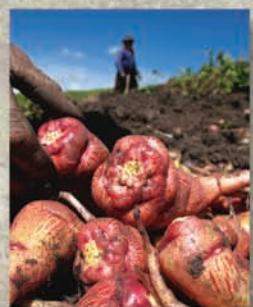


Explorando Opciones Agroecológicas para el Manejo de la Fertilidad del Suelo en Sistemas de Agricultura en Pequeña Escala de las Zonas Alto-Andinas

Informe y Recomendaciones para la Fundación McKnight



Explorando Opciones Agroecológicas para el Manejo de la Fertilidad del Suelo en Sistemas de Agricultura en pequeña escala de las Zonas Alto-andinas

Informe y Recomendaciones para la Fundación McKnight

Preparado por:

Steven J. Fonte* – Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)

Steven J. Vanek* – Universidad de Cornell

Pedro Oyarzun – Ekorural

Soroush Parsa – CIAT

D. Carolina Quintero – CIAT

Idupulapati Rao – CIAT

Patrick Lavelle – CIAT / Institut de Recherche sur le Développement (IRD), Francia

* **Dirigir correspondencia a:**

Steven J. Fonte

Programa de Biología y Fertilidad de Suelos Tropicales
Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)
Cali, Colombia
Email: s.fonte@cgiar.org

Steven J. Vanek

Departamento de Ciencias de Cultivos y Suelos
Universidad Cornell
Ithaca, NY 14853
Estados Unidos
Email: sjvanek@yahoo.com

ÍNDICE

	Página
Introducción: Temas Agrícolas y de Fertilidad de los Suelos de las Zonas Alto-Andinas	1
Sistemas de cultivo en los Andes	1
Riesgos y limitaciones biofísicas	1
Condiciones socioeconómicas y culturales de la agricultura andina	3
Retos actuales y amenazas emergentes	7
Intensificación agrícola ecológicamente basada para el contexto andino	8
 La Fertilidad de Suelos y las Estrategias de Manejo en Los Sistemas de Pequeños Productores	11
Concepto general de fertilidad del suelo	11
Enfoques para examinar la fertilidad del suelo	11
Balance de masa de nutrientes	11
Dinámica y sincronización de nutrientes a corto plazo	15
Ambiente físico-químico de los suelos	18
Funcionamiento biológico de los suelos	20
Fitomejoramiento para la intensificación agroecológica y el cambio climático	26
Organización espacial y temporal de fincas	31
 Consideraciones Adicionales sobre las Intervenciones en la Fertilidad del Suelo	35
Necesiada de incorporar los factores co-limitantes al crecimiento de los cultivos	35
Herramientas para la evaluación y manejo de la fertilidad del suelo	35
Integración de las necesidades y conocimientos locales a la investigación de la fertilidad del suelo	36
 Conclusiones y Recomendaciones	37
Panorama de la intensificación agroecológica en el contexto andino	37
Recomendaciones a donantes y a organizaciones públicas de investigación y políticas	37
Criterios y razones del cambio propuesto para las recomendaciones	37
Recomendaciones para cuatro zonas edáficas de Los Andes	39
<i>Andosoles: los Andes húmedos del norte</i>	40
<i>Ambientes de ladera de carácter mixtos y sedimentarios: intensificación y fragilidad</i>	42
<i>El Altiplano: crisis de sequía y materia orgánica del suelo</i>	43
<i>Valles aluviales: poca extensión, manejo intensivo y potencial productivo</i>	45
Integración regional: evaluaciones de largo plazo a las prácticas sobre la capacidad productiva del suelo e integración de los esfuerzos en toda la región	46
 Anexo A: Esquema completo de recomendaciones para las áreas temáticas de las futuras investigaciones andinas de suelos, basado en los enfoques del manejo de fertilidad del suelo.	48
 Referencias	50

