciencia, y apoyo durante todo este proceso. Gracias profe por darme seguridad y consejos para formarme como una mejor persona y profesional.

Quisiera agradecer a Ciencia Activa – CONCYTEC por el financiamiento del Proyecto de eco fisiología de *Lepidium meyenii* Walpers “maca” (109-2015-FONDECYT-DE) del cual derivó mi proyecto de tesis. Además quisiera agradecer de modo especial a la Lic. María Claudia Janampa, que junto al Dr. Wilfredo Gonzales, formularon y postularon este proyecto, gracias por la confianza que tuvieron en mí y por esta gran oportunidad.

Agradezco a la Asociación de productores de maca Junín-Pasco-Perú (ASPROMAC) que nos apoyó en la logística de las actividades de campo. En particular, agradezco a los productores Moisés Alderete, Efraín Zúñiga y Arturo Cárdenas, quienes nos donaron las semillas para la siembra. A la Sra. Angélica Pérez-ASAMEB, a la Asociación de productores agropecuarios orgánicos de Carhuamayo, al Sr. Ovaldo Rojas y al Sr. Fluber Mamani, quienes nos donaron los espacios para la siembra. Gracias a todos ustedes por brindarme los consejos y conocimientos necesarios para familiarizarme con este cultivo.

Por último me gustaría agradecer a mis compañeros y amigos: María Claudia Janampa, Blanca Alvarez, Ruddy Liendo, David Valqui, Henry De la Cruz, Alonso Vigil, Alisson Zevallos, Ciara Sanchez, Naomi Shimabuku, Jose Del Carmen Maraví, Ana María Agapito, Vanessa Minaya, David Iglesias, Liz Flores, Alexandra Chávez, Sebastián Saavedra, Juan Carlos Jeri, Sophia Velarde, Cynthia Salcedo, Rosa Villanueva, Alexandra Ponce, Eva Elsner, Diego Gonzales, Karla Villalobos, Oksana Huerta, Giulianna López, Leonardo Gaspar, Andy Mercado Gamarra, Carolina Barreda, Ken Toyama y Jose Carlos Florián, quienes me acompañaron en este proceso tanto en viajes como en las labores de laboratorio.

# ÍNDICE

I.	Introducción .....	1-5
II.	Hipótesis .....	6
III.	Objetivos .....	6
IV.	Materiales y métodos	
	1. Material vegetal.....	7-11
	2. Diseño de estudio.....	11-22
	3. Análisis de datos.....	23-24
V.	Resultados	
	1. Planta.....	25-34
	2. Suelo.....	35-40
VI.	Discusión .....	41-47
VII.	Conclusiones .....	48
VIII.	Referencias bibliográficas .....	49-55
IX.	Anexos .....	56-63

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Fase de crecimiento vegetativo y formación del órgano de reserva de *L.meyenii*.

**Figura 2.** Hipocótilos de color: rojo (A), amarillo (B) y negro (C) que dieron origen a las semillas empleadas en la siembra.

**Figura 3.** Mapas geográficos de las zonas de estudio: Zona alta (A) y Zona baja (B) con la ubicación de las parcelas experimentales: CL (Carhuamayo-ladera), CP (Carhuamayo-plano), OL (Óndores-ladera), OP (Óndores-plano), MM (Masma) y AA (Achipampa).

**Figura 4.** (A) Modelo de siembra. Accesiones: 1=RMA, 2=AEZ, 3=NAC, 4=AMA, 5=NMA. (B) Disposición de suelo.

**Figura 5.** Fotos de las parcelas experimentales instaladas. **A:** Carhuamayo-ladera (CL), **B:** Carhuamayo-plano (CP), **C:** Óndores-ladera (OL), **D:** Óndores-plano (OP), **E:** Achipampa (AA), **F:** Masma (MM).

**Figura 6.** Cuadro resumen de las variables evaluadas en esta tesis.

**Figura 7.** Curva de supervivencia de plantas en las parcelas desde el inicio de la siembra (Diciembre, 2015-Enero, 2016) hasta la cosecha (Junio-Julio, 2016).

**Figura 8.** Supervivencia final según la parcela, las accesiones y la disposición del suelo. Las letras sobre las barras representan las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), resultado de la prueba a posteriori LSD. Se grafica el porcentaje de supervivencia  $\pm$  EE.

**Figura 9.** Supervivencia de plantas según la disposición de suelo y la accesión en las 3 parcelas de mayor productividad: Óndores-plano (OP), Óndores-ladera (OL) y Carhuamayo-plano (CP). **Camellón:** barra rayada, **Hilera al ras del suelo:** barra llena.

**Figura 10.** Crecimiento vegetativo (diámetro de la roseta) y desempeño fisiológico ( $F_v/F_m$ ) de las plantas según las 6 parcelas y la accesión. Se reporta el promedio  $\pm$  EE.

**Figura 11.** Comparación de pigmentos fotosintéticos (concentración y proporciones) de 3 parcelas: Óndores-ladera (OL), Óndores-plano (OP) y Achipampa (AA). Se reporta el promedio  $\pm$  EE.

**Figura 12.** Porcentaje de humedad del suelo de las 6 parcelas desde el inicio de la siembra (Diciembre, 2015-Enero, 2016) hasta la cosecha (Junio-Julio, 2016). Se muestra el porcentaje promedio  $\pm$  EE.

**Figura 13.** Ordenamiento de las parcelas experimentales según las características fisicoquímicas asociadas a la fertilidad del suelo. Se muestra la salida gráfica del PCA y los

porcentajes de supervivencia de cada parcela se incorporaron para enfatizar la relación entre la supervivencia con las características fisicoquímicas de las parcelas.

**Figura 14.** Representación gráfica de la similitud entre las parcelas para cada componente. (A) PC1 (pH, acidez intercambiable y fósforo disponible), (B) PC2 (Potasio disponible y conductividad eléctrica). Las letras sobre las barras representan las diferencias significativas entre las parcelas ( $p < 0.05$ ), resultado de la prueba a posteriori LSD.

**Figura 15.** Temperatura diaria: promedio, máxima y mínima de las parcelas durante el periodo de desarrollo del cultivo de “maca” (siembra-cosecha). Se delimita con una línea gris el primer monitoreo (M1) de la supervivencia en las zonas altas (ZA: Carhuamayo y Óndores) y zonas bajas (ZB: Achipampa y Masma).

**Figura 17.** Peso de 100 semillas de las accesiones de *L. meyenii* empleadas en la siembra.

**Figura 18.** Relación entre el peso de semillas de *L. meyenii* y el porcentaje de emergencia de plántulas en campo. Cada punto representa el peso de 1000 semillas de accesiones (N=16) de distintos colores de “maca” (N=5) y de distintos productores (N=7). Se muestra la tendencia cuadrática (línea azul), el intervalo de confianza al 95% (líneas rojas punteadas) y el ajuste del modelo ( $R^2$ ).

**Figura 19.** Representación gráfica del peso fresco y longitud radicular total (indicadores de calidad más relevantes) de los hipocótilos cosechados por cada parcela experimental. Se muestra el promedio  $\pm$  EE.

## INDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Accesiones empleadas en la siembra

**Tabla 2.** Descripción y ubicación de las parcelas experimentales

**Tabla 3.** Duración del cultivo en las parcelas experimentales. CL (Carhuamayo-ladera), CP (Carhuamayo-plano), OL (Óndores-ladera), OP (Óndores-plano), AA (Achipampa) y MM (Masma)

**Tabla 4.** Estadísticas descriptivas de las variables biométricas de la parte aérea y radicular de la planta *Lepidium meyenii*. Se muestra el promedio  $\pm$  error estándar diferenciado por parcela, accesión y disposición de suelo. Las letras sobre las barras representan las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), resultado de la prueba a posteriori LSD.

**Tabla 5.** Estadística descriptiva de las características fisicoquímicas del suelo en las 6 parcelas. Se muestra el promedio  $\pm$  error estándar los monitoreos. N: número de monitoreos realizados por parcela.

**Tabla 6.** ANOVA de 3 vías para estimar el efecto de la parcela, disposición de suelo y la accesión sobre la supervivencia final de las plantas.

**Tabla 7.** Modelo de regresión logística para estimar el efecto de la accesión y la disposición de suelo sobre la supervivencia de plantas en las 3 parcelas de mayor productividad (Óndores-plano (OP), Óndores-ladera (OL) y Carhuamayo-plano (CP)). I = diferencia marginal.

**Tabla 8.** Matriz de correlación de Pearson entre el número de hojas y el diámetro de la roseta de las plantas. Se muestra el coeficiente de correlación (r).

**Tabla 9.** ANOVA de 2 vías con interacción para estimar el efecto de la parcela y la accesión sobre el crecimiento vegetativo (Número de hojas totales y diámetro de la roseta) y el desempeño fisiológico (Fv/Fm) de las plantas. Se muestran los valores de F acompañados de un asterisco (\*) según la significancia del efecto.

**Tabla 10.** ANOVA de 2 vías con interacción para estimar el efecto de la parcela (Óndores-ladera (OL), Óndores-plano (OP) y Achipampa (AA)), la accesión y su interacción sobre las variables asociadas a pigmentos fotosintéticos (concentración y cocientes). Se muestran los valores de F acompañados de un asterisco (\*) según la significancia del efecto.

**Tabla 11.** Matriz de correlación de Pearson de las variables biométricas de la parte aérea y radicular de las plantas. Se muestra el coeficiente de correlación (r).

**Tabla 12.** MANOVA sin interacción para estimar el efecto de la parcela, disposición de suelo y de la accesión sobre las variables biométricas de la parte aérea y radicular de las plantas cosechadas en las 6 parcelas experimentales.

**Tabla 13.** ANOVA de 3 vías para estimar el efecto de la parcela, disposición de suelo y la accesión sobre las variables biométricas de la parte aérea y radicular de las plantas. Se muestran los valores de F acompañados de un asterisco (\*) según la significancia del efecto.

**Tabla 14.** ANOVA 2 vías con interacción para evaluar las diferencias en el porcentaje de humedad entre parcelas y monitoreos.

**Tabla 15.** Matriz de correlación de Pearson entre las variables fisicoquímicas del suelo. Se muestra el coeficiente de correlación (r) con \* según su significancia.

**Tabla 16.** Factores de carga del PCA de las variables fisicoquímicas del suelo. Los dos primeros componentes que explican más del 71% de la varianza total. Los valores reportados son coeficientes de correlación. En negrita se resalta las variables que contribuyeron en mayor grado a cada componente principal.

**Tabla 17.** MANOVA y ANOVAs univariados para evaluar el efecto de la parcela sobre los 2 componentes principales del PCA. Los efectos significativos se encuentran en negrita.

## RESUMEN

El desempeño biológico de las plantas puede ser afectado por las características del suelo, el manejo agronómico y las características de las semillas. *Lepidium meyenii* Walpers, comúnmente denominada “maca”, es una especie endémica del Perú, cultivada en la zona alto-andina (3,500 – 4,550 msnm), muy valorada desde tiempos pre-hispánicos por las propiedades nutricionales de su órgano de reserva subterráneo (hipocótilo). Diversos estudios han investigado sus beneficios en la salud humana y el rol del color del hipocótilo (ecotipos) en dichas propiedades. Sin embargo, pocos estudios han indagado el desempeño del cultivo de diferentes accesiones de semillas, integrando las características del suelo en diferentes pisos altitudinales. En esta tesis evaluamos el desempeño de 5 accesiones de semillas de *L. meyenii* en 6 parcelas experimentales con dos disposiciones del suelo (camellones e hileras en un espacio plano). Las accesiones de semillas proceden de hipocótilos de diferente color (amarillo, rojo y negro) y localidad (provincias de Chupaca y Junín - Región Junín). Dos de las parcelas fueron instaladas en Carhuamayo (en plano 4187 msnm y ladera 4442 msnm), otras dos en Óndores (en plano 4104 msnm y ladera 4173 msnm), una en Achipampa (3820 msnm) y otra en Masma (3554 msnm). Específicamente, evaluamos la supervivencia, y variables asociadas al crecimiento y cosecha del cultivo. En relación al suelo de cada parcela, evaluamos su fertilidad (variables fisicoquímicas), la humedad y la temperatura. La supervivencia fue mínima en los extremos altitudinales (Masma y Carhuamayo-ladera), y alta en ambas parcelas de Óndores. Las características fisicoquímicas del suelo, en particular la acidez y la concentración de fósforo disponible, explicaron en gran medida las diferencias entre parcelas. El bajo porcentaje de humedad (Masma) y las bajas temperaturas (Carhuamayo-ladera) del suelo también podrían jugar un papel limitante en las primeras fases de desarrollo de las plantas. En relación a las accesiones, las semillas procedentes de hipocótilos negros tuvieron menor supervivencia. Respecto a la disposición del suelo, la supervivencia fue mayor en hileras que en camellones. Por otro lado, Masma y Carhuamayo-ladera tuvieron plantas menos frondosas, mientras que las parcelas de Óndores tuvieron plantas con mayor crecimiento vegetativo. El desempeño fisiológico fue óptimo en casi todas las parcelas (excepto en Masma). El rendimiento final del cultivo fue distinto entre parcelas. Las parcelas de Óndores y Carhuamayo-plano presentaron hipocótilos de mejor calidad que las parcelas de Masma, Achipampa y Carhuamayo-ladera, lo cual también lo asociamos a la

fertilidad del suelo y a la disponibilidad de agua que afectó en particular a las parcelas de Masma y Achipampa.

## ABSTRACT

The biological performance of plants may be affected by soil characteristics, agronomic management and seed characteristics. *Lepidium meyenii* Walpers, also known as "maca", is an endemic species of Peru, cultivated in the high Andean zone (3,500 - 4,550 m.a.s.l), highly valued since pre-Hispanic times for the nutritional properties of its underground reserve organ (hypocotyl). Several studies have investigated its benefits in human health and the role of the hypocotyl color (ecotypes) in these properties. However, few studies have investigated the crop performance of different seed accessions, integrating soil characteristics along an altitudinal gradient. In this thesis, we evaluated the performance of five seed accessions of *L. meyenii* in six experimental plots with two different soil arrangements (ridges and rows in a flat space). The seeds accessions come from hypocotyls of different color (yellow, red and black) and locality (provinces of Chupaca and Junín - Junín Region). Regarding the experimental plots, two were installed in Carhuamayo (flat land "plano") 4187 m.a.s.l and in a slope ("ladera") 4442 m.a.s.l), two in Óndores (flat land) 4104 m.a.s.l and in a slope 4173 m.a.s.l), one in Achipampa (3820 m.a.s.l) and one in Masma (3554 m.a.s.l). Specifically, we monitored plant survival and measured variables associated with crop growth and harvest. Simultaneously, in each plot we registered soil moisture, temperature and physicochemical variables related to its fertility. Survival was minimal at the altitudinal extremes (Masma and Carhuamayo-ladera), and high in both plots of Óndores. Soil physicochemical characteristics, in particular the acidity and the available phosphorus concentration, explained in a great way the differences between plots. The low moisture (Masma) and low temperatures (Carhuamayo-ladera) of soil, also limited early stages of plant development. In regard to the accessions, the seeds from black hypocotyls had less survival. In relation to the soil arrangements, higher plant survival was found in rows than in ridges. On the other hand, Masma and Carhuamayo-ladera had plants with less vegetative growth in comparison with plants of the two plots of Óndores. Physiological performance was optimal in almost all plots (except in Masma). The final yield of the crop was different between plots. The hypocotyls from Óndores and Carhuamayo-ladera had better quality than those from Masma, Achipampa and Carhuamayo-ladera, which we also associate with the fertility of the soil and the availability of water that affected in particular the plots of Masma and Achipampa.

## I. INTRODUCCIÓN

El desempeño biológico de las plantas silvestres y cultivadas puede verse afectado por diversos factores tanto ambientales como propios de las plantas. Entre los factores ambientales se han destacado aquellos relacionados con las condiciones climáticas y las características del suelo [Rathcke B & Lacey, 1985; Schulze, 2005]. Diversas investigaciones se han enfocado en la calidad del suelo, la disponibilidad de agua y la temperatura debido a que pueden reducir la producción y el rendimiento de los cultivos a nivel mundial [Pessaraki M, 1999; Santisopasri et al., 2001; Barlow et al., 2015]. Por otro lado, factores intrínsecos de las plantas como diferencias genéticas entre accesiones, o características de las semillas, influyen en el desempeño biológico de las plantas durante la germinación y el crecimiento en campo [Baskin C & Baskin J, 2014; Susko D, 2000].

Para comenzar, el suelo es el sistema en el que crecen las plantas. Sus características fisicoquímicas pueden ser buenos indicadores para definir su calidad [Schoenholtz, et al., 2000]. Estas incluyen a la materia orgánica, la conductividad eléctrica, la disponibilidad de nutrientes, entre otras [Schoenholtz, et al., 2000]. Un desbalance en cualquiera de estas características repercute en el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, se sabe que en suelos con bajo pH (suelos ácidos), las primeras fases de desarrollo pueden verse comprometidas [Shoemaker & Carlson, 1990; Yan F, et al., 1992; Koyama et al., 2001] por diversos mecanismos que incluyen la toxicidad por exceso de protones, aluminio o manganeso [Robson A, 1989] o por insuficiencia de nutrientes como el calcio, magnesio o fósforo [Pessaraki M, 1999].

La baja disponibilidad de agua es otro factor limitante del desempeño de las plantas, que depende de las variaciones en las precipitaciones y de la capacidad del suelo para retener la humedad [Wery et al., 1993]. En particular, las etapas de germinación de semillas y el establecimiento de las plántulas son las más susceptibles al estrés hídrico [Jajarmi V, 2009; Fay P & Schultz M, 2009] ya que algunas características propias de la semilla como la viabilidad y la dormancia podrían verse afectadas [Pérez-García F, et al., 2007]. Por otro lado se sabe que el bajo contenido de humedad en el suelo puede limitar la adquisición de macro y micronutrientes disueltos en el suelo que son absorbidos por el sistema radicular afectando así el crecimiento de las plantas [da Silva E, et al., 2011].

Asimismo, la temperatura representa uno de los factores mas importantes que afectan distintas fases del desarrollo de las plantas [Kanemasu E, et al., 1975]. Por lo general, cada especie se encuentra adaptada a un rango temperatura específico [Schulze, 2005], fuera del cual, su desempeño puede verse comprometido. En particular, para especies de alta-montaña las bajas temperaturas representan un factor de estrés importante [Körner C, 2003]. Por ejemplo, se ha reportado que el frío puede atrasar el inicio de la germinación [Sachs M, 1980] y la emergencia de plántulas, reduciendo el vigor de las mismas [Singh N & Dhaliwal G, 1972] y afectando su establecimiento.

Por otro lado, el uso de estrategias de manejo agronómico es importante para contrarrestar el efecto de factores como los mencionados anteriormente que limitan el crecimiento de las plantas y reducen el rendimiento de los cultivos. Una de las estrategias empleadas es la modificación del terreno mediante la preparación del suelo, como es el caso de los andenes, camellones o cochas en los Andes Peruanos [Halloy S, 2005]. Se conoce que estas técnicas son empleadas hasta el día de hoy ya que previenen la erosión de los suelos, mejoran la irrigación y el drenaje del suelo, y mitigan el efecto de las heladas [Halloy S, 2005; Lhomme P & Vacher J, 2003].

Ante estas posibles situaciones de estrés, las plantas pueden presentar diferencias en su desempeño biológico. Si bien estas variaciones pueden darse entre especies, también pueden presentarse entre eco-tipos de una misma especie [Adugna A, 2013]. Algunas de estas diferencias se han atribuido a las características de las semillas [Baskin C & Baskin J, 2014]. Se sabe que cada semilla posee rasgos definidos por la carga genética de los padres y por las condiciones ambientales en las cuales estas semillas se desarrollaron y maduraron. Algunos de estos rasgos son: el peso de las semillas, el nivel de dormancia, la tasa de germinación y la longevidad [Fenner M, 1991; Simons A & Johnston M, 2000], y algunos de estos rasgos, como el peso de las semillas, ha sido ampliamente estudiado por tener implicancias sobre los primeros estadios de crecimiento, como la germinación, emergencia, supervivencia, tamaño de plántulas e inclusive habilidad competitiva entre las plántulas para asegurar el establecimiento y futuro crecimiento [Susko D, 2000].

En este contexto, un ecosistema terrestre particularmente adverso para las plantas es el ecosistema de alta montaña [Billings W & Mooney H, 1968]. Este ecosistema está presente

al menos en el 3% de la superficie terrestre total [Körner C, 2003], con algunas variaciones en las condiciones ambientales debido a la topografía [Mani M & Giddings L, 1980]. A pesar de esto, poseen características en común, tales como la baja presión y temperatura atmosférica, bajo contenido de humedad y mayor incidencia de la radiación [Körner C, 2003; Mani M & Giddings L, 1980]. Por otro lado, los suelos tienen alto contenido de materia orgánica pero con un bajo reciclaje de nutrientes debido a las bajas temperaturas [Körner C, 2003]. La zona alto-andina del Perú pertenece al ecosistema tropical de alta montaña [Mani M & Giddings L, 1980; Rundel et al., 1994], que se caracteriza por tener mayor variación de temperatura inter-diaria que variación estacional, además de la constante presencia de heladas gran parte del año [Wilcox et al., 1988]. Los meses de lluvia se concentran en una temporada del año (Septiembre-Abril) [Wilcox et al., 1988; Arbizu et al., 1991], siendo los meses siguientes (Mayo-Agosto) periodos de “sequía” o lluvias muy esporádicas, en donde las temperaturas máximas durante el día y las temperaturas mínimas durante la noche se acentúan (14°C y 7°C en promedio respectivamente), presentándose durante estos meses la mayor recurrencia de heladas [Smith A & Young T, 1987]. Por otro lado, sus suelos son de naturaleza ácida, con baja meteorización y tienen baja disponibilidad de ciertos elementos esenciales para el crecimiento de las plantas [Wilcox et al., 1988].

En este entorno crece *Lepidium meyenii* Walpers, siendo una de las pocas especies que ha logrado acondicionarse a este ecosistema tan estresante [Flores et al., 2003]. Esta especie comúnmente conocida como “maca”, es la única representante de la familia Brassicaceae que ha logrado ser domesticada en los Andes [Arbizu et al., 1991]. Actualmente, el rango de distribución de este cultivo se encuentra restringido a las ecorregiones de Suni y Puna [Quiros et al., 1996] propuestas por el geógrafo Javier Pulgar Vidal, entre los 3500 y 4450 msnm de los andes centrales del Perú [Arbizu et al., 1991].

La “maca” es un cultivo que se maneja bajo el sistema de secano [Aliaga R, 1999], y es por esto que la siembra se da preferentemente al comienzo de las lluvias, entre los meses de Setiembre y Octubre; sin embargo puede retrasarse dependiendo del inicio de las lluvias. El terreno debe ser acondicionado (roturado, desterroneado y mullido) con anticipación para un mejor crecimiento y rendimiento de las plantas. La siembra de las semillas se da mediante la técnica de voleo, combinandolas con tierra y esparciendolas sobre el terreno. Luego de un

periodo de 7-8 meses el órgano de reserva (en adelante: hipocótilo) es cosechado y destinado a la producción de semillas botánicas o cosechados para su transformación y consumo.

El hipocótilo es muy codiciado por su alto valor nutricional y medicinal [Gonzales et al., 2014] y se distingue por presentar una gran variedad de colores (ecotipos) [Arbizu et al., 1991], a los cuales algunos trabajos les atribuyen diferente composición química. Por ejemplo, se sabe que la “maca” ploma cuenta con una mayor concentración de glucosinolatos mientras que la “maca” amarilla y violeta tienen mayor concentración de macaenos y macamidas respectivamente [Clément et al., 2010]. Asimismo también se ha reportado que sus propiedades medicinales también parecen diferir entre ecotipos. Por ejemplo, se ha sido ampliamente documentado que la “maca” negra mejora la producción y movilidad de espermatozoides, la memoria y el aprendizaje, el control de la glucosa y la resistencia física, mientras que la “maca” roja tiene efectos beneficiosos sobre la hiperplasia benigna de próstata y en la osteoporosis [Gonzales et al., 2014]. Estas cualidades, tanto químicas como medicinales, han hecho de la “maca” un producto muy comercial y según estimaciones del Ministerio de agricultura y riego, entre el 2011 y el 2015 tanto el área de cultivo (de 2.1 a 7.9 miles de hectáreas) como la producción (17.3 a 58.2 toneladas) de “maca” tuvieron un incremento exorbitante [MINAGRI, 2016].

A pesar del auge en su producción, su rendimiento se ve limitado en cualquiera de sus fases de desarrollo (germinación, establecimiento, crecimiento vegetativo y crecimiento radicular) debido a las condiciones ambientales de su entorno [Flores et al., 2003; Arbizu et al., 1991]. No obstante, son limitados los trabajos que se enfocan en evaluar el efecto de las condiciones ambientales en diferentes etapas del desarrollo del cultivo en su ambiente natural, y que estudien posibles estrategias de manejo agronómico que puedan mejorar la producción. Asimismo, no se conoce si existen diferencias en el desempeño entre accesiones de semillas de distinta procedencia (localidad y color de hipocótilo).

En esta tesis evaluamos la influencia de las condiciones del suelo asociadas a su fertilidad, disponibilidad de agua, temperatura y la técnica de preparación del suelo (disposición del suelo) sobre el desempeño de plantas de *Lepidium meyenii* de 5 accesiones de semillas localizadas a diferente altitud durante su ciclo vegetativo (siembra-cosecha de

hipocótilos).procedentes de hipocótilos de diferente color y localidad en zonas representativas del cultivo de “maca”

## **II. HIPÓTESIS**

El desempeño biológico de las plantas de *L. meyenii* durante su crecimiento en campo (fase vegetativa), variaría de acuerdo a las condiciones del suelo (fertilidad, disponibilidad de agua, temperatura y la disposición del suelo), y la calidad de las semillas.

## **III. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Investigar la influencia de las condiciones del suelo y la calidad de las semillas sobre el desempeño biológico de *L. meyenii*.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Relacionar el desempeño de plantas de *L. meyenii* con las características del suelo (fertilidad, disponibilidad de agua y temperatura).
2. Evaluar el desempeño de plantas de *L. meyenii* frente a dos disposiciones de suelo.
3. Evaluar si hay diferencias en el desempeño de las plantas de distintas accesiones.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 1. Material vegetal

#### 1.1 Clasificación taxonómica APG IV (2016)

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Brassicales

Familia: Brassicaceae

Género: *Lepidium*

Especie: *Lepidium meyenii* Walpers

Nombre común: “maca”

#### 1.2 Descripción Botánica y ciclo biológico

*Lepidium meyenii* es una herbácea bienal de crecimiento arrosetado como posible mecanismo de adaptación a las condiciones ambientales como los fuertes vientos y el frío [Gonzales et al., 2009]. Es la única especie del género *Lepidium* que posee un órgano de reserva engrosado y subterráneo [Dostert et al., 2009] comúnmente conocido como “hipocótilo”, el cual se define como una zona de transición entre la raíz y el tallo de la planta [Marín-Bravo M, 2003]. Los hipocótilos pueden presentarse en una gran variedad de colores y formas [Aliaga R, 1999]. Esta especie posee tallos decumbentes y escasamente ramificados. Por otro lado, sus hojas presentan dimorfismo, siendo las hojas de la roseta durante la fase vegetativa más grandes (10-15 cm de largo), carnosas, pinnatifidas hasta bipinnatisectas, mientras que las hojas caulinares en los botones florales durante la fase reproductiva son más reducidas, enteras, lobadas o crenadas [Dostert et al., 2009]. Las flores se encuentran agrupadas en inflorescencias dispuestas en racimos compuestos (panículas) [Arbizu et al., 1991; Dostert et al., 2009]. Los frutos son silicuas dehiscentes de 4 a 5 mm de largo con dos cavidades y en el interior de cada una habrá una semilla ovoide pequeña [Arbizu et al., 1991].

Como se mencionó anteriormente, “maca” es una especie bienal. Durante el primer año se da la fase vegetativa que consiste en el desarrollo de la roseta foliar y el ensanchamiento del hipocótilo [Aliaga R, 2004] (Fig.1); esta fase tendrá una duración aproximada de 7 a 9 meses. En el segundo año se da la fase reproductiva a partir de la resiembra de los hipocótilos. Durante esta fase los brotes florales aparecerán agrupados al centro de la roseta o en las ramas generativas producidas por el hipocótilo [Quirós C & Aliaga R, 1997]. Las ramas generativas primarias se ramificarán formando ramas generativas secundarias. Si bien las inflorescencias dispuestas en ambas ramas (primarias y secundarias) producen semillas, la mayor producción se dará en las secundarias [Quirós C & Aliaga R, 1997]. Todo el proceso de producción de racimos y fructificación, maduración y dehiscencia de frutos tomará aproximadamente 4-5 meses [Aliaga R, 2004]

### **1.3 Centro de Origen y distribución del cultivo**

La domesticación de esta especie probablemente comenzó hace 1300 a 2000 años atrás en San Blas, Junín (Ahora: Óndores) [Quirós C & Aliaga R, 1997]. Actualmente, el primer centro productor de “maca” se localiza entre las regiones de Junín y Pasco, en la Meseta del Bombón, específicamente en los distritos de Junín, Carhuamayo, Óndores y San Pedro de Cajas (Región Junín), y en los distritos de Ninacaca, Vicco y Huayllay (región Pasco) a 3500-4450 msnm [Arbizu et al., 1991; Aliaga et al., 2011]. Por otro lado, las zonas altas del valle del Mantaro (región Junín) se constituyen como el segundo centro productor de “maca” [Aliaga R, 1999]. Hoy en día, el cultivo se ha extendido a las regiones de Ancash, Huánuco, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac y Puno; sin embargo aquí la producción está dirigida al autoconsumo o a la venta local [Aliaga et al., 2011].



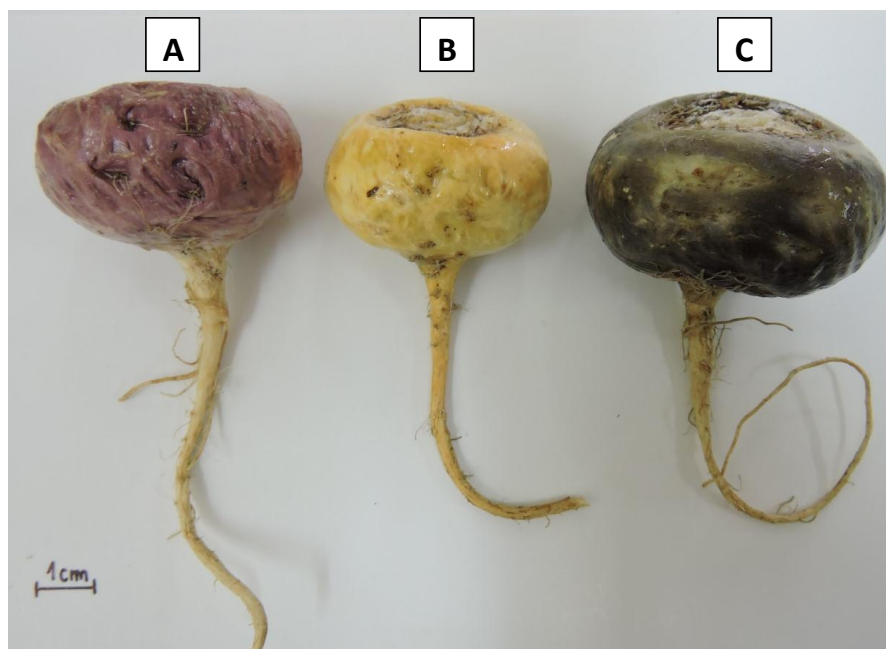
**Figura 1.** Fase de crecimiento vegetativo y formación del órgano de reserva de *L.meyenii*.

#### **1.4 Manejo agronómico**

El terreno elegido para la siembra de “maca” debe ser descansado por bastante tiempo, el cual en la lengua quechua es conocido como *Purum* (suelos vírgenes, es decir que no han sido empleados para siembra o descansados por más de 10 años). También puede hacerse uso de suelos anteriormente ya sembrados, como segundo cultivo (*K'allpar*) por ejemplo, después de papa o cereales [Aliaga R, 1999; Arbizu et al., 1991]. Se considera que el suelo debe contar con buena fertilidad, no ser muy húmedo y debe tener pendiente moderada para evitar la inundación durante la época de lluvias. Durante los meses de Marzo, Abril y Mayo se realiza la roturación del suelo o “barbecho” para airear el suelo, eliminar malezas y favorecer la descomposición de las mismas para nutrir el suelo. Luego, un mes previo a la siembra, se procede a desterronear y mullir el suelo para garantizar una buena germinación. La siembra se realiza al voleo, usualmente se combina 1kg de semillas con 15kg de suelo para una siembra de alta densidad, o 1kg de semilla con 25 kg de tierra para una siembra de baja densidad [Quirós C & Aliaga R, 1997]. Si la densidad de plantas es muy alta puede realizarse un raleo para obtener un producto de mayor tamaño [Arbizu et al., 1991]. La cantidad de semilla pura por hectárea puede variar entre 3.5 a 4 kg. Luego de 7 a 8 meses, los hipocótilos alcanzan su máximo desarrollo y pueden ser cosechados.

#### **1.5 Obtención de las semillas**

En la siembra se emplearon semillas obtenidas de la campaña 2015 procedentes de plantas con hipocótilos de diferente color (rojo, amarillo y negro) (Fig.2) y localidad (Junín y Chupaca), proporcionadas por 3 productores de ambas localidades (El Sr. Moisés Alderete Yali- Representante del Centro de Producción Semillero de “maca”, el Sr. Efraín Zúñiga Molina-Presidente de APROMAC (Asociación de productores de “maca”) del Valle del Mantaro y el Sr. Arturo Cárdenas Condori- Gerente de AM- Orgánicos del Perú E.I.R.L). Las semillas fueron colectadas a inicios del mes de Diciembre del 2015 y llevadas al laboratorio de Ecología Evolutiva. Fueron limpiadas, pesadas y separadas en viales. Se trabajó con un total de 5 accesiones (Tabla 1)



**Figura 2.** Hipocótilos de color: rojo (A), amarillo (B) y negro (C) que dieron origen a las semillas empleadas en la siembra.

<b>Hipocótilo</b>		<b>Productor</b>	<b>Accesión</b>
<b>Color</b>	<b>Localidad</b>		
Rojo	Junín	Moisés Alderete Yali	RMA
Amarillo	Chupaca	Efraín Zúñiga Molina	AEZ
Negro	Chupaca	Arturo Cárdenas Condori	NAC
Amarillo	Junín	Moisés Alderete Yali	AMA
Negro	Junín	Moisés Alderete Yali	NMA

**Tabla 1.** Accesiones empleadas en la siembra

## 2. Diseño de estudio

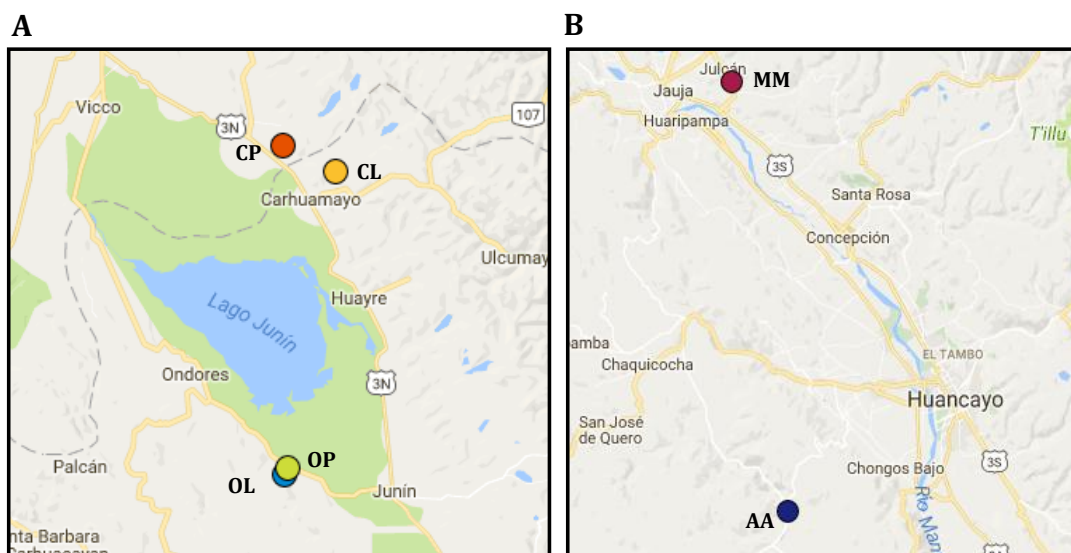
### 2.1 Descripción de las parcelas experimentales

Se instalaron 6 parcelas experimentales entre 3500 y 4450 msnm (rango de distribución del cultivo) (Tabla 2, Fig.3). Específicamente se localizaron en los distritos de Óndores (N=2), Carhuamayo (N=2), ambos pertenecientes a la provincia de Junín, Yanacancha (N=1) de la provincia de Chupaca y Masma (N=1) de la provincia de Jauja. Los 3

primeros distritos fueron elegidos por ser pertenecer a los centros productores de “maca”: en la meseta del Bombón (Junín y Carhuamayo) y en el valle del Mantaro (Yanacancha). Mientras tanto, Masma fue elegido ya que en zonas aledañas a este terreno actualmente se cultiva “maca”. Los espacios fueron proporcionados por miembros de asociaciones productoras de “maca” en los distritos de Carhuamayo y Óndores, y agricultores que poseían terrenos en los distritos de Yanacancha y Masma.

Distrito	Inclinación	Denominación de las parcelas	Altura (msnm)	Coordenadas	
				S	W
Carhuamayo	Pendiente	Carhuamayo-ladera (CL)	4442	10° 53.778'	76° 02.294'
Carhuamayo	Plano	Carhuamayo-plano (CP)	4187	10° 52.482'	76° 05.007'
Ondores	Pendiente	Ondores-ladera (OL)	4173	11° 08.889'	76° 04.919'
Ondores	Plano	Ondores-plano (OP)	4104	11° 08.598'	76° 04.712'
Yanacancha	Pendiente	Achipampa (AA)	3820	12° 10.297'	75° 22.427'
Masma	Pendiente	Masma (MM)	3554	11° 46.288'	75° 25.743'

**Tabla 2.** Descripción y ubicación de las parcelas experimentales



**Figura 3.** Mapas geográficos de las zonas de estudio: Zona alta (A) y Zona baja (B) con la ubicación de las parcelas experimentales: CL (Carhuamayo-ladera), CP (Carhuamayo-plano), OL (Óndores-ladera), OP (Óndores-plano), MM (Masma) y AA (Achipampa).

## 2.2 Acondicionamiento del suelo

Todos los terrenos empleados en la siembra fueron suelos vírgenes. Con respecto al acondicionamiento del suelo. En **Carhuamayo** el terreno de Carhuamayo-ladera se roturó a finales del mes de Marzo y se desterroneó a finales del mes de Septiembre. Por otro lado, el terreno de Carhuamayo-plano se roturó en Abril y se desterroneó a finales de Noviembre. En **Óndores**, ambos terrenos se roturaron y desterronearon a finales del mes de Octubre. Sin embargo, el desterroneo se repitió en la mañana del día de la siembra en Óndores-ladera y un día antes de sembrar en Óndores-plano. En el distrito de Yanacancha, el terreno de **Achipampa** se roturó los primeros días de Octubre y se desterroneó en la mañana del día de la siembra. Por último, en **Masma**, el terreno se roturó y desterroneó un día antes de la siembra y se le aplicó estiercol de vaca como abono por recomendación del dueño del terreno.

## 2.3 Siembra

La siembra en las zonas altas (Junín y Carhuamayo) se llevó a cabo en la quincena del mes de Diciembre, 2015. Mientras que en las zonas bajas (Achipampa y Masma) se realizó los primeros días de Enero del 2016 debido al retraso de las lluvias. La duración del experimento en cada parcela instalada fue distinta debido a la diferencia en la fecha de siembra y en la fecha de cosecha (Tabla 3).