Introducción

Temas Agrícolas y de Fertilidad de los Suelos de las Zonas Alto-Andinas

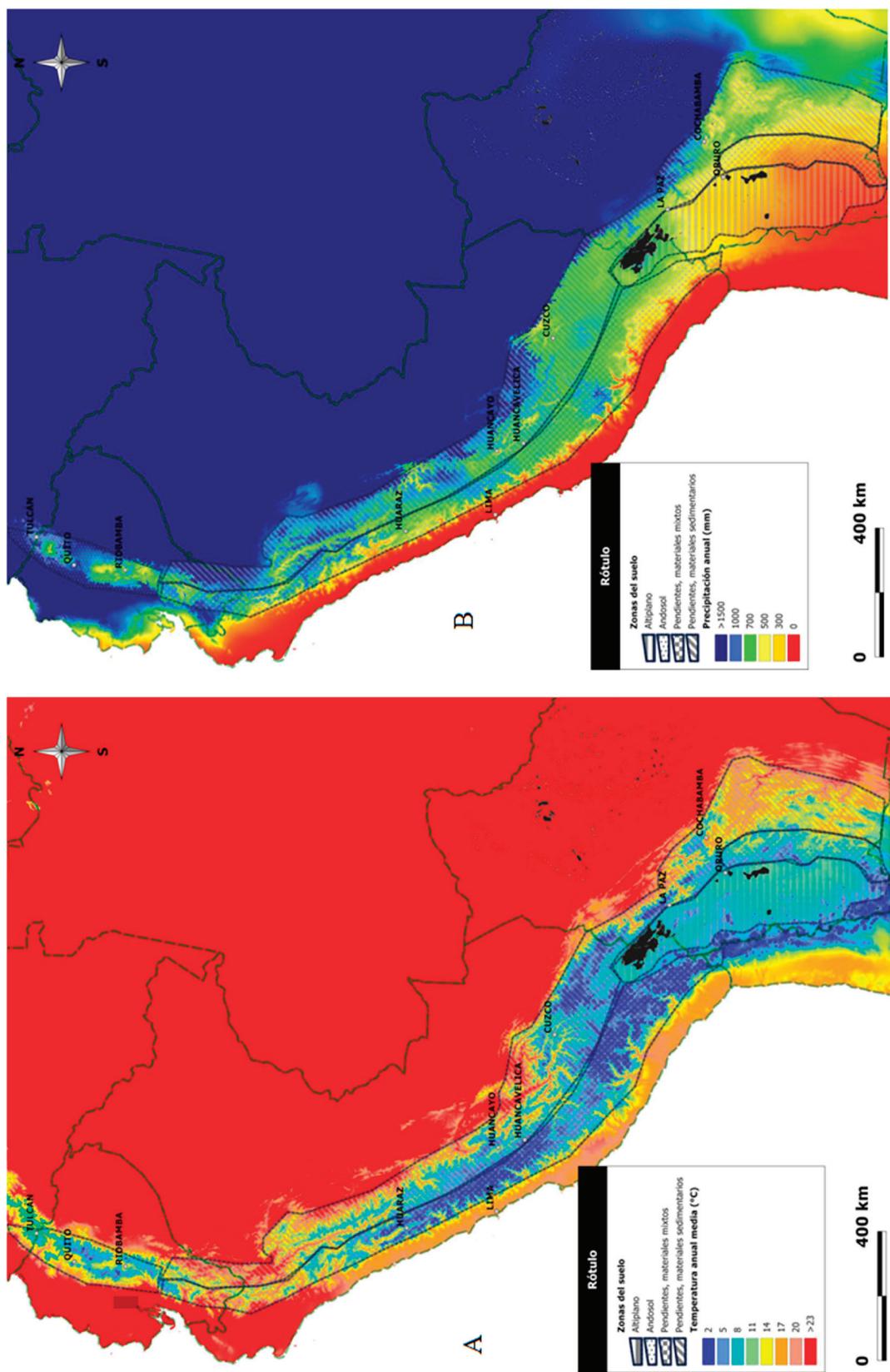
Sistemas de cultivo en los Andes

La agricultura practicada en las zonas tropicales alto-andinas (>2500 m) corresponde a una mezcla diversa de cultivos y sistemas de cultivo cuyos orígenes se remontan a varios milenios atrás (Sandor y Eash, 1995; Stanish, 2007). Hoy en día, la mayoría de estos agroecosistemas están manejados por pequeños agricultores de comunidades rurales, que cultivan una mezcla de cultivos del antiguo y nuevo mundo en una amplia gama de escenarios socioeconómicos y ambientales. Aunque tradicionalmente la papa (*Solanum spp.*) ha dominado la producción de alimentos en la región, muchos otros cultivos son importantes, entre otros: los granos (p. ej., maíz, quinua, cebada, avena), las legumbres (p. ej., habas, las arvejas, chocho o tarwi), otros tubérculos nativos (p. ej., oca, mashwa, ulluco) y una amplia gama de vegetales (p. ej., zanahoria, cebolla, col). El ganado sigue siendo parte integral de estos agroecosistemas e incluye camélidos nativos (como llamas y alpacas), bovinos, ovinos, pollos y cuyes. Aunque la agricultura mixta prevalece en áreas por bajo de 3800 m de altura, el ganado cobra mayor importancia con mayor altura, donde las heladas limitan la producción de cultivos. En términos generales, la intensidad de la actividad agrícola se basa en un gradiente altitudinal: en zonas menos elevadas hay un manejo más intensivo y una producción de cultivos más diversa, mientras que en zonas más elevadas los sistemas son más extensivos. En los agroecosistemas de las zonas alto-andinas se emplean diversas estrategias de cultivo y una gama de intensidades agrícolas que van desde sistemas de barbecho sectorial con bajos insumos, en donde generalmente se cultiva por varios años seguidos de 3 a 15 años de pastoreo en barbecho o descanso (Orlove y Godoy, 1986; Pestalozzi, 2000), hasta las estructuras permanentes de manejo más intensivo, como