<b>Parcela</b>	<b>Fecha de siembra</b>	<b>Fecha de cosecha</b>	<b>Duración del cultivo (días)</b>
CL	13-dic	24-jul	224
CP	14-dic	28-jun	197
OL	14-dic	23-jul	222
OP	15-dic	23-jul	221
AA	05-ene	15-jul	192
MM	06-ene	14-jun	160

**Tabla 3.** Duración del cultivo en las parcelas experimentales. CL (Carhuamayo-ladera), CP (Carhuamayo-plano), OL (Óndores-ladera), OP (Óndores-plano), AA (Achipampa) y MM (Masma)

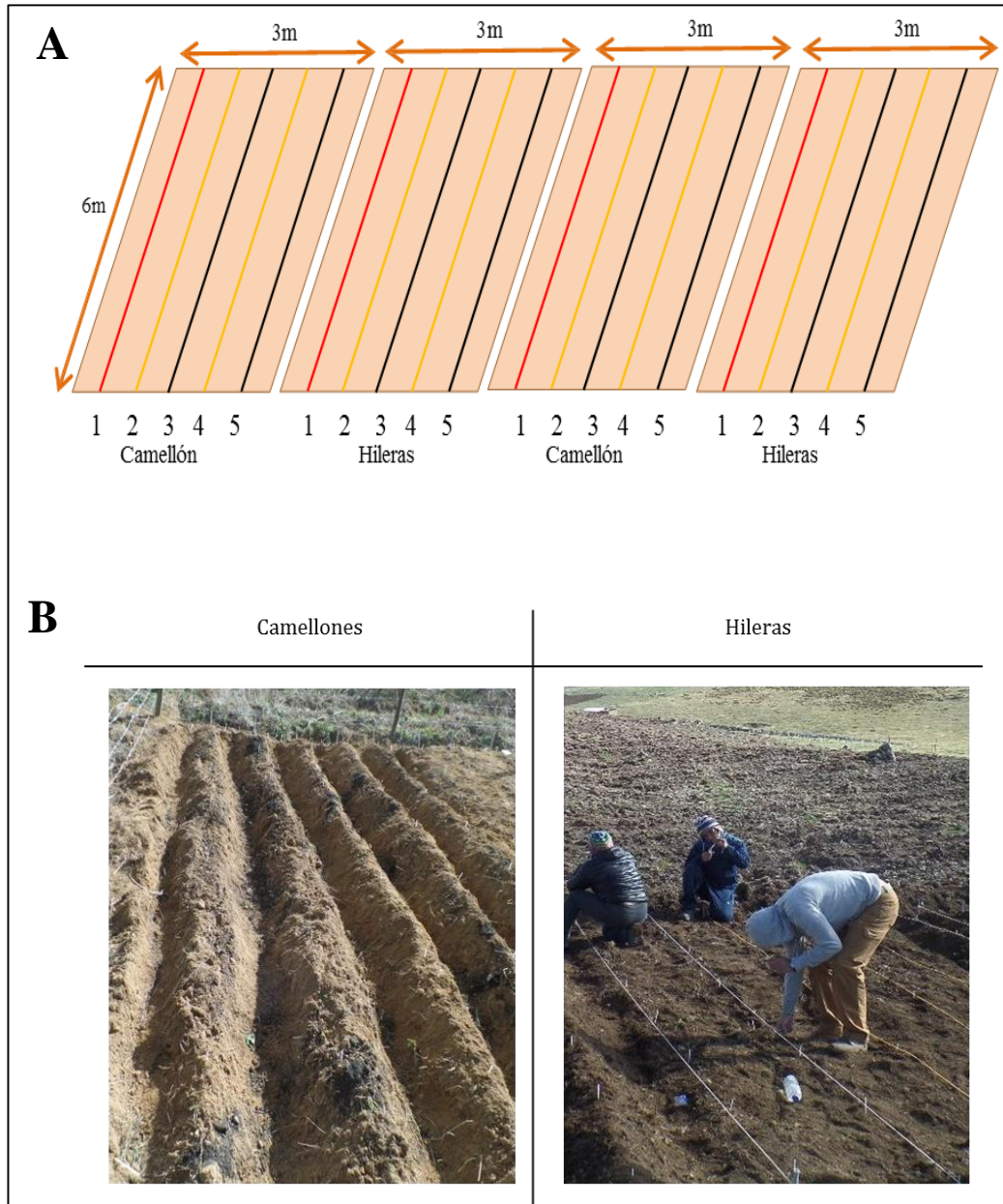
## 2.4 Modelo de siembra

Cada parcela tuvo una dimensión de 6 x 12m, las cuales se dividieron en 4 bloques adyacentes entre sí de 6 x 3m (Imagen 3A). En cada par de bloques empleamos una disposición de suelo distinta: camellones o también conocidos como “*waru-waru*” e hileras al ras de suelo (Imagen 3B).

En cada bloque de camellones o hileras, se diferenciaron cinco filas. En cada fila se dispuso semillas de una accesión diferente. En cada fila se sembraron cada 15cm tres semillas las cuales fueron embebidas con ácido giberélico (400 mg/L) por 1h la noche anterior. El ácido giberélico es un promotor hormonal que favorece la síntesis de alfa-amilasas (hidrolasas) que actúan degradando el almidón [Carlson P, 1972] para que se lleve a cabo el proceso de germinación. Este tratamiento pre-germinativo lo realizamos con la finalidad de asegurar la germinación de al menos una de las semillas por punto de siembra.

En total sembramos 120 semillas por fila. Por cada accesión y disposición de suelo se sembraron 240 semillas (120 semillas por fila x 2 camellones/hileras al ras del suelo). Finalmente, se tuvo un total de 2400 semillas de “maca” sembradas en cada parcela experimental (120 semillas x 5 accesiones x 4 bloques), a excepción de la parcela de Óndores-plano en la que solo se sembraron 2145 semillas debido a una modificación en el área de la siembra.

Al finalizar la siembra los terrenos fueron cercados para evitar el ingreso de animales.



**Figura 4.** (A) Modelo de siembra. Accesiones: 1=RMA, 2=AEZ, 3=NAC, 4=AMA, 5=NMA. (B) Disposición de suelo.



**Figura 5.** Fotos de las parcelas experimentales instaladas. **A:**Carhuamayo-ladera (CL), **B:** Carhuamayo-plano (CP), **C:** Óndores-ladera (OL), **D:** Óndores-plano (OP), **E:** Achipampa (AA), **F:** Masma (MM).

## **2.5 Monitoreos**

Se monitoreó la supervivencia y crecimiento de las plantas de modo mensual en la medida de lo posible. Sin embargo, debido a malas condiciones climáticas y dificultades temporales en el acceso a las parcelas experimentales (cierres de carreteras, lluvias fuertes y granizo), los monitoreos se desfasaron o no se pudieron realizar en algunas parcelas experimentales. Sin embargo se contó con al menos 4 a 5 monitoreos por parcela experimental.

Cabe resaltar que en la parcela de Carhuamayo-plano se realizó una cosecha de emergencia en el mes de Junio debido al ingreso de ovejas al terreno a pesar de que éste se encontraba cercado. Por esta razón, la supervivencia final en esta parcela se consideró como el número de plantas contadas en el monitoreo previo.

### **2.5.1 Evaluación del desempeño de *L. meyenii* en las parcelas experimentales**

#### **2.5.1.1 Supervivencia**

En cada monitoreo se realizó la identificación y conteo de las plantas de *L. meyenii* diferenciándolas según la accesión y disposición de suelo en cada parcela experimental.

#### **2.5.1.2 Crecimiento**

Se registró el crecimiento de las plantas por accesión en cada parcela durante los monitoreos, contando el número de hojas de la roseta o midiendo el diámetro de la roseta teniendo en cuenta las hojas más largas (opuestas) como referencia (N= 15 a más plantas). Sin embargo, en los resultados solo se reportan las mediciones del tercer monitoreo (zonas altas: finales de Abril, zonas bajas: quincena de Mayo) debido a que en esta salida se midieron ambas variables en todas las parcelas experimentales.

### **2.5.1.3 Desempeño fisiológico: Fluorescencia de la clorofila (Fv/Fm)**

Este parámetro nos permitió comparar el desempeño fisiológico de las plantas entre accesiones y parcelas. Para esto se empleó un fluorímetro (OS-30P, Opti-Sciences, USA) y se sometió a oscuridad las hojas de 15 a 20 plantas por accesión. Luego de adaptarlas a oscuridad, se les expuso a un haz de luz modulado de intensidad lo suficientemente baja para que se lleve a cabo el proceso de fotosíntesis pero que permitió medir la fluorescencia mínima de la clorofila (Fo). Después, se empleó un haz de luz de alta intensidad y de baja duración para cerrar los centros de reacción del fotosistema II y solo medir la fluorescencia máxima (Fm). La diferencia entre la fluorescencia máxima (Fm) y la mínima (Fo) es “Fv” o también denominada fluorescencia variable. El ratio entre la fluorescencia variable y la fluorescencia máxima (Fv/Fm) es una medida de la eficiencia máxima del fotosistema II, es decir, mide su rendimiento si todos los centros de reacción del PS II estuviesen abiertos. Un valor de Fv/Fm dentro de un rango de 0.79 a 0.84 es un valor óptimo y si el valor de este ratio fuese menor, podría indicar un posible estrés [Maxwell & Johnson, 2000]

$$Fv / Fm = (Fm - Fo) / Fm$$

### **2.5.1.4 Variables bioquímicas: Pigmentos fotosintéticos**

Para esta evaluación solo obtuvimos muestras de 3 parcelas experimentales (parcelas de Óndores y de Achipampa). En Masma, las plantas no prosperaron y no se pudo extraer muestra para la evaluación. En Carhuamayo-plano, los animales que ingresaron se comieron toda la parte vegetativa limitando la recolección de hojas. Mientras que en Carhuamayo-ladera, no se pudo ingresar a la parcela debido al mal tiempo (lluvia y granizo) durante ese monitoreo y en la siguiente fecha (un mes después) las plantas se veían muy senescentes.

Este análisis nos permitió hacer una comparación del potencial fotosintético de las plantas entre accesiones y parcelas. Para esto, en cada parcela se recolectaron 2 hojas de 15 plantas por accesión seleccionadas aleatoriamente y se cortaron y pesaron hasta conseguir aproximadamente 0.3g, los cuales fueron colocados en crio-viales en 5ml de etanol al 96% y se dejaron macerar a 4°C. Luego estas muestras se centrifugaron a 9250 rpm por 2 min;

300  $\mu$ L del sobrenadante fueron colocados en placas de Elisa para leer la absorbancia a 664.1, 648.6 y 470 nm para la clorofila a (Ca), b (Cb) y los carotenoides (Cx+c), respectivamente [Brix H, 2009]. Luego se calculó la concentración de pigmentos fotosintéticos según las ecuaciones siguientes:

$$C_a = \frac{(13.36A_{664.1} - 5.19A_{648.6}) * V}{FW} \quad mg.g^{-1}$$

$$C_b = \frac{(27.43A_{648.6} - 8.12A_{664.1}) * V}{FW} \quad mg.g^{-1}$$

$$C_{a+b} = \frac{(5.24A_{664.1} + 22.24A_{648.6}) * V}{FW} \quad mg.g^{-1}$$

$$C_{x+c} = \frac{(4.785A_{470} + 3.657A_{664.2} - 12.76A_{648.1}) * V}{FW} \quad mg.g^{-1}$$

Donde:  $A_{470}$ ,  $A_{648.6}$ ,  $A_{664.1}$  son las absorbancias a 470, 648.6 y 664.1 nm. “V” es el volumen de dilución de la muestra y “FW” es el peso fresco de la muestra.

Además, con las concentraciones de clorofilas y carotenoides se estimó el cociente de clorofilas Ca/Cb, el cual es un indicador de la adaptación del aparato fotosintético a la luz, y el cociente Clorofilas totales/Carotenoides totales ((Ca+b)/ (Cx+c)), que es un indicador de senescencia, estrés y daño al aparato fotosintético de la planta [Lichtenthaler H & Buschmann C, 2001].

### 2.5.1.5 Mediciones post-cosecha

En cada parcela, las plantas fueron cosechadas distinguiéndolas por accesión y disposición de suelo en mallas de cosecha y fueron almacenadas en bolsas de rafia con geles congelados para mantener el ambiente frío y evitar la marchitez y pudrición de las plantas, y trasladadas en un lapso de 12 horas hasta el Laboratorio de Ecología Evolutiva, LID-UPCH Lima-Perú en donde fueron congeladas hasta realizar las mediciones respectivas. Con respecto a la

parte aérea, se contó el número de hojas totales (vivas y muertas), se obtuvo el peso fresco y seco y se calculó el porcentaje de humedad (aérea). En relación a la parte radicular, se pesaron los hipocótilos frescos y se midieron dos diámetros perpendiculares de la parte más engrosada del hipocótilo con ayuda de un calibrador (vernier). Con estos dos diámetros se estimó un diámetro promedio (D). Asimismo estimamos la longitud del hipocótilo (L) como la medida desde el punto de inserción de las hojas hasta la base del ensanchamiento del hipocótilo donde se inicia la raíz, la cual coincidía con la zona con mayor acumulación de biomasa. Además se midió la longitud radicular total considerada como la medida desde el punto de inserción de las hojas hasta el vértice inferior de la raíz (Palomino, 1998). Por último se estimó el ratio “Longitud del hipocótilo / Diámetro promedio” o “L/D” como un estimador de la forma de los hipocótilos, donde el valor más cercano o menor a 1 indicaba una forma más esférica y un valor mayor a 1 indicaba una forma más alargada.

## **2.5.2 Suelo**

En cada salida se procedió al muestreo del suelo (siembra, monitoreos y cosecha). Se tomaron 3 muestras de cada parcela experimental (de los dos extremos y el centro) hasta una profundidad de ca. 20 cm. Para estimar la humedad se procedió a la evaluación de cada muestra colectada (por parcela y por salida). Para la fertilidad, se procedió a mezclar las tres muestras de cada parcela experimental en cada monitoreo.

### **2.5.2.1 Fertilidad**

El análisis de fertilidad fue realizado en el Laboratorio de suelos de la Universidad Agraria La Molina (UNALM). Las variables evaluadas fueron: pH, %Mo (materia orgánica), CE(es) (conductividad eléctrica), K ppm (concentración de potasio disponible), P ppm (concentración de fósforo disponible),  $Al^{+3}+H^{+}$  meq/100 (concentración de acidez intercambiable).

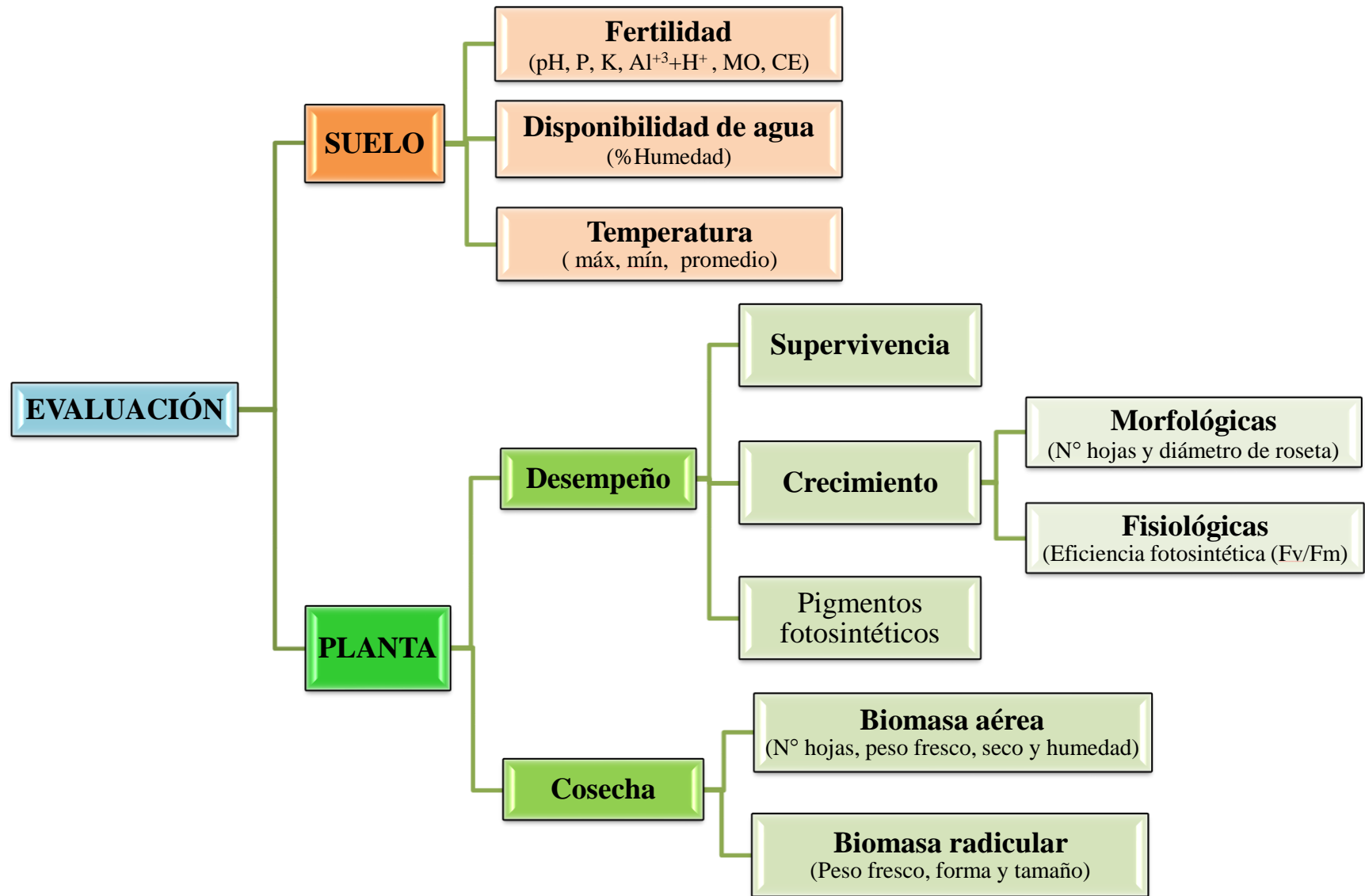
### **2.5.2.2 Porcentaje de humedad**

De las muestras de suelo se pesó 2g de tierra y se llevaron a la estufa a 40°C durante 72h. Los valores obtenidos se reemplazaron en la siguiente fórmula:

$$\% \text{ humedad} = (\text{peso fresco} - \text{peso seco}) * 100 / \text{peso fresco}.$$

### **2.5.2.3 Temperatura**

Se registró la temperatura del suelo cada 30 minutos durante todo el periodo de crecimiento de las plantas (siembra – cosecha), mediante un registrador digital (HOBO Pendant ® Temperature/Light 8K Data Logger, Part # UA-002-08) en cada parcela de estudio. Cada registrador fue enterrado aproximadamente 4 cm de la superficie del suelo en una de las esquinas de las parcelas experimentales (la posición no varió a lo largo de toda la evaluación). Posteriormente, en base a los datos de temperatura obtenidos se calculó la temperatura mínima, máxima y promedio diaria.



**Figura 6.** Cuadro resumen de las variables evaluadas en esta tesis.

### 3. Análisis de datos

Antes de realizar los análisis, se tomó en cuenta que las variables estuvieran normalizadas para cumplir con los supuestos del ANOVA; en caso contrario, se normalizaron a través de transformaciones (logaritmo, raíz cuadrada, según corresponda).

En relación a la supervivencia se realizaron dos análisis: (1) un ANOVA de 3 vías de efectos principales para evaluar la influencia de la parcela, la disposición del suelo y la accesión sobre el número final de plantas de *L.meyenii*. Las pruebas a posteriori (LSD de Fisher), permitieron comparar los promedios entre parcelas, accesiones y disposición de suelo. Además, se realizó (2) un modelo de regresión logística considerando las 3 parcelas de mayor productividad (Óndores-plano, Óndores-ladera, Carhuamayo-plano) para ver en detalle los efectos de las accesiones, la disposición del suelo y la posible interacción entre ambos factores. En la evaluación de crecimiento y desempeño fisiológico se realizó un ANOVA de 2 vías factorial, para evaluar el efecto de la parcela y la accesión. Con respecto al análisis de pigmentos fotosintéticos, se realizó un ANOVA de 2 vías factorial (factores: parcela y accesión) en el que solo se incluyeron 3 parcelas experimentales (Óndores-plano, Óndores-ladera y Achipampa) debido a falta de muestras (Masma), invasión de animales que consumieron la parte vegetativa (Carhuamayo-plano) y mal tiempo (Carhuamayo-ladera). Además, se evaluó la asociación entre las variables biométricas de los hipocótilos cosechados mediante una correlación de Pearson, luego se realizó un ANOVA de 3 vías de efectos principales para comparar las variables biométricas de los hipocótilos según la parcela, accesión y disposición de suelo. Las pruebas a posteriori (LSD de Fisher), permitieron comparar los promedios de las variables biométricas entre parcelas, accesiones y disposición de suelo

En relación al suelo, el porcentaje de humedad fue analizado mediante un ANOVA de 2 vías factorial para ver las diferencias entre parcelas y monitoreos; en este análisis solo se consideraron las salidas en donde se midió el porcentaje humedad para todas las parcelas (4 monitoreos). Con respecto a la fertilidad del suelo, se evaluaron las asociaciones entre los parámetros químicos mediante una correlación de Pearson. Debido a la correlación entre las variables, se realizó un análisis de componentes principales (PCA). Los dos primeros

componentes (PC1 y PC2) explicaron más del 71% de la varianza total (Tabla 16-Anexos, eigen-value > 1). El PC1 asociaba las variables: pH, fósforo disponible y contenido de aluminio intercambiable. Mientras que el PC2 asociaba la conductividad eléctrica y la concentración de potasio disponible (Tabla 16-Anexos). Posteriormente, se emplearon los puntajes (scores) para realizar un MANOVA y detectar el efecto general de la parcela sobre los dos componentes principales. Debido a que en el MANOVA la parcela tuvo efecto significativo, se realizaron ANOVAs univariados para evaluar el efecto de la parcela sobre cada componente principal. Las pruebas a posteriori (LSD de Fisher), permitieron diferenciar las parcelas en los dos componentes principales evaluados (PC1 y PC2).

## V. RESULTADOS

### 1. Planta

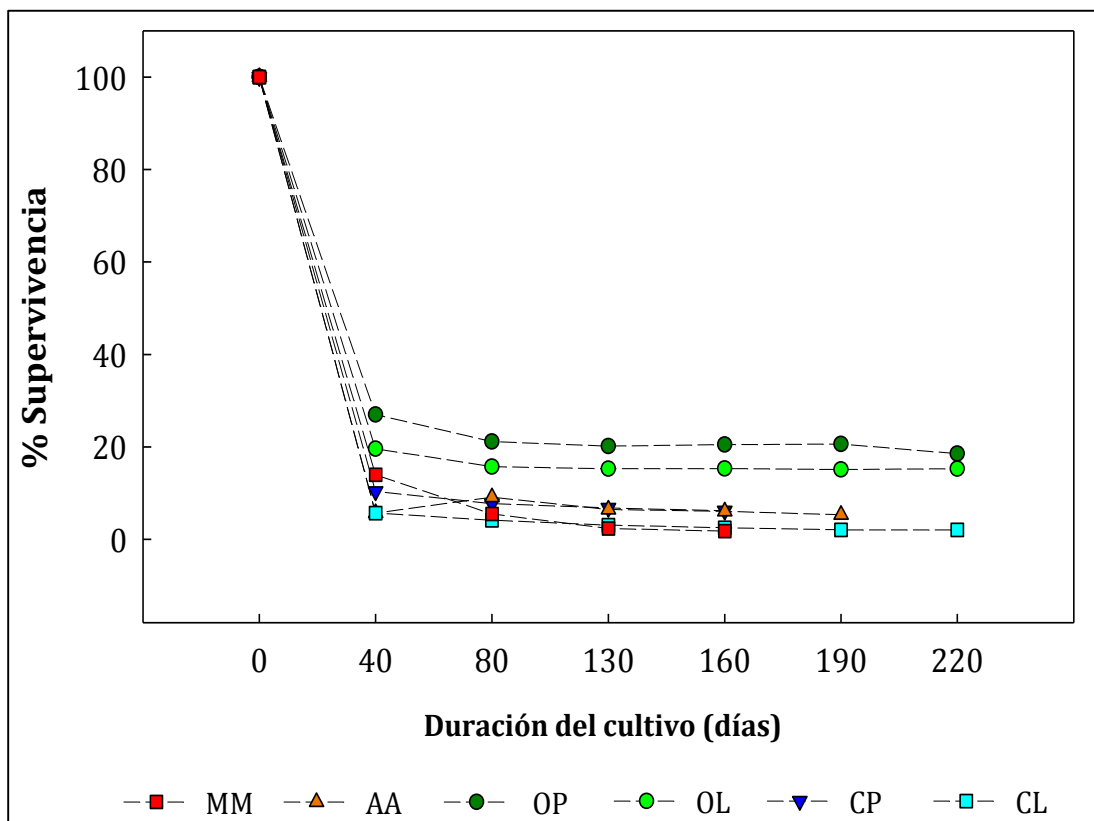
#### 1.1 Desempeño en campo

##### 1.1.1 Supervivencia de las plantas

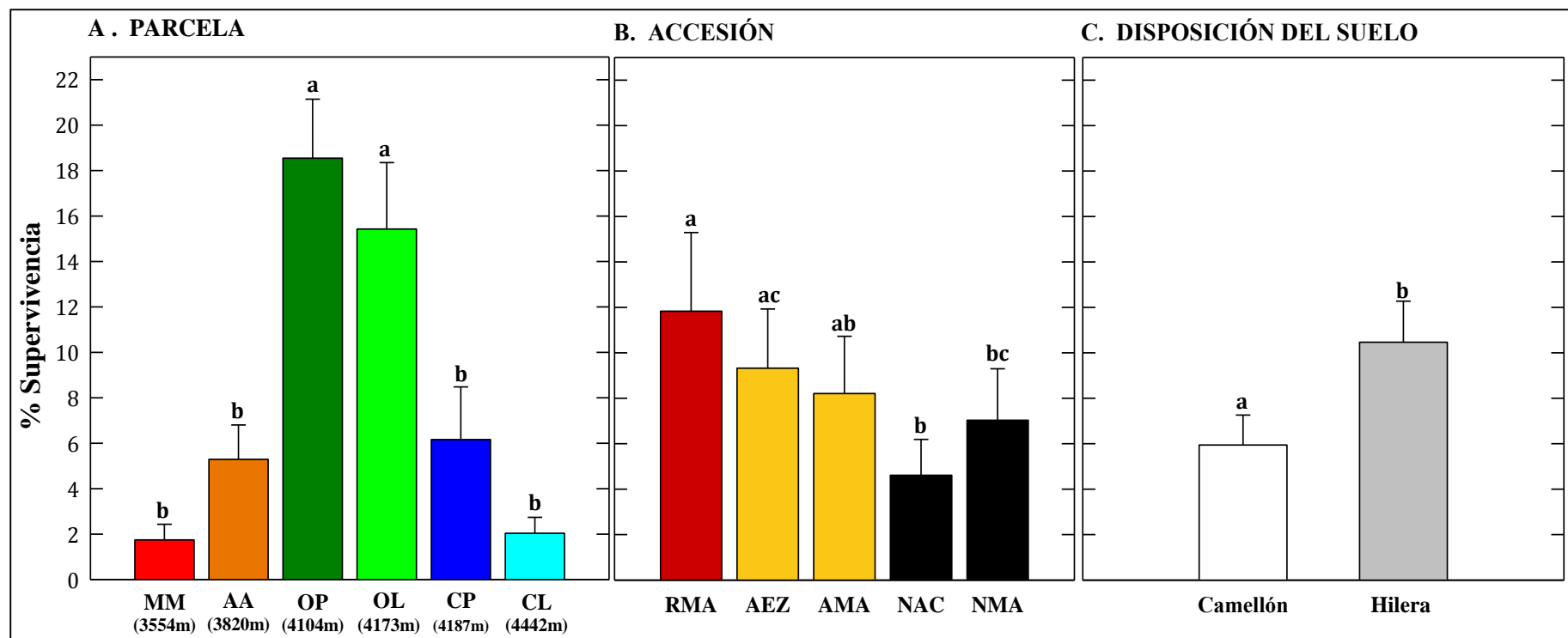
El porcentaje de supervivencia de plantas no varió sustancialmente desde el primer monitoreo (aproximadamente a los 40 días de la siembra de semillas), hasta la cosecha (Fig. 7). De forma global, encontramos diferencias significativas en la supervivencia entre parcelas, accesiones y la disposición de suelo (Tabla 6-Anexo). En relación a las parcelas (Fig. 8A), las parcelas de Óndores tuvieron los mayores porcentajes de supervivencia (aprox. 15%), seguidas por las parcelas de Achipampa y Carhuamayo-plano (aprox. 7%), registrándose en las parcelas de Masma y Carhuamayo-ladera los porcentajes más bajos (menores al 3%). La supervivencia fue mayor en las parcelas de elevación intermedia (Óndores: aprox. 4100 msnm), declinando en los extremos altitudinales (Masma: 3550msnm y Carhuamayo-ladera: 4450 msnm). A nivel de accesiones (Fig. 8B), la mayor supervivencia se registró en la accesión procedente de hipocótilo rojo (denominada RMA), seguida por las accesiones procedentes de hipocótilos de color amarillo (AMA y AEZ). La accesión procedente de hipocótilos negros (NAC, Chupaca), tuvo la menor supervivencia (aprox. 6%). En relación a la disposición de suelo (Fig. 8C), encontramos que la supervivencia en hileras fue mayor, siendo casi el doble que en camellones (aprox. 10 % y 6%, respectivamente).

Adicionalmente, realizamos un segundo análisis con las 3 parcelas con los mayores porcentajes de supervivencia, que nos permitió ver en detalle los efectos de las accesiones, la disposición del suelo y la posible interacción entre ambos factores. Si bien se detectaron interacciones entre los factores, indicando que el efecto de la disposición del suelo podía variar entre accesiones, los resultados fueron consistentes con el análisis global en todas las parcelas. (Tabla 7-Anexos, Fig. 9). A modo de ejemplo, las accesiones roja y amarillas (RMA, AMA y AEZ) tuvieron mayores porcentajes de supervivencia que

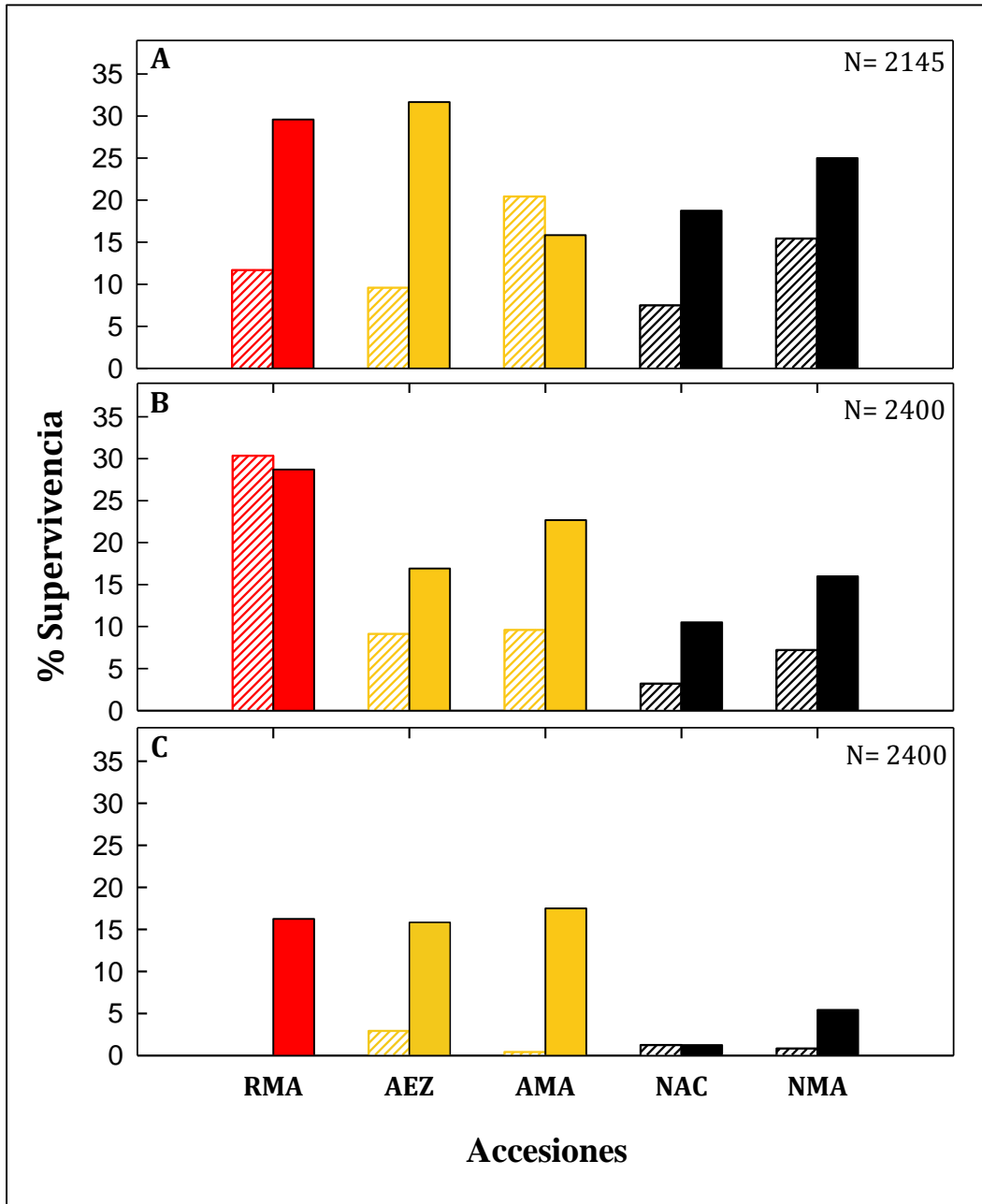
las accesiones de color negro (NAC, NMA), observándose también que frecuentemente la supervivencia en hileras fue mejor que en camellones (Fig. 8).



**Figura 7.** Curva de supervivencia de plantas en las parcelas desde el inicio de la siembra (Diciembre, 2015-Enero, 2016) hasta la cosecha (Junio-Julio, 2016).



**Figura 8.** Supervivencia final según la parcela, las accesiones y la disposición del suelo. Las letras sobre las barras representan las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), resultado de la prueba a posteriori LSD. Se grafica el porcentaje de supervivencia  $\pm$  EE.



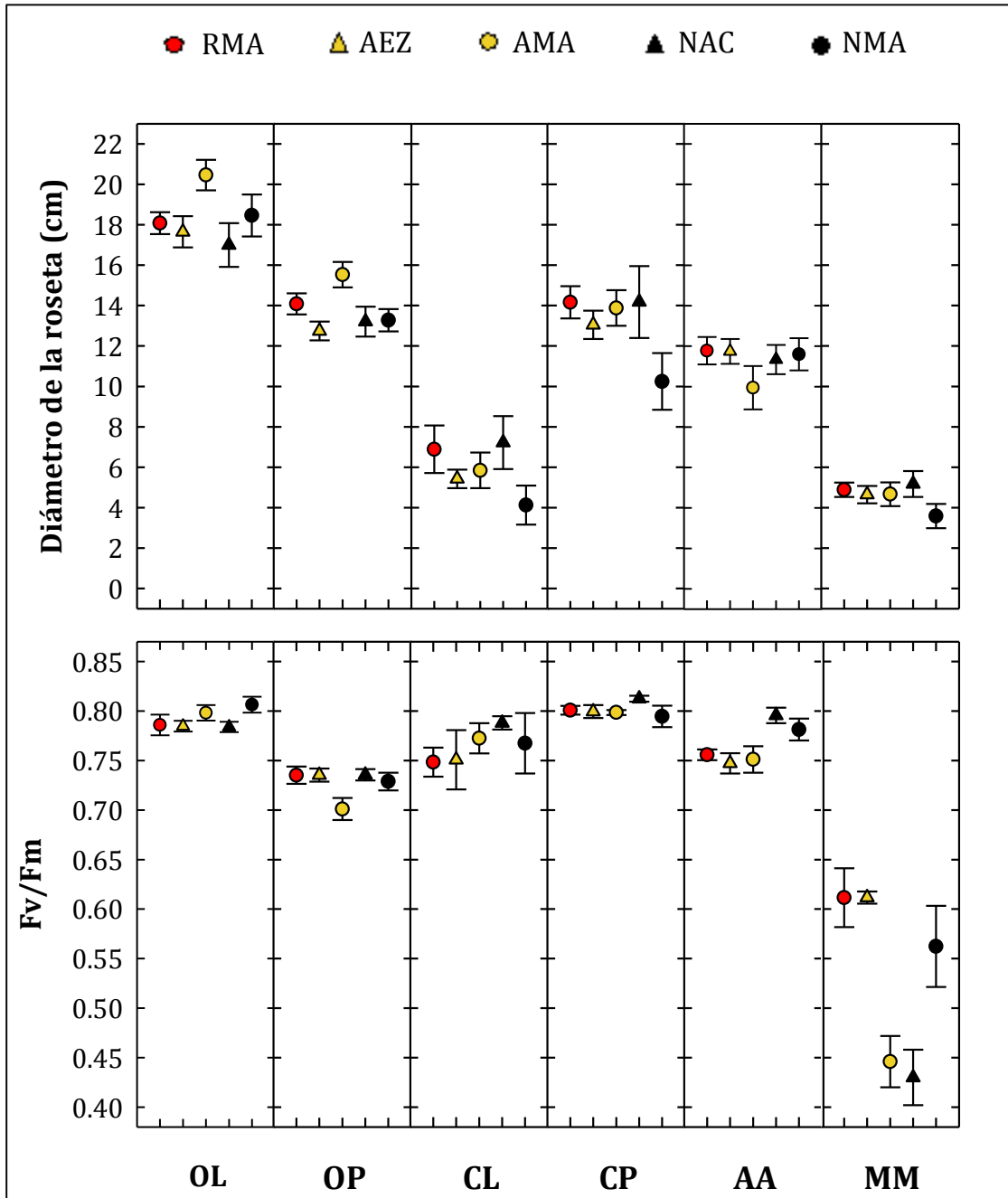
**Figura 9.** Supervivencia de plantas según la disposición de suelo y la accesión en las 3 parcelas de mayor productividad: (A) Óndores-plano (OP), (B) Óndores-ladera (OL) y (C) Carhuamayo-plano (CP). **Camellón:** barra rayada, **Hilera al ras del suelo:** barra llena.

### **1.1.2 Crecimiento vegetativo**

Durante el tercer monitoreo encontramos que el número de hojas y el diámetro de la roseta tuvieron una alta correlación ( $r=0.83$ ,  $p < 0.0001$ ) (Tabla 8-Anexos). Observamos diferencias significativas en el crecimiento vegetativo únicamente entre parcelas, pero no detectamos diferencias entre las accesiones ni interacción accesiones x parcela (Tabla 9-Anexos). El crecimiento vegetativo de *L.meyenii* fue mayor en las dos parcelas de Óndores y en Carhuamayo-plano, seguido por Achipampa; mientras que en Carhuamayo-ladera y Masma las plantas tuvieron reducido crecimiento (Fig. 10).

### **1.1.1 Desempeño fisiológico**

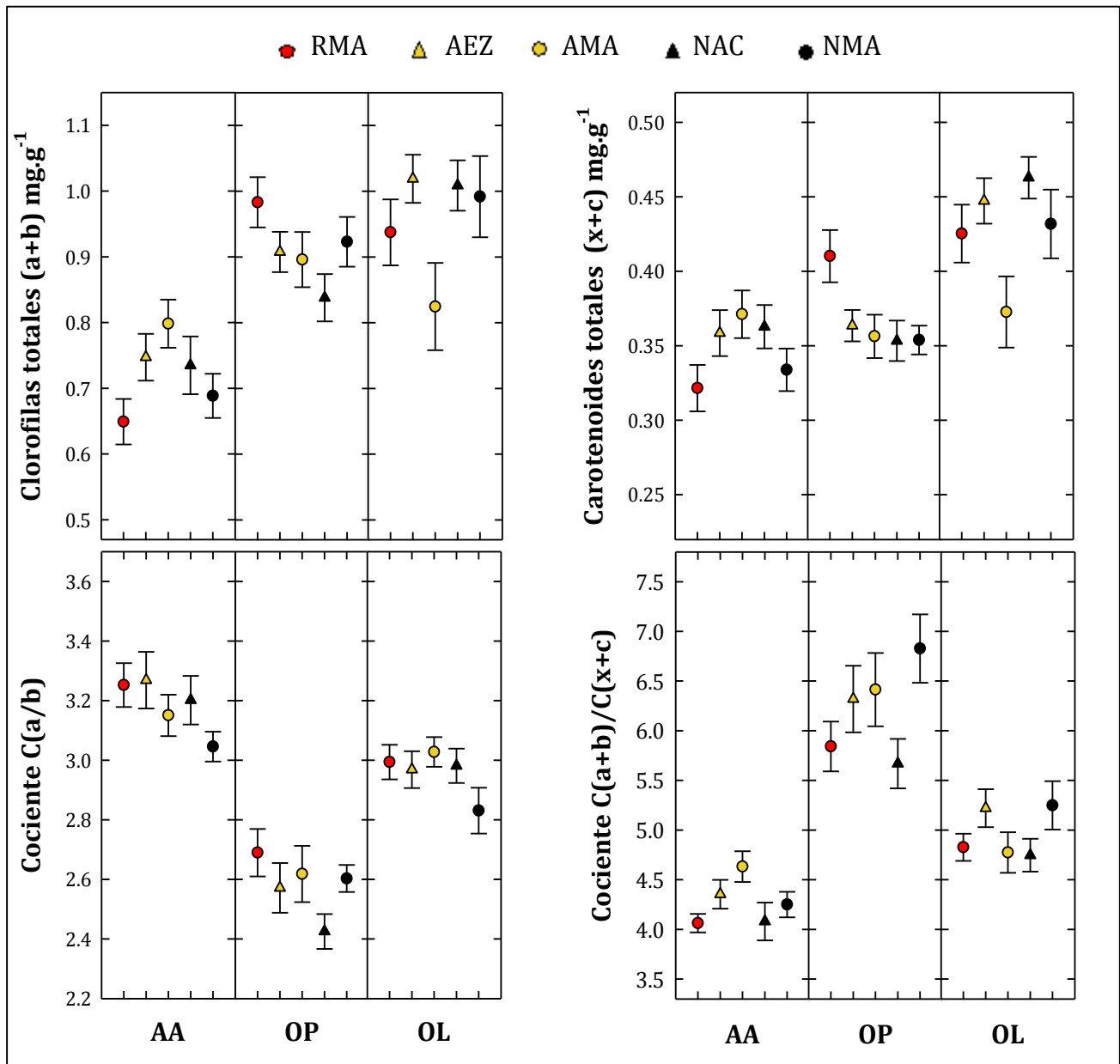
Registramos diferencias significativas en la eficiencia fotosintética (Fv/Fm) entre parcelas, accesiones y su interacción (Tabla 9-Anexos). En casi todas las parcelas las plantas de *L. meyenii* tuvieron un buen desempeño fisiológico (rango 0.72 a 0.80), y no se observó diferencias marcadas entre accesiones (excepto en Masma). El mejor desempeño de *L. meyenii* fue en Óndores-ladera y Carhuamayo-plano (Fig. 9). En Masma, las plantas tuvieron un deficiente desempeño fisiológico (Fv/Fm aprox. 0.55) y se detectaron marcadas diferencias entre accesiones. Las accesiones roja y amarillo (RMA y AEZ, respectivamente), tuvieron mejor desempeño que las otras tres accesiones estudiadas (Fig.10).



**Figura 10.** Crecimiento vegetativo (diámetro de la roseta) y desempeño fisiológico (Fv/Fm) de las plantas según las 6 parcelas y la accesión. Se reporta el promedio  $\pm$  EE.

### 1.1.2 Pigmentos fotosintéticos

Todas las variables asociadas a pigmentos fotosintéticos (concentración de pigmentos y proporciones) mostraron diferencias significativas entre parcelas (Tabla 10-Anexos). Tanto para la concentración de clorofilas totales como para la concentración de carotenoides totales también fue significativa la interacción Parcela x Accesoión. La concentración de clorofila fue mayor en las parcelas de Óndores (ladera y plano), que en Achipampa; mientras que la concentración de carotenoides fue mayor en Óndores-ladera que en Óndores plano y Achipampa. Para ambos pigmentos, si bien las accesiones tuvieron un patrón similar, registramos diferencias en el desempeño de las accesiones entre parcelas (Fig. 11). En cuanto a la proporción entre clorofilas (a/b), donde solo detectamos efecto de la parcela, las plantas en Achipampa tuvieron los valores más altos, seguido de Óndores-ladera, y los menores valores en la parcela de Óndores-plano. Para la proporción clorofilas totales/carotenoides totales ( $C_{a+b}/C_{x+c}$ ), además de encontrar diferencias entre parcelas, también fue significativo el efecto de la Accesoión (Tabla 10-Anexos). Este índice fue mayor en Óndores-plano, seguido de Óndores-ladera y menor en Achipampa. Con respecto a las accesiones, las plantas de las accesiones negra (NMA) y amarilla (AEZ) tuvieron índices más altos que las otras tres accesiones evaluadas (Fig. 11).



**Figura 11.** Comparación de pigmentos fotosintéticos (concentración y proporciones) de 3 parcelas: Óndores-ladera (OL), Óndores-plano (OP) y Achipampa (AA). Se reporta el promedio  $\pm$  EE.

## 1.2 Mediciones post-cosecha

Todas las variables biométricas evaluadas estuvieron correlacionadas positivamente entre sí (Tabla 11-Anexos). El MANOVA mostró efectos significativos de la parcela, accesión y disposición de suelo (Wilks  $<0.76$ ,  $F > 8.1$ ,  $P < 0.05$ ) (Tabla 12-Anexos). Posteriormente, el ANOVA evidenció que la parcela tuvo efecto significativo sobre todas las variables biométricas estudiadas; del mismo modo la accesión (excepto sobre el peso fresco del hipocótilo) (Tabla 13-Anexos). La disposición de suelo tuvo efecto sobre el peso fresco y porcentaje de humedad de la parte aérea, y la longitud radicular total (Tabla 13-Anexos). A nivel de parcelas, *L. meyenii* tuvo el mejor crecimiento aéreo y radicular en Óndores-ladera, seguido de Óndores-plano. Mientras que en la parcela de Masma, las plantas no prosperaron (Tabla 4). En cuanto a la relación L/D (indicador de la forma de los hipocótilos), la parcela de Óndores-ladera tuvo hipocótilos más esféricos (valores cercanos a 1), a diferencia de las parcelas de Masma y Achipampa, donde los hipocótilos tuvieron una forma más alargada (valores cercanos a 3, Tabla 4). En relación a las accesiones, el color amarillo de Chupaca (AEZ) tuvo menor desarrollo foliar y sus hipocótilos tuvieron menor diámetro promedio que el resto de accesiones (Tabla 4). Sin embargo, no se detectaron diferencias en el peso fresco de los hipocótilos (Tabla 13-Anexos). La longitud radicular total fue menor en la accesión color negro de Chupaca (NAC). Mientras que en la accesión color rojo de Junín (RMA), la longitud del hipocótilo fue menor y los hipocótilos fueron más esféricos (proporción L/D aprox. 1), en comparación al resto de accesiones. En relación a la disposición de suelo, en hileras el peso fresco y el porcentaje de humedad de la parte aérea fueron mayores, pero la longitud radicular fue menor que en camellones (Tabla 4).

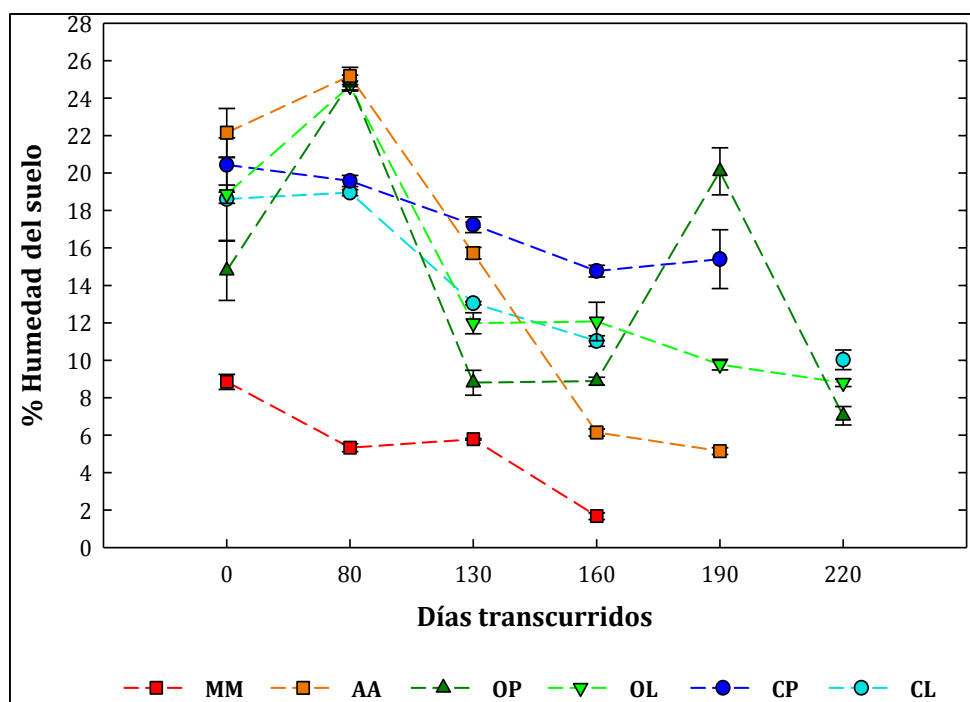
	Parte aérea				Parte radicular					
	N° de hojas totales	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	% Humedad aérea	Peso fresco (g)	Diámetro promedio (D)	Longitud radicular(mm)	Ratio L/D	Longitud del hipocotilo (mm) (L)	
<b>Parcela</b>										
OL	39.13 ± 1.10 a	3.68 ± 0.22 a	1.33 ± 0.07 a	56.37 ± 0.70 a	28.72 ± 1.21 a	33.41 ± 0.68 a	139.28 ± 2.72 a	1.49 ± 0.04 d	45.16 ± 0.95 a	
OP	32.30 ± 0.93 b	1.62 ± 0.10 b	0.63 ± 0.04 b	51.68 ± 0.85 b	14.86 ± 0.72 b	25.93 ± 0.57 b	113.15 ± 2.71 b	1.71 ± 0.04 cd	37.19 ± 0.67 b	
CP	19.96 ± 1.96 c	1.48 ± 0.22 b	0.58 ± 0.10 b	57.94 ± 2.31 a	12.02 ± 1.76 b	22.62 ± 1.79 b	106.44 ± 7.22 b	2.09 ± 0.32 bc	33.17 ± 1.93 b	
CL	19.78 ± 1.65 c	1.01 ± 0.24 c	0.39 ± 0.08 c	46.80 ± 2.77 c	3.57 ± 0.90 c	12.42 ± 1.41 c	79.38 ± 5.80 c	2.48 ± 0.21 b	21.34 ± 1.35 c	
AA	19.28 ± 0.88 c	0.44 ± 0.04 c	0.29 ± 0.02 c	22.94 ± 1.37 d	1.94 ± 0.23 c	11.55 ± 0.89 c	62.31 ± 3.04 d	3.06 ± 0.22 a	26.52 ± 1.45 e	
MM	2.79 ± 0.29 d	0.01 ± 0.00 d	0.01 ± 0.00 d	26.23 ± 2.38 d	0.18 ± 0.03 d	4.37 ± 0.31 d	49.73 ± 2.99 d	2.99 ± 0.23 a	11.93 ± 0.92 d	
<b>Accesión</b>										
RMA	28.69 ± 0.98 b	2.10 ± 0.15 a	0.78 ± 0.05 b	50.63 ± 1.10 a	17.29 ± 1.05 a	26.96 ± 0.83 a	111.26 ± 3.39 bc	1.55 ± 0.06 c	32.64 ± 0.81 a	
AEZ	23.91 ± 1.26 c	1.41 ± 0.19 b	0.58 ± 0.07 c	43.02 ± 1.39 b	13.08 ± 1.18 a	20.55 ± 0.88 b	112.13 ± 3.81 a	2.33 ± 0.09 a	37.97 ± 1.28 b	
NAC	31.94 ± 1.62 a	1.38 ± 0.13 a	0.56 ± 0.05 ab	50.10 ± 1.66 a	13.79 ± 1.25 a	24.38 ± 1.22 a	97.63 ± 4.12 c	2.01 ± 0.11 ab	38.11 ± 1.49 b	
AMA	36.61 ± 1.61 a	2.79 ± 0.27 a	1.01 ± 0.08 ab	50.86 ± 1.31 a	20.86 ± 1.58 a	27.35 ± 1.04 a	112.57 ± 4.02 bc	1.85 ± 0.12 b	38.14 ± 1.18 b	
NMA	33.91 ± 1.53 a	2.30 ± 0.22 a	0.88 ± 0.08 a	49.41 ± 1.41 a	16.08 ± 1.36 a	24.59 ± 1.03 a	114.87 ± 4.41 ab	1.96 ± 0.11 b	37.49 ± 1.39 b	
<b>Disp. del suelo</b>										
Camellón	30.81 ± 0.96 a	1.58 ± 0.12 a	0.69 ± 0.04 a	39.77 ± 0.96 a	14.92 ± 0.84 a	24.63 ± 0.71 a	111.11 ± 2.78 a	1.99 ± 0.08 a	35.69 ± 0.74 a	
Hilera	30.25 ± 0.81 a	2.30 ± 0.13 b	0.82 ± 0.04 a	54.29 ± 0.70 b	17.29 ± 0.78 a	24.99 ± 0.57 a	110.40 ± 2.29 b	1.86 ± 0.05 a	36.89 ± 0.73 a	

**Tabla 4.** Estadísticas descriptivas de las variables biométricas de la parte aérea y radicular de la planta *Lepidium meyenii*. Se muestra el promedio ± error estándar diferenciado por parcela, accesión y disposición de suelo. Las letras sobre las barras representan las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), resultado de la prueba a posteriori LSD.

## 2. Suelo

### 2.1 Porcentaje de humedad

Encontramos diferencias temporales y espaciales (parcela) en el porcentaje de humedad del suelo (Tabla 14-Anexos, Fig. 12). La humedad del suelo fue reduciéndose con el paso de los meses, siendo más acelerada en las parcelas de las zonas más bajas (Achipampa y Masma). Durante la siembra, los suelos de las parcelas registraron humedades entre el 14% y 22% (excepto Masma aprox. 9%). La parcela de Masma tuvo el porcentaje de humedad de suelo más bajo a lo largo de todo el periodo de evaluación, llegando hacia Junio por debajo del 2% (aprox a los 180 días, cuando se realizó la cosecha).



**Figura 12.** Porcentaje de humedad del suelo de las 6 parcelas desde el inicio de la siembra (Diciembre, 2015-Enero, 2016) hasta la cosecha (Junio-Julio, 2016). Se muestra el porcentaje promedio  $\pm$  EE.

### 1.2 Fertilidad

Detectamos que el pH se correlacionó con la concentración de fósforo disponible (positivamente) y con la concentración de acidez intercambiable (negativamente), mientras estas dos últimas variables se correlacionaron de manera negativa entre sí. Finalmente, la

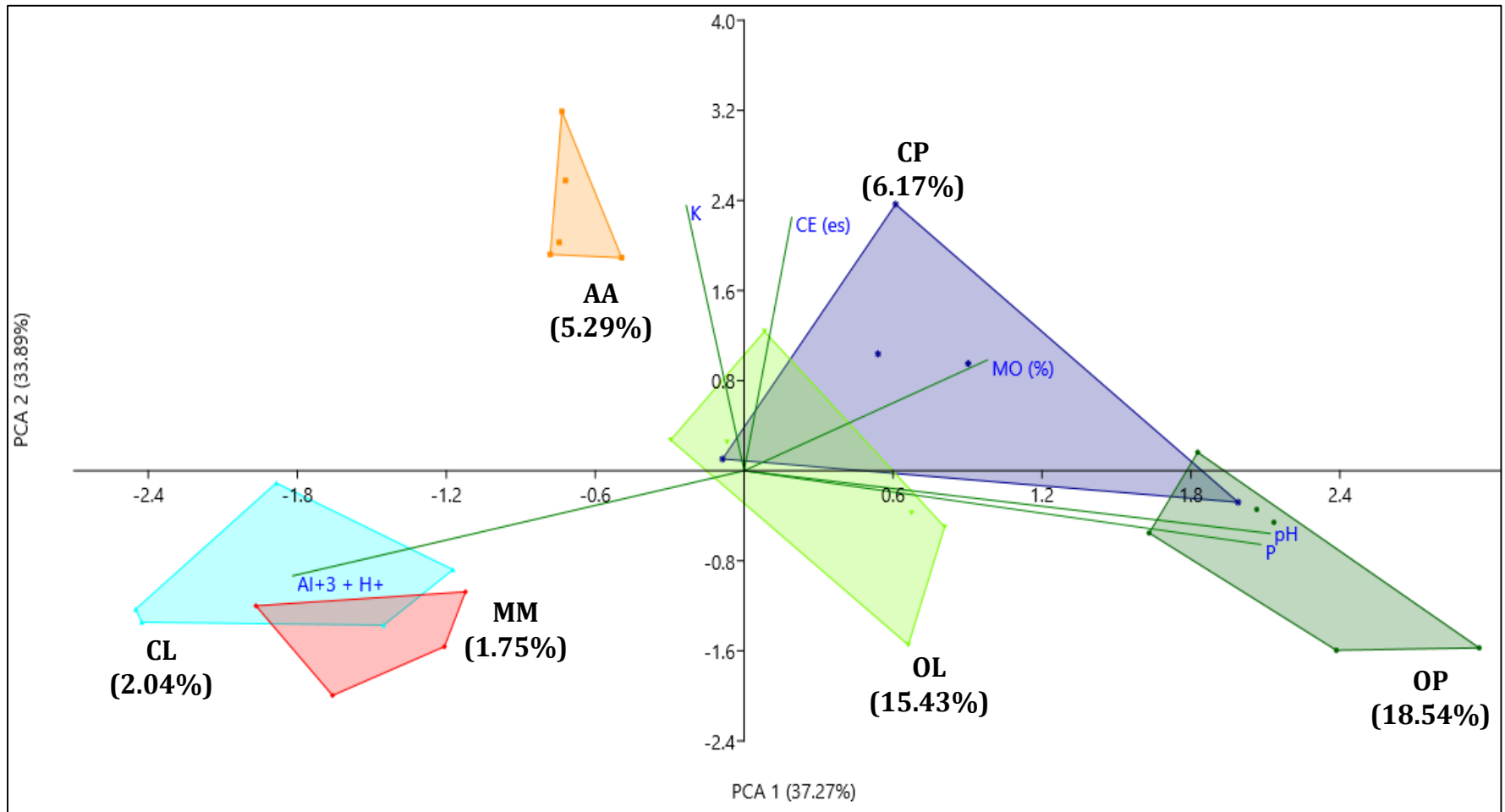
conductividad eléctrica se correlacionó positivamente con la concentración de potasio disponible (Tabla 15-Anexos).

En el análisis de componentes principales, los dos primeros componentes explicaron aproximadamente el 71% de la varianza total. En el PC1 (varianza explicada = 37.3%), contribuyen de manera significativa (factores de carga) el pH, la concentración de fósforo disponible y la concentración de acidez intercambiable; mientras que en el PC2 (varianza explicada = 33.9%), contribuyen de manera significativa la concentración de potasio disponible y la conductividad eléctrica (Tabla 16-Anexos). Podemos establecer correspondencia entre el desempeño y el agrupamiento de las parcelas en estos dos primeros componentes (Fig. 13). Las parcelas con mejor establecimiento y calidad de los hipocótilos a la cosecha (Óndores-ladera y plano y Carhuamayo-plano) se distinguieron de aquellas parcelas de bajo (Achipampa), o muy bajo rendimiento (Carhuamayo-ladera y Masma) (Tabla 5, Fig. 13, Tabla 17-Anexos, Fig.14).

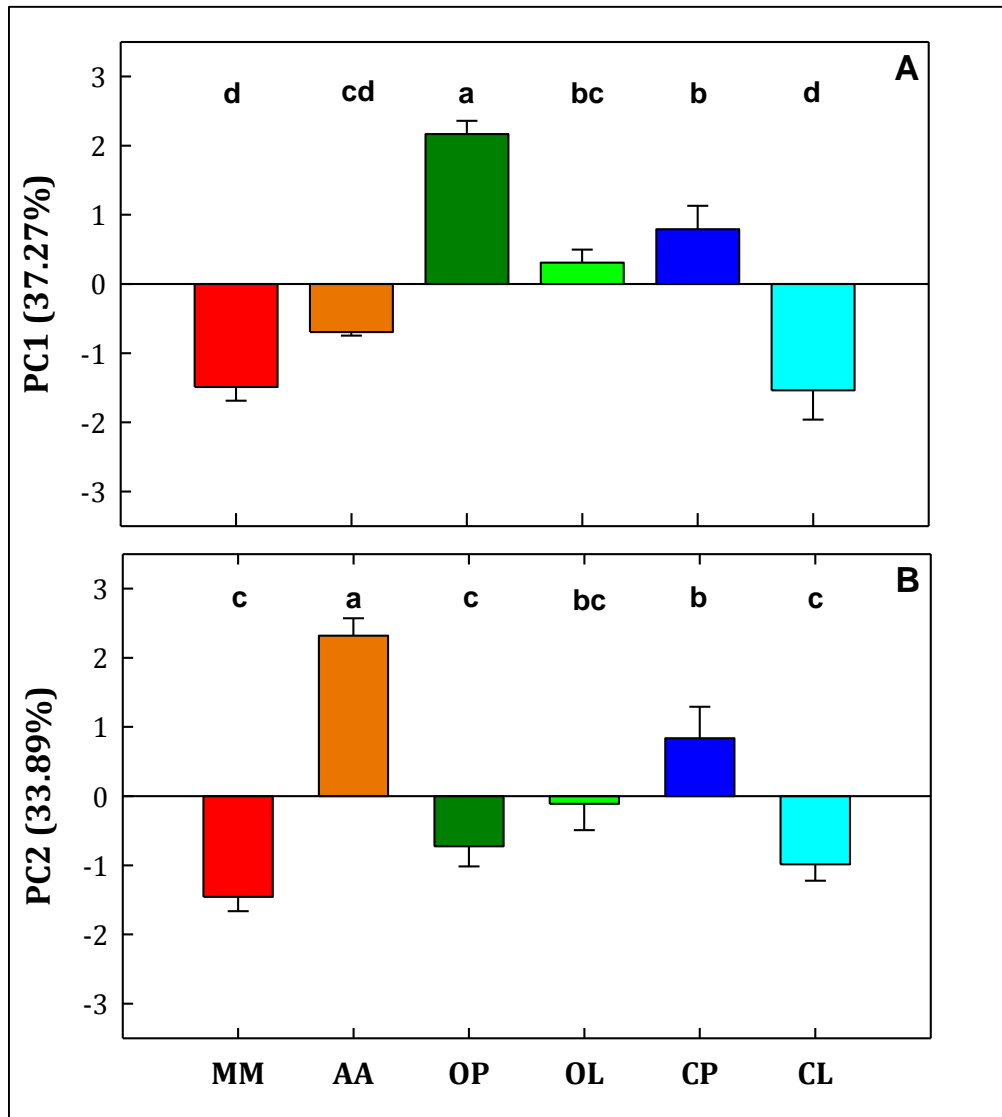
*L. meyenii* se desempeñó mejor en suelos con pH superiores a 4.8 y con las mayores concentraciones de fósforo disponible en comparación con el resto de parcelas. Adicionalmente, las parcelas de muy bajo rendimiento tuvieron elevada concentración de acidez intercambiable (Tabla 5). Por otro lado, las parcelas de Achipampa y Carhuamayo-plano tuvieron los mayores valores de conductividad eléctrica y concentración de potasio disponible que el resto de parcelas (Tabla 5).

## **1.2 Temperatura del suelo**

En todas las parcelas, la temperatura promedio del suelo fue disminuyendo a lo largo del desarrollo del cultivo (Fig. 15). Durante las primeras semanas posteriores a la siembra, las parcelas de menor altitud (Masma y Achipampa), fueron más cálidas ( $T_{\text{promedio}}$  y  $T_{\text{mín}}$  más elevadas). En relación a las parcelas de mayor altitud, las dos parcelas de Carhuamayo tuvieron las temperaturas promedio más bajas que las parcelas de Óndores. Este patrón fue similar aproximadamente durante los 3 primeros meses (hasta quincena de marzo). Se puede observar que las parcelas de muy bajo rendimiento tuvieron las temperaturas más extremas siendo la parcela de Masma la cálida y la de Carhuamayo-ladera la más fría.



**Figura 13.** Ordenamiento de las parcelas experimentales según las características fisicoquímicas asociadas a la fertilidad del suelo. Se muestra la salida gráfica del PCA y los porcentajes de supervivencia de cada parcela se incorporaron para enfatizar la relación entre la supervivencia con las características fisicoquímicas de las parcelas.

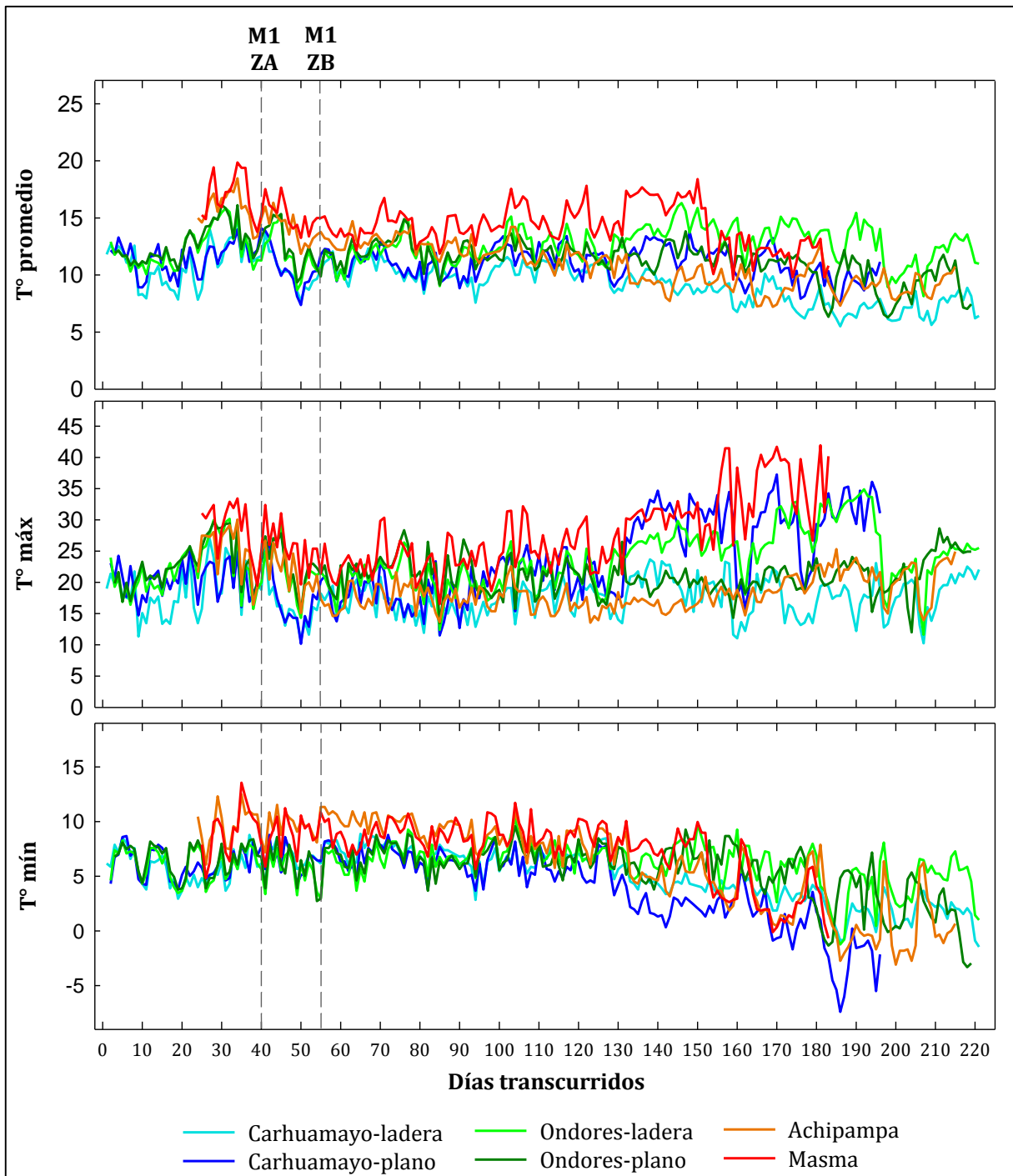


**Figura 14.** Representación gráfica de la similitud entre las parcelas para cada componente. **(A)** PC1 (pH, acidez intercambiable y fósforo disponible), **(B)** PC2 (Potasio disponible y conductividad eléctrica). Las letras sobre las barras representan las diferencias significativas entre las parcelas ( $p < 0.05$ ), resultado de la prueba a posteriori LSD.

Parcelas	N	pH	P ppm	K ppm	MO (%)	CE (es)	Al <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup> (meq/100)
OP	6	6.54 ± 0.08 a	27.08 ± 3.18 a	155.83 ± 20.06 c	9.24 ± 0.50 b	0.61 ± 0.11 b	0.00 ± 0.00 d
OL	6	4.83 ± 0.08 b	18.60 ± 2.42 b	179.33 ± 25.20 bc	12.22 ± 0.63 a	0.52 ± 0.13 b	0.68 ± 0.12 bc
CP	5	4.92 ± 0.07 b	24.84 ± 4.76 ab	219.40 ± 26.87 b	10.01 ± 1.01 b	1.27 ± 0.24 a	0.26 ± 0.06 cd
AA	5	4.55 ± 0.05 c	5.76 ± 0.50 c	333.80 ± 1.83 a	9.54 ± 0.44 b	1.48 ± 0.27 a	0.40 ± 0.05 cd
CL	5	4.37 ± 0.09 c	7.60 ± 2.67 c	151.00 ± 22.62 c	9.10 ± 0.62 b	0.38 ± 0.05 b	2.62 ± 0.40 a
MM	4	4.53 ± 0.08 c	8.43 ± 1.43 c	147.50 ± 19.96 c	1.51 ± 0.25 c	0.16 ± 0.04 b	1.00 ± 0.21 b
Valor de F							
Parcela		<b>114.85 ***</b>	<b>10.31 ***</b>	<b>10.59 ***</b>	<b>28.14 ***</b>	<b>9.28 ***</b>	<b>26.82 ***</b>

\*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.0001

**Tabla 5.** Estadística descriptiva de las características fisicoquímicas del suelo en las 6 parcelas. Se muestra el promedio ± error estándar los monitoreos. N: número de monitoreos realizados por parcela.



**Figura 15.** Temperatura diaria: promedio, máxima y mínima de las parcelas durante el periodo de desarrollo del cultivo de “maca” (siembra-cosecha). Se delimita con una línea gris el primer monitoreo (M1) de la supervivencia en las zonas altas (ZA: Carhuamayo y Óndores) y zonas bajas (ZB: Achipampa y Masma).

## VI. DISCUSIÓN

La supervivencia de plantas no varió sustancialmente posterior a los 40 días de haber realizado la siembra de semillas (Fig.7). El establecimiento (y futura supervivencia de las plántulas), depende del éxito durante la germinación de las semillas y la emergencia de plántulas [Fenner & Thompson, 2005], que a su vez son etapas afectadas por el ambiente y por las características intrínsecas de las semillas [Rathcke C & Lacey, 1985; Schulze, 2005; Baskin C & Baskin J, 2014]. Otros estudios en *L. meyenii* han documentado que la emergencia en campo se da 20 a 25 días después de la siembra [Palomino M, 1998; Aliaga, 1999; Rebisso R, 1999], y que cerca del 90% de las plántulas que emergen logran establecerse. Así, garantizar las primeras etapas de desarrollo de *L. meyenii* dará continuidad a las posteriores etapas de crecimiento.

Encontramos diferencias en la supervivencia de plantas entre parcelas, accesiones y disposición de suelo (Tabla 6 y 7-Anexos Fig.8 y 9). En relación a las parcelas, consideramos que las condiciones ambientales explicaron las diferencias encontradas, siendo las características fisicoquímicas del suelo el factor principal que definió la productividad de las parcelas (Tabla 5, Fig. 13, Fig. 14).

Si bien se sabe que *L. meyenii* crece en suelos ácidos [Arbizu et al., 1991], esto podría limitar su rendimiento [Quiros et al., 1996]. Se ha reportado que la toxicidad por aluminio intercambiable ( $Al^{+3}$ ) es la mayor limitante para el desarrollo de los cultivos en la mayoría de suelos ácidos [Matsumoto, 2000; Rout et al., 2001]. No obstante, en suelos orgánicos y con baja meteorización (como los de la zona alto-andina), donde el aluminio permanece en forma mineral y no está disponible como  $Al^{+3}$ , la elevada concentración de protones (tanto en solución (pH), como adsorbidos a las partículas del suelo- $H^+$  intercambiable), es una de las principales limitantes para el crecimiento de las plantas [Sparks D, 2003; Kidd P & Proctor J, 2001]. Encontramos que las parcelas con muy baja supervivencia (Masma y Carhuamayo-ladera), compartieron suelos con pH muy bajos y alta concentración de acidez intercambiable ( $Al^{+3}+H^+$ , Tabla 5, Fig.13, Fig.14). Diversos estudios evidencian que la toxicidad por  $H^+$  podría afectar la germinación de las semillas [Shoemaker C & Carlson W, 1990; Deska et al., 2011] y afectar el crecimiento radicular [Stoffella et al., 1991] al interferir en la elongación celular [Koyama et al., 2001] o interfiriendo en la adquisición de nutrientes

como P, Ca, Mg y Fe [Poschenrieder et al., 1995] al competir con ellos en los sitios de absorción a nivel radicular [Foy C, 1992], limitando así la supervivencia de las plantas.

Asimismo, estas parcelas (así como Achipampa) también tuvieron una menor concentración de fósforo disponible (Tabla 5, Fig. 13, Fig. 14). Ante la deficiencia de fósforo, las plantas pueden reducir el crecimiento de brotes vegetativos [Chiera et al., 2002], lo que podría ser contraproducente para *L. meyenii* durante los primeros estadíos, ya que se ha reportado que plantas con menos hojas son más susceptibles a las condiciones ambientales [Palomino M, 1998]. Además, ante la deficiencia de este nutriente también se ha investigado que las plantas pueden modificar el crecimiento del sistema radicular para asegurar la adquisición de fósforo [Balemi T & Negisho K, 2012]. En nuestro caso, el crecimiento radicular estuvo limitado por otras condiciones como la acidez del suelo, lo cual pudo exacerbar la deficiencia de fósforo afectando el establecimiento de las plantas y su posterior rendimiento. Mientras tanto, las parcelas con mayor supervivencia, tuvieron suelos con mejores condiciones de fertilidad asociadas a pH menos ácidos, menor concentración de acidez intercambiable y mayor disponibilidad de fósforo, lo cual favoreció al establecimiento y futura supervivencia de plantas en estas parcelas (Tabla 5, Fig. 13, Fig. 14)

Con respecto a la conductividad eléctrica y a la concentración de potasio disponible, si bien encontramos diferencias entre parcelas para estas variables (Fig. 13 y 14), estas diferencias no ayudaron a explicar la productividad de las parcelas.

Por otro lado, consideramos que tanto la humedad como la temperatura fueron factores secundarios que contribuyeron a explicar la productividad en algunas parcelas en particular. En primer lugar encontramos que la humedad del suelo disminuyó con el paso de los meses (a excepción de algunas lluvias esporádicas) y fue distinta entre parcelas (Tabla 14-Anexos), siendo Masma la que presentó bajos porcentajes durante toda la campaña (Humedad <10%, Fig. 12). Otros trabajos han reportado que suelos con humedad por debajo del 9% [Forcella et al., 2000] limitan la germinación de semillas debido a que el volumen de agua es tan escaso que es retenido en la matriz del suelo [Ehler W & Goss M, 2016]. Esto sumado a las elevadas temperaturas registradas (Fig. 15) en esta parcela podría haber exacerbado la situación de estrés en esta parcela afectando la supervivencia de plantas.

En Carhuamayo-ladera las bajas temperaturas del suelo (Fig. 15) podrían haber retrasado la germinación y emergencia de plántulas. Se sabe que esto podría reducir el vigor de las plántulas [Singh N & Dhaliwal G, 1972] y afectar su establecimiento, lo que se agrava por la baja fertilidad del suelo. Este retraso fue corroborado mediante experimentos adicionales en campo, que mostraron una asociación negativa entre el tiempo requerido para la emergencia de plántulas y la temperatura del suelo [Ponce A, 2017 no publicado]. En este experimento, en la parcela más cálida localizada en Achipampa ( $T_{\text{mín.}} = 5.96^{\circ}\text{C}$   $T_{\text{máx.}} = 24.06^{\circ}\text{C}$ ), se alcanzó la máxima emergencia a los 30 días (5.39%), mientras que en la parcela más fría localizada en Carhuamayo ( $T_{\text{mín.}} = 1.87^{\circ}\text{C}$   $T_{\text{máx.}} = 27.86^{\circ}\text{C}$ ), la emergencia continuó al menos hasta 60 días después de la siembra (de 2.12% al día 30 a 3.65% al día 60) (Figura 16-Anexos, datos no publicados). En este caso, el incremento en el porcentaje de emergencia podría ser resultado de mejores condiciones de fertilidad en el terreno.

Las accesiones también mostraron diferencias en la supervivencia (Tabla 6 y 7-Anexos, Fig.8 y 9), siendo ambas accesiones de hipocótilos de color negro las de menor supervivencia (en particular NAC). Esto sugiere la influencia de un factor intrínseco del color del hipocótilo. Sin embargo, al haber empleado semillas de 3 productores distintos también debemos considerar que las diferencias en el manejo agronómicas durante la producción de semillas podrían tener influencia sobre la calidad de las semillas. Si bien es difícil distinguir la contribución del factor intrínseco y del factor agronómico, ambos podrían reflejar diferencias en el peso de las semillas [Fenner & Thompson, 2005; Baskin C & Baskin J, 2014], el cual es un buen predictor del vigor y capacidad de establecimiento de las plántulas [Ambika et al., 2014; Finch-Savage W & Bassel G, 2015]. En nuestro trabajo, las accesiones de hipocótilos de color negro (en particular NAC) tuvieron en promedio menor peso que el resto de accesiones estudiadas (Fig.17-Anexos). A pesar de que en este caso, el número de accesiones empleadas (N=5) no fue suficiente para establecer una relación estadísticamente robusta entre el peso de las semillas y la supervivencia, otros resultados de experimentos adicionales en campo en donde se contó con 16 accesiones de semillas de *L. meyenii* de distintos productores y colores de “maca” mostraron una relación positiva entre el porcentaje de emergencia de plántulas y el peso de las semillas (Fig.18-Anexos) [Ponce A, 2017 no publicado], reforzando los resultados de nuestra investigación. Esta relación positiva podría atribuirse a que las semillas más pesadas tendrían una mayor proporción de reservas

alimenticias y nutrientes capaces de ser empleados cuando sea necesario [Geritz S, 1995; Leishman et al., 2000; Finch-Savage W & Bassel G, 2015]. Esto es consistente con otros trabajos en donde las semillas de mayor tamaño favorecieron las primeras etapas de desarrollo de diferentes especies [Stanton M, 1984; Moshatati A & Gharineh M, 2012].

Encontramos diferencias en la supervivencia entre las disposiciones de suelo, siendo mayor al ras del suelo (hileras) que en las camas elevadas de cultivo (camellones) (Fig.8 y 9, Tabla 6 y 7-Anexos). Estos resultados no concuerdan con lo encontrado en otras investigaciones en sistemas fríos como en el departamento de Puno, en donde se observó un mejor rendimiento del cultivo de “maca” en camellones (10 tn/ha) comparado a un sistema tradicional al ras del suelo (8.8 tn/ha) [Fernández et al., 1999]; El mejor rendimiento observado en Puno se explica porque los sistemas de camellones mejoran la condición de humedad a nivel radicular al acumular el exceso de agua de las lluvias en sus canales [Rebisso R, 1999], y mejoran la condición térmica al acumular más calor debido a una mayor área superficial de la cama de cultivo (2°C más en comparación a un espacio plano), lo que ayuda a atenuar el efecto de las bajas temperaturas [Lhomme P & Vacher J, 2003]. Sin embargo se debe considerar que el funcionamiento de los camellones puede estar influenciado por el ambiente, en particular por la humedad (mediada por las precipitaciones) y por la temperatura. En nuestra investigación, durante todo el periodo de crecimiento de las plantas (2015-2016) se experimentó una menor disponibilidad de agua debido al retraso y acortamiento del periodo de las lluvias en los Andes (más marcado en la Zona baja) y un incremento de la temperatura ambiental en varias regiones del país, asociado al Fenómeno El Niño [SENAMHI, 2015-2016], lo que pudo ocasionar que la condición en el sistema de camellones fuera perjudicial en lugar de ser beneficiosa, al combinar el efecto de menor humedad y mayor calor, trayendo como consecuencia una menor supervivencia de plantas en estos sistemas. La implementación de estos sistemas requiere una mayor exploración, posiblemente en años sin anomalías climáticas, para evaluar cómo podrían beneficiar al desempeño de las plantas.

Por otro lado, encontramos que el crecimiento vegetativo fue distinto entre parcelas (pero no entre accesiones) (Tabla 9-Anexos, Fig. 10). Las parcelas con plantas menos frondosas fueron las de Carhuamayo-ladera y Masma, que experimentaron una combinación de factores poco favorables que afectaron el vigor de las plántulas, reduciendo así su capacidad de

desarrollar follaje. Además, la parcela de Óndores-ladera tuvo plantas más frondosas que la parcela de Óndores-plano. Esto se atribuye a la presencia elevada de maleza en Óndores-plano que pudo generar interacciones competitiva con las plantas de *L. meyenii* y limitar su crecimiento.

Asimismo encontramos diferencias en la eficiencia fotosintética ( $F_v/F_m$ ) entre parcelas (Tabla 9-Anexos, Fig.10), siendo Masma la de menor desempeño fisiológico (aprox 0.55). Una reducción en este ratio indicaría la fotoinhibición a causa de distintos tipos de estrés ambiental [Baker N & Rosengvist E, 2004]. En esta parcela las plantas experimentaron una baja fertilidad del suelo, estrés hídrico y estrés térmico afectando el desempeño fisiológico de las plantas. Cabe resaltar que entre las parcelas con buen desempeño fisiológico, las plantas de Óndores-plano tuvieron menor valor de  $F_v/F_m$  (Fig.10). Algunos autores reportan que la sombra, en este caso causada por la competencia con otras especies, reduce la disponibilidad de luz, la absorción de luz y la eficiencia fotoquímica [Khan et al., 2000] afectando su productividad. Esto cobra importancia si se considera que los agricultores no siempre desmalezan el terreno durante la campaña. Ante esto, algunas especies mejoran la captura y uso de la luz, usualmente a través del incremento en la concentración de clorofilas [Boardman N, 1977]. Las plantas que crecen bajo sombra acumulan más clorofila b y tienen más complejos colectores de luz que aquellas plantas adaptadas a la luz para asegurar la recolección de luz [Boardman N, 1977]. Es interesante resaltar que las plantas de Óndores-plano tuvieron menor ratio de clorofila a/b y mayor ratio de clorofilas/carotenoides, típico de plantas adaptadas a sombra ( $Ca/b$ : ratio 2.4-2.7;  $C(a+b)/C(x+c)$ : ratio 5.5.-7) (Fig.9) [Lichtenthaler H & Buschmann C, 2001]. Mientras que las plantas de Achipampa y Óndores-ladera mostraron mayor ratio de clorofila a/b y menor ratio de clorofilas/carotenoides típico de plantas adaptadas a la luz ( $Ca/b$ : ratio 3.0-3.8;  $C(a+b)/C(x+c)$ : ratio 4.2.-5) [Lichtenthaler H & Buschmann C, 2001] (Fig.10). Con el ratio  $Ca/b$  podríamos especular que *L. meyenii* es capaz de cambiar el mecanismo de adaptación a la luz pudiendo ser tolerante a la sombra. Mientras que con el ratio clorofilas/carotenoides encontramos que las plantas en las 3 parcelas no presentaban estrés o daño al aparato fotosintético [Lichtenthaler H & Buschmann C, 2001]. Por otro lado también encontramos diferencias en el desempeño fisiológico entre accesiones (Tabla 9-Anexos, Fig.10). Sin embargo, estas diferencias fueron más marcadas

en la parcela de Masma, siendo las accesiones AMA y NAC las que mostraron tener mayor sensibilidad al estrés.

Por último, en cuanto al rendimiento, las diferencias más resaltantes se encontraron a nivel de parcelas (Tabla 13-Anexos, Tabla 4). Las parcelas con hipocótilos de mejor calidad fueron Óndores-ladera, Óndores-plano y Carhuamayo-plano en comparación con Carhuamayo-ladera, Achipampa y Masma (Tabla 4), las que tuvieron en común suelos ácidos y con baja concentración de fósforo disponible. El fósforo es un nutriente importante que participa en la síntesis de almidón [Houghland G, 1960]. En este sentido diversos estudios han reportado que en especies tuberosas como *Dioscorea esculenta* (Ñame), *Manihot esculenta* (Yuca) [Howeler R, 1990] y solanáceas [Covarrubias-Ramírez J, 2005; Fernandes A, 2015] se incorpora mayor concentración de fósforo durante la fase de tuberización. De este modo la deficiencia de fósforo en estas parcelas podría explicar el reducido crecimiento de los hipocótilos. Por otro lado, se sabe que el requerimiento hídrico en *L. meyenii* es mayor durante la maduración del hipocótilo [Cortes I, 2000]. En nuestro estudio, las parcelas en la zona baja (Masma y Achipampa) tuvieron menor disponibilidad de agua por el retraso y acortamiento de las lluvias en comparación a las parcelas de la zona alta (Carhuamayo y Óndores). Masma presentó un bajo porcentaje de humedad durante todo el periodo de desarrollo del cultivo, mientras que Achipampa mostró una rápida caída en la humedad del suelo 80 días después de la siembra en adelante (Fig.12). Esto acortó la duración del periodo del cultivo y redujo el tiempo de maduración del órgano de reserva, lo cual contribuyó (junto con la baja fertilidad) a que los hipocótilos de esta parcela tuvieran menor calidad (Tabla 7)

Nuestros resultados mostraron que las condiciones ambientales durante las primeras semanas del cultivo definen el establecimiento de las plántulas e influyen en el rendimiento del cultivo. La fertilidad del suelo jugó un rol clave durante el establecimiento y crecimiento de las plantas, siendo la acidez del suelo y la baja concentración de fósforo disponible los factores más relevantes. Esto amerita mayor investigación para mejorar el manejo de suelos en el cultivo de *L. meyenii*. Además, la disponibilidad de agua podría limitar las primeras fases de desarrollo y la maduración del hipocótilo. Ante esto se podrían aplicar técnicas de pre-germinación de semillas e investigar sobre técnicas de riego poco costosas para asegurar el rendimiento del cultivo. Por otro lado, las bajas temperaturas podrían influir en el tiempo de

emergencia de plántulas. Actualmente los agricultores cubren sus parcelas con paja para asegurar la supervivencia frente a las heladas, por lo que se podría investigar si estas técnicas también influyen en acelerar la emergencia de las plántulas. En cuanto a las disposiciones de suelo, se debe ahondar más en el tema para evaluar si técnicas como los camellones mejorarían el rendimiento del cultivo ya que nuestros resultados estuvieron influenciados por anomalías climáticas, pero se tiene conocimiento que en otros lugares como en Puno ya se han implementado y se han logrado resultados prometedores. Por último, encontramos que las diferencias entre las accesiones, en particular en la supervivencia, podrían ser explicadas por el peso de las semillas. Futuras investigaciones deben ahondar más sobre cómo mejorar y estandarizar la producción de semillas para obtener semillas de mejor calidad.

Debemos reconocer que tener terrenos con distinto grado de inclinación podría influir tanto en el drenaje del agua como en la exposición de las plantas al sol, pero no tomamos en cuenta este factor al evaluar el desempeño de las plantas. Por esto, recomendamos que en futuras investigaciones se uniformice la ubicación de parcelas para evitar que se este factor pueda distorsionar los resultados. Por otro lado, también debemos reconocer que el distrito de Masma, si bien pertenece a Valle del Mantaro (segundo centro productor de “maca”), no es un sitio donde convencionalmente se siembre “maca”, como sí lo son el resto de distritos incluidos en esta investigación, lo cual podría influir en que las plantas no hayan desarrollado todo su potencial.

Además, si bien empleamos estiércol de res para abonar el terreno de Masma, los resultados de los análisis químicos del suelo realizados a lo largo de todo el periodo de desarrollo del cultivo sugirieron que la fertilización no fue efectiva (reflejado en la baja fertilidad) porque posiblemente no se llegó a incorporar en el terreno o no se aplicó en cantidad suficiente, pero no podemos descartar la posibilidad de un efecto perjudicial de la aplicación de este fertilizante sobre el desempeño de las plantas.

## VII. CONCLUSIONES

1. Las primeras semanas del cultivo son cruciales para definir el establecimiento de las plantas de *L.meyenii* en campo.
2. El desempeño de las plantas (supervivencia, crecimiento y rendimiento final) se relacionó con las características del suelo.
3. La supervivencia de las plantas fue distinta entre las disposiciones del suelo, siendo mayor en hileras.
4. Encontramos diferencias en el desempeño de las plantas entre accesiones.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aduugna, A. (2013). Ecotypic variation for seed dormancy, longevity and germination requirements in wild/weedy *Sorghum bicolor* in Ethiopia: implications for seed mediated transgene dispersal and persistence. *SpringerPlus*, 2(1), 1.
2. Aliaga, R. (1999). Guía para el cultivo, aprovechamiento y conservación de la “maca” (*Lepidium meyenii*) Convenio Andrés Bello. *Santafé de Bogotá*. Lima-Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
3. Aliaga, R. (2004). “maca”. *Lepidium meyenii*. In: *Seminario, J. (ed.) Raíces Andinas- Contribuciones al conocimiento y a la capacitación*, 361-366.
4. Ambika, S., Manonmani, V., & Somasundaram, G. (2014). Review on effect of seed size on seedling vigour and seed yield. *Res. J. Seed Sci*, 7, 31-38.
5. Arbizu C, Calderón A, Castillo R, Cruz P, Estrada R, Hermann M, Nieto C, del Río A, Tello J, Toledo J, Jayasinghe U (1991). *Avances de los trabajos colaborativos del Centro Internacional de la Papa (CIP) en raíces y tuberosas andinas*.
6. Balemi, T., & Negisho, K. (2012). Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of soil science and plant nutrition*, 12(3), 547-562.
7. Barlow, K. M., Christy, B. P., O’leary, G. J., Riffkin, P. A., & Nuttall, J. G. (2015). Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: A review. *Field Crops Research*, 171, 109-119.
8. Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of experimental botany*, 55(403), 1607-1621.
9. Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). Variation in Seed Dormancy and Germination within and between Individuals and Populations of a Species. En *Seeds: ecology, biogeography, and, evolution of dormancy and germination*. Elsevier. Pp. 277-373.
10. Billings, W. D., & Mooney, H. A. (1968). The ecology of arctic and alpine plants. *Biological reviews*, 43(4), 481-529.
11. Boardman, N. K. (1977). Comparative photosynthesis of sun and shade plants. *Annual review of plant physiology*, 28(1), 355-377.

12. Brix, H. (2009). Chlorophylls and carotenoids in plant material. *Methods*.
13. Boyer, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218(4571), 443-448.
14. Carlson, P. S. (1972). Notes on the mechanism of action of gibberellic acid. *Nature*, 237(71), 39-41.
15. Chiera, J., Thomas, J., & Rufty, T. (2002). Leaf initiation and development in soybean under phosphorus stress. *Journal of Experimental Botany*, 53(368), 473-481.
16. Clément, C., Diaz Grados, D. A., Avula, B., Khan, I. A., Mayer, A. C., Ponce Aguirre, D. D, et al., (2010). Influence of colour type and previous cultivation on secondary metabolites in hypocotyls and leaves of “maca” (*Lepidium meyenii* Walpers). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(5), 861-869.
17. Cortes, I (2000). Estudio de necesidades hídricas de dos ecotipos de “maca” en el Valle del Mantaro. *Revista de trabajos de investigación, CNDG*. Instituto Geofísico del Perú, Lima, p. 23-28.
18. Covarrubias-Ramírez, J. M., Castillo-Aguilar, S., Vera-Núñez, J. A., Núñez-Escobar, R., Sánchez-García, P., Aveldanio-Salazar, R., & Peña-Cabriales, J. J. (2005). Phosphorus uptake and use efficiency by potato cultivar alpha using P-32. *Agrociencia*, 39(2), 127-136.
19. da Silva, E. C., Nogueira, R. J. M. C., da Silva, M. A., & de Albuquerque, M. B. (2011). Drought stress and plant nutrition. *Plant Stress*, 5, 32-41.
20. Deska, J., Jankowski, K., Bombik, A., & Jankowska, J. (2011). Effect of growing medium pH on germination and initial development of some grassland plants. *Acta Scientiarum Polonorum. Agricultura*, 10(4).
21. Dostert, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M. I., Weigend, M., & Luebert, F. (2009). Factsheet: Datos botánicos de “maca”. *Lepidium meyenii* Walp.
22. Ehlers, W., & Goss, M. (2016). Water dynamics in plant production. 26-30
23. Fay, P. A., & Schultz, M. J. (2009). Germination, survival, and growth of grass and forb seedlings: effects of soil moisture variability. *Acta Oecologica*, 35(5), 679-684.
24. Fenner, M. (1991). The effects of the parent environment on seed germinability. *Seed Science Research*, 1(02), 75-84.
25. Fenner, M. & Thompson, K. (2005). *The Ecology of Seeds*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

26. Fernandes, A. M., Soratto, R. P., Moreno, L. D. A., & Evangelista, R. M. (2015). Effect of phosphorus nutrition on quality of fresh tuber of potato cultivars. *Bragantia*, 74(1), 102-109.
27. Fernández M et al., editors. (1999). Investigaciones sobre “maca” en el Altiplano de Puno. Programa Interinstitucional de los Waru Waru (PIWA). Programa Especial Binacional Lago Titicaca (PELT), Puno, Perú; CIP (Centro Internacional de la papa), Lima, Perú. pp. 43-45.
28. Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2015). Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of experimental botany*.
29. Flores, H. E., Walker, T. S., Guimaraes, R. L., Bsid, H. P., & Vivanco, J. M. (2003). Andean root and tuber crops: Underground rainbows. *Hortiscience*, 38(2). p. 161–167.
30. Foy, C. D. (1992). Soil chemical factors limiting plant root growth. In *Limitations to plant root growth* (pp. 97-149). Springer New York.
31. Forcella, F., Arnold, R. L. B., Sanchez, R., & Ghera, C. M. (2000). Modeling seedling emergence. *Field Crops Research*, 67(2), 123-139.
32. Geritz, S.A. (1995) Evolutionarily Stable Seed Polymorphism and Small-Scale Spatial Variation in Seedling Density. *The American Naturalist*, 146, 685-707.
33. Gonzales G, Gonzales C, & Gonzales-Castañeda C. (2009). *Lepidium meyenii* (“maca”): a plant from the highlands of Peru-from tradition to science. *Forschende Komplementärmedizin*, 16(6):373-380.
34. Gonzales GF, Villaorduña L, Gasco M, Rubio J, Gonzales C. (2014). “maca” (*Lepidium meyenii* Walp), una revisión sobre sus propiedades biológicas. *Rev Peru Med Exp Salud Pública*. 31(1):100-10.
35. Halloy, S. R. P., Ortega, R., Yager, K., & Seimon, A. (2005). Traditional Andean cultivation systems and implications for sustainable land use. *Acta Horticulturae*, 670(1), 31-55.
36. Houghland, G. (1960). The influence of phosphorus on the growth and physiology of the potato plant. *American Potato Journal*, 37, 127-138.
37. Howeler, R. H. (1990). Phosphorus requirements and management of tropical root and tuber crops. In *Proceedings Symposium on Phosphorus Requirements for Sustainable Agriculture in Asia and Oceania* (pp. 427-444).

38. Jajarmi, V. (2009). Effect of water stress on germination indices in seven wheat cultivar. *World Acad. Sci. Eng. Technol*, 49, 105-106.
39. Khan, S. R., Rose, R., Haase, D. L., & Sabin, T. E. (2000). Effects of shade on morphology, chlorophyll concentration, and chlorophyll fluorescence of four Pacific Northwest conifer species. *New forests*, 19(2), 171-186.
40. Kanemasu, ET, DL Bark, y EC Choy. "Effect of soil temperature on sorghum emergence." *Plant and Soil* 43.1-3 (1975): 411-417.
41. Kidd, P. S., & Proctor, J. (2001). Why plants grow poorly on very acid soils: are ecologists missing the obvious?. *Journal of Experimental Botany*, 52(357), 791-799.
42. Körner, C. (2003). *Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems; with 47 tables*. Springer Science & Business Media.
43. Koyama, H., Toda, T., & Hara, T. (2001). Brief exposure to low- pH stress causes irreversible damage to the growing root in *Arabidopsis thaliana*: pectin–Ca interaction may play an important role in proton rhizotoxicity. *Journal of Experimental Botany*, 52(355), 361-368.
44. Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV- VIS spectroscopy. *Current protocols in food analytical chemistry*.
45. Lhomme, J. P., & Vacher, J. J. (2003). La mitigación de heladas en los camellones del altiplano andino. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, (32 (2)), 377-399.
46. Leishman, M. R., Wright, I. J., Moles, A. T., & Westoby, M. (2000). The evolutionary ecology of seed size. *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities*, 2, 31-57.
47. Mani, M. S., & Giddings, L. E. (1980). Ecology of highlands.
48. Matsumoto H. (2000) Cell biology of aluminium toxicity and tolerance in higher plants. *International Review of Cytology* 200, 1– 46.
49. Marín-Bravo, M. (2003). Histología de la “maca”, *Lepidium meyenii* Walpers (Brassicaceae). *Revista Peruana de Biología*, 10(1), 101-108.
50. Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of experimental botany*, 51(345), 659-668.

51. Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2016). Anuario estadístico de producción agrícola y ganadera (2015). Disponible en: <http://siea.minagri.gob.pe/siea/?q=publicaciones/anuarios-estadisticos>.
52. Moshatati, A., & Gharineh, M. H. (2012). Effect of grain weight on germination and seed vigor of wheat. *Intl J Agri Crop Sci*, 4(8), 458-460.
53. Palomino Echegaray M. 1998. Caracterización agronómica y selección de diferentes morfotipos de “maca” (*Lepidium sp.*) fase vegetativa, en su hábitat natural. Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú.
54. Pérez-García, F., González-Benito, M. E., & Gómez-Campo, C. (2007). High viability recorded in ultra-dry seeds of 37 species of Brassicaceae after almost 40 years of storage. *Seed Science and Technology*, 35(1), 143-153.
55. Pessaraki, M. (Ed.).(1999). Impact of Soil pH on Nutrient Uptake by Crop Plants. En: *Handbook of plant and crop stress*. CRC press. p 51-60.
56. Poschenrieder, C. H., Llugany, M., & Barceló, J. (1995). Short- term effects of pH and aluminium on mineral nutrition in maize varieties differing in proton and aluminium tolerance. *Journal of Plant Nutrition*, 18(7), 1495-1507.
57. Quiros, C. F., Epperson, A., Hu, J., & Holle, M. (1996). Physiological studies and determination of chromosome number in “maca”, *Lepidium meyenii* (Brassicaceae). *Economic Botany*, 50(2), 216-223.
58. Quirós C, Aliaga R (1997). “maca” (*Lepidium meyenii* Walp.). En: Hermann M, Hellers J, editors. Andean roots and tubers: Ahipá, Arracacha, “maca” and Yacon. Promoting the conservation and use of under-utilized neglected crops. Rome, Italy: International Plant Genetic Resources Institute. p. 173-197.
59. Rathcke, B., & Lacey, E. P. (1985). Phenological patterns of terrestrial plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 179-214.
60. Rebisso Ramos R. 1999. Comportamiento del cultivo de “maca” (*Lepidium meyenii* Walp) en agroecosistema waru waru en el altiplano de Puno. En: Fernández Valdivia M et al., editors. Investigaciones sobre “maca” en el Altiplano de Puno. Programa Interinstitucional de los Waru Waru (PIWA), Programa Especial Binacional Lago Titicaca (PELT), Puno, Perú; CIP (Centro Internacional de la papa), Lima, Perú. pp. 61-96.

61. Rout, G.R., Samantaray, S., Das, P., 2001. Aluminium toxicity in plants: a review. *Agronomie* 21, 3–2.
62. Robson, A. (Ed.). (1989). *The Chemical Behaviour of Aluminium, Hydrogen and Manganese in Acid Soils*. En: *Soil acidity and plant growth*. Elsevier.
63. Rundel, P. W., Smith, A. P., & Meinzer, F. C. (1994). *Tropical alpine environments: plant form and function*. Cambridge University Press.
64. Sachs, M., Cantliffe, D. J., & Watkins, J. T. (1980). Germination of pepper seed at low temperatures after various pretreatments. In *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* (Vol. 93, pp. 258-60).
65. Santisopasri, V., Kurotjanawong, K., Chotineeranat, S., Piyachomkwan, K., Sriroth, K., & Oates, C. G. (2001). Impact of water stress on yield and quality of cassava starch. *Industrial crops and products*, 13(2), 115-129.
66. Schulze, E. D., Beck, E., & Müller-Hohenstein, K. (2005). *Plant ecology*. Á Springer.
67. Schoenholtz, S. H., Van Miegroet, H., & Burger, J. A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest ecology and management*, 138(1), 335-356.
68. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2015). Boletín Informativo: Monitoreo del fenómeno “El Niño/La Niña” Diciembre – 2015. Disponible en: <http://www.senamhi.gob.pe/?p=0701>
69. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2016). Boletín Climático Nacional - Enero 2016. Disponible en: <http://www2.congreso.gob.pe>
70. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2016). Boletín Agrometeorológico mensual - Junio 2016. Disponible en: <http://www.senamhi.gob.pe/?p=0701>
71. Shoemaker, C. A., & Carlson, W. H. (1990). pH affects seed germination of eight bedding plant species. *HortScience*, 25(7), 762-764.
72. Simons, A. M., & Johnston, M. O. (2000). Variation in seed traits of *Lobelia inflata* (Campanulaceae): sources and fitness consequences. *American Journal of Botany*, 87(1), 124-132.
73. Singh, N. T., & Dhaliwal, G. S. (1972). Effect of soil temperature on seedling emergence in different crops. *Plant and Soil*, 37(2), 441-444.

74. Smith, A. P., & Young, T. P. (1987). Tropical alpine plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 137-158.
75. Sparks, D. L. (2003). The chemistry of soil acidity. En: *Environmental soil chemistry*. Academic press.
76. Stanton, M. L. (1984). Seed variation in wild radish: effect of seed size on components of seedling and adult fitness. *Ecology*, 65(4), 1105-1112.
77. Stoffella, P. J., DiPaola, M. L., Pardossi, A., & Tognoni, F. (1991). Rhizosphere pH influences early root morphology and development of bell peppers. *HortScience*, 26(2), 112-114.
78. Susko, D. J., & Lovett-Doust, L. (2000). Patterns of seed mass variation and their effects on seedling traits in *Alliaria petiolata* (Brassicaceae). *American Journal of Botany*, 87(1), 56-66.
79. Wery, J., Silim, S. N., Knights, E. J., Malhotra, R. S., & Cousin, R. (1993). Screening techniques and sources of tolerance to extremes of moisture and air temperature in cool season food legumes. *Euphytica*, 73(1-2), 73-83.
80. Wilcox, B. P., Allen, B. L., & Bryant, F. C. (1988). Description and classification of soils of the high-elevation grasslands of central Peru. *Geoderma*, 42(1), 79-94.
81. Yan, F., Schubert, S., & Mengel, K. (1992). Effect of low root medium pH on net proton release, root respiration, and root growth of corn (*Zea mays* L.) and broad bean (*Vicia faba* L.). *Plant Physiology*, 99(2), 415-421.

## IX. ANEXOS

Factor	GL	MS	F	<i>p</i>
Parcela	5	502.60	16.43	< <b>0.001</b>
Disposición del suelo	1	307.09	10.04	< <b>0.01</b>
Accesión	4	85.98	2.81	< <b>0.05</b>
Error	49	30.60		
R <sup>2</sup> =0.67				

**Tabla 6.** ANOVA de 3 vías para estimar el efecto de la parcela, disposición de suelo y la accesión sobre la supervivencia final de las plantas.

	GL	Wald Stat.	<i>p</i>
<b>Ondores-plano</b>			
Accesión (A)	4	11.37	< <b>0.05</b>
Disposición de suelo (D)	1	48.35	< <b>0.001</b>
A x D	4	31.70	< <b>0.001</b>
<b>Ondores-ladera</b>			
Accesión (A)	4	90.61	< <b>0.001</b>
Disposición de suelo (D)	1	28.21	< <b>0.001</b>
A x D	4	15.39	< <b>0.01</b>
<b>Carhuamayo-plano</b>			
Accesión (A)	4	19.42	< <b>0.001</b>
Disposición de suelo (D)	1	0.00	0.99
A x D	4	9.20	0.056 †

*p* < 0.05 es significativo

**Tabla 7.** Modelo de regresión logística para estimar el efecto de la accesión y la disposición de suelo sobre la supervivencia de plantas en las 3 parcelas de mayor productividad (Óndores-plano (OP), Óndores-ladera (OL) y Carhuamayo-plano (CP)). † = diferencia marginal.

<b>Variables</b>	<b>Diámetro promedio</b>
Número de hojas totales	<b>0.83*</b>

\* $p < 0.05$  es significativo

**Tabla 8.** Matriz de correlación de Pearson entre el número de hojas y el diámetro de la roseta de las plantas. Se muestra el coeficiente de correlación (r).

Factor	GL	Número de hojas totales	Diámetro de la roseta (cm)	Fv/Fm
Parcela (P)	5	<b>78.62***</b>	<b>99.03***</b>	<b>116.35***</b>
Accesión (A)	4	1.157	1.785	<b>2.70*</b>
P x A	20	0.820	1.097	<b>3.25***</b>
R <sup>2</sup>		0.42	0.34	0.65

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.0001$

**Tabla 9.** ANOVA de 2 vías con interacción para estimar el efecto de la parcela y la accesión sobre el crecimiento vegetativo (Número de hojas totales y diámetro de la roseta) y el desempeño fisiológico (Fv/Fm) de las plantas. Se muestran los valores de F acompañados de un asterisco (\*) según la significancia del efecto.

Factor	GL	Clorofila total (Ca+b)	Carotenoides totales (Cx+c)	Cociente de clorofilas (Ca/b)	Clorofilas/Carotenoides (Ca+b/x+c)
Parcela (P)	2	<b>35.27***</b>	<b>30.05***</b>	<b>89.31***</b>	<b>81.48***</b>
Accesión (A)	4	0.54	1.28	2.26	<b>3.58***</b>
P x A	8	<b>2.92**</b>	<b>3.26**</b>	1.25	1.06
R <sup>2</sup>		0.35	0.33	0.51	0.50

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.0001$

**Tabla 10.** ANOVA de 2 vías con interacción para estimar el efecto de la parcela (Óndores-ladera (OL), Óndores-plano (OP) y Achipampa (AA)), la accesión y su interacción sobre las variables asociadas a pigmentos fotosintéticos (concentración y cocientes). Se muestran los valores de F acompañados de un asterisco (\*) según la significancia del efecto.

	Peso fresco aéreo (g)	Peso seco aéreo (g)	%Humedad aerea	Peso fresco radicular (g)	Díametro promedio del hipocotilo(mm)	Longitud radicular total (mm)	Longitud del Hipocotilo (mm)
N° de Hojas	<b>0.69</b>	<b>0.72</b>	<b>0.42</b>	<b>0.71</b>	<b>0.76</b>	<b>0.45</b>	<b>0.49</b>
Peso fresco aéreo (gr)		<b>0.96</b>	<b>0.46</b>	<b>0.79</b>	<b>0.67</b>	<b>0.42</b>	<b>0.46</b>
Peso seco aéreo (gr)			<b>0.39</b>	<b>0.79</b>	<b>0.69</b>	<b>0.44</b>	<b>0.47</b>
%Humedad aerea				<b>0.45</b>	<b>0.51</b>	<b>0.41</b>	<b>0.35</b>
Peso fresco radicular (gr)					<b>0.88</b>	<b>0.58</b>	<b>0.59</b>
Díametro promedio (mm)						<b>0.62</b>	<b>0.61</b>
Longitud radicular total (mm)							<b>0.56</b>

N= 1039

\*Los valores en negrita representan un  $p < 0.05$  significativo

**Tabla 11.** Matriz de correlación de Pearson de las variables biométricas de la parte aérea y radicular de las plantas. Se muestra el coeficiente de correlación (r).

	Prueba	Valor	F	Efecto	Error	<i>p</i>
Parcela	Wilks	0.31	29.88	45	4556.86	< <b>0.0001</b>
Disposición de suelo	Wilks	0.85	20.37	9	1018.00	< <b>0.0001</b>
Accesión	Wilks	0.76	8.19	36	3816.65	< <b>0.0001</b>

*p* < 0.05 significativo

**Tabla 12.** MANOVA sin interacción para estimar el efecto de la parcela, disposición de suelo y de la accesión sobre las variables biométricas de la parte aérea y radicular de las plantas cosechadas en las 6 parcelas experimentales.

Factor	GL	Parte aérea				Parte radicular				
		N° de hojas totales	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	% Humedad	Peso fresco (g)	Long. radicular total (mm)	Diámetro (mm) ( <b>D</b> )	Long. hipocotilo (mm) ( <b>L</b> )	Relación L/D
Parcela	5	<b>75.93***</b>	<b>89.32***</b>	<b>88.48***</b>	<b>84.13***</b>	<b>150.51***</b>	<b>64.33***</b>	<b>103.68***</b>	<b>72.41***</b>	<b>39.92***</b>
Disp. De suelo	1	0.55	<b>8.77**</b>	0.28	<b>97.92***</b>	1.44	<b>7.77**</b>	2.25	0.42	0.431
Accesión	4	<b>11.23***</b>	<b>11.37***</b>	<b>10.58***</b>	<b>6.21***</b>	0.88	<b>3.31*</b>	<b>4.59**</b>	<b>11.12***</b>	<b>9.02***</b>
R2		0.31	0.34	0.33	0.4	0.43	0.24	0.36	0.27	0.18

\**p* < 0.05, \*\**p* < 0.01, \*\*\**p* < 0.0001

**Tabla 13.** ANOVA de 3 vías para estimar el efecto de la parcela, disposición de suelo y la accesión sobre las variables biométricas de la parte aérea y radicular de las plantas. Se muestran los valores de F acompañados de un asterisco (\*) según la significancia del efecto.

Factor	GL	MS	F	p
Parcela (P)	5	262.28	144.14	< <b>0.0001</b>
Monitoreo (M)	3	421.90	231.85	< <b>0.0001</b>
P x M	15	33.14	18.21	< <b>0.0001</b>
Error	48	1.82		
<b>R<sup>2</sup> = 0.97</b>				

*p* < 0.05 significativo

**Tabla 14.** ANOVA 2 vías con interacción para evaluar las diferencias en el porcentaje de humedad entre parcelas y monitoreos.

	CE (es)	MO (%)	P ppm	K ppm	Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>
pH	-0.10	0.15	<b>0.68</b> ***	-0.24	<b>-0.57</b> ***
CE (es)		0.25	-0.10	<b>0.70</b> ***	-0.33
MO (%)			0.30	0.25	-0.15
P ppm				-0.32	<b>-0.43</b> *
K ppm					-0.29

\**p*<0.05, \*\**p*<0.01, \*\*\**p*<0.0001

**Tabla 15.** Matriz de correlación de Pearson entre las variables fisicoquímicas del suelo. Se muestra el coeficiente de correlación (r) con \* según su significancia.

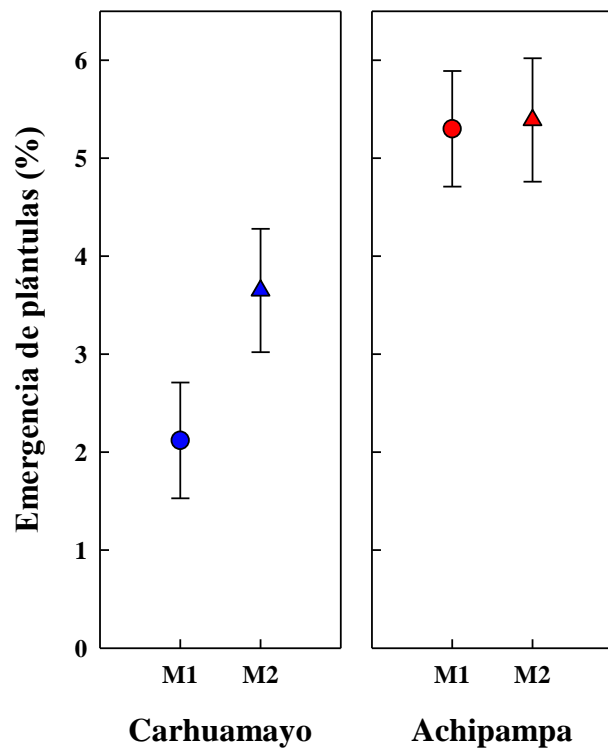
	PC 1	PC 2
pH (1:1)	<b>0.872</b>	-0.219
CE (es)	0.079	<b>0.884</b>
MO (%)	0.403	0.386
P ppm	<b>0.857</b>	-0.257
K ppm	-0.096	<b>0.925</b>
Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>	<b>-0.749</b>	-0.367
Varianza explicada	37.28	33.89

**Tabla 16.** Factores de carga del PCA de las variables fisicoquímicas del suelo. Los dos primeros componentes que explican más del 71% de la varianza total. Los valores reportados son coeficientes de correlación. En negrita se resalta las variables que contribuyeron en mayor grado a cada componente principal.

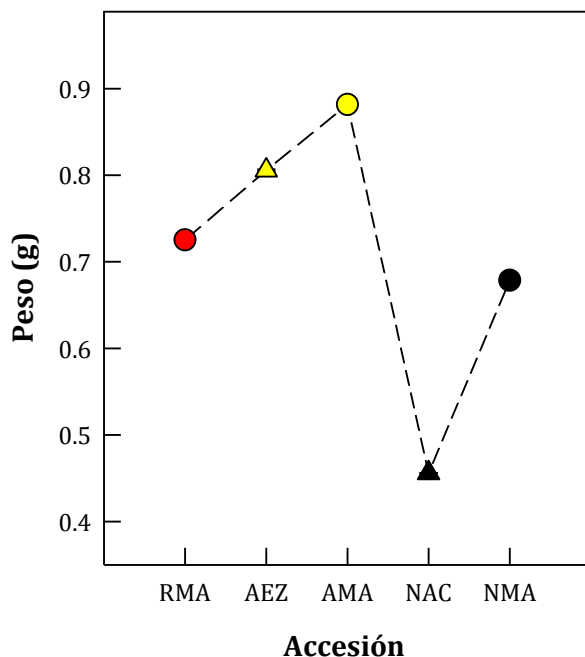
	Wilks' $\lambda$	F	DF	$p$
<b>MANOVA</b>				
Parcela	0.030	22.991	10, 48	<b>&lt; 0.0001</b>
<b>ANOVAs univariados</b>				
PC1				
Parcela		31.977	5, 25	<b>&lt; 0.0001</b>
PC2				
Parcela		16.865	5, 25	<b>&lt; 0.0001</b>

$p < 0.05$  es significativo

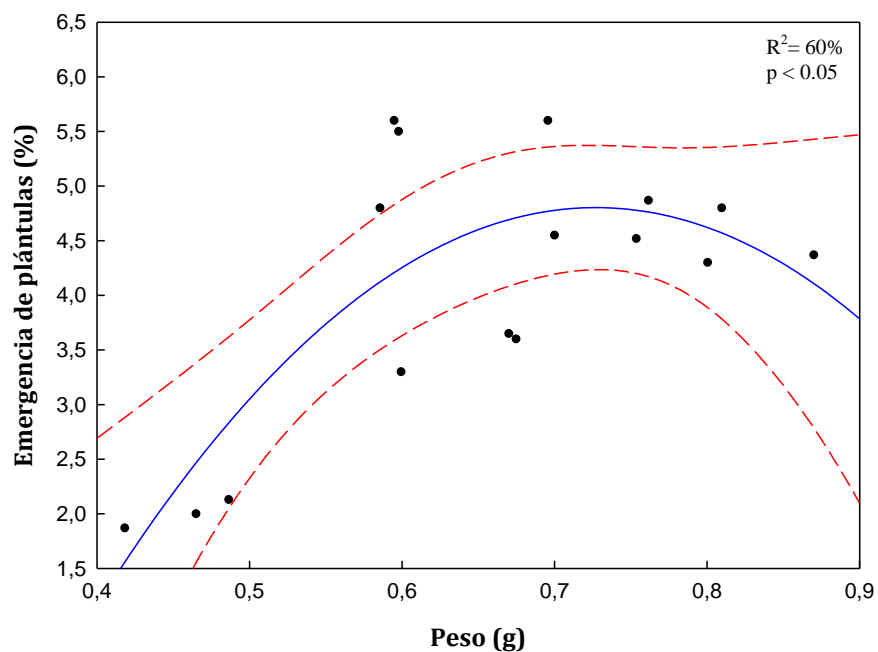
**Tabla 17.** MANOVA y ANOVAs univariados para evaluar el efecto de la parcela sobre los 2 componentes principales del PCA. Los efectos significativos se encuentran en negrita.



**Figura 16.** Porcentaje de emergencia de las plántulas de *L. meyenii* durante los dos primeros monitoreos (M1 y M2) en dos parcelas experimentales localizadas en Carhuamayo y Achipampa respectivamente. Se muestra la media  $\pm$  EE.



**Figura 17.** Peso de 1000 semillas de las accesiones de *L. meyenii* empleadas en la siembra.



**Figura 18.** Relación entre el peso de semillas de *L. meyenii* y el porcentaje de emergencia de plántulas en campo. Cada punto representa el peso de 1000 semillas de accesiones (N=16) de distintos colores de “maca” (N=5) y de distintos productores (N=7). Se muestra la tendencia cuadrática (línea azul), el intervalo de confianza al 95% (líneas rojas punteadas) y el ajuste del modelo ( $R^2$ ).