terrazas (andenes) y camellones (waru-waru o suka) (de la Torre y Burga, 1986). Más recientemente, la agricultura industrial introdujo la labranza mecanizada e insumos agroquímicos para un cultivo continuo en grandes extensiones, especialmente en alturas menores. La distribución de estas prácticas de manejo varía bastante, dependiendo de factores culturales, geográficos y demográficos. Por ejemplo, una mayor densidad poblacional y distancias relativamente cortas a los mercados en áreas agrícolas periurbanas, ha generado una agricultura comercial de manejo intensivo y alto uso de insumos, mientras que en las áreas andinas geográficamente más aisladas se da mayor énfasis a una agricultura de subsistencia de bajos insumos (Caycho-Ronco *et al.*, 2009). Las restricciones ambientales también tienen un papel trascendental ya que las precipitaciones, la temperatura y el tipo de suelo son variables sumamente importantes en toda la región y determinan en gran medida los cultivos a producir.

Riesgos y limitaciones biofísicas

A pesar de la diversidad de los agroecosistemas en las zonas alto-andinas tropicales, la agricultura está limitada por un conjunto de condiciones ambientales común a toda la región (Stadel, 1991). El clima desempeña quizás el papel más importante (Figuras 1A y 1B). Puesto que hay poco acceso a riego, la mayor parte de la agricultura de la región depende de las lluvias, lo cual reduce los rendimientos cuando baja el nivel de precipitaciones y conduce a la pérdida de cultivos en años de sequía, situación que tiene graves implicaciones para la estabilidad del rendimiento en general. Este riesgo es, tal vez, más crítico para el relativamente árido altiplano, para los valles interandinos de Bolivia y la ladera occidental del Perú, que para los Andes del norte, donde la precipitación anual generalmente es mayor



Figuras 1A y 1B. Temperatura (A) y Precipitación promedio anual (B) para la región andina estudiada (Ecuador, Perú y Bolivia). Los rótulos indican valores mínimos de rangos de precipitación o temperatura. Para elaborar los mapas se usó la base de datos de WorldClim (<http://www.worldclim.org>) siguiendo los métodos de Hijmans *et al.*(2005).

(Figura 1A; Bottner *et al.*, 2006; Geerts *et al.*, 2006). Las temperaturas frías, especialmente en áreas más altas (Figura 1B) limitan el crecimiento y aumentan el riesgo de daño por heladas y granizo. Por otro lado, debido a la naturaleza montañosa de la región, muchas fincas están dominadas por terreno empinado y rocoso con alta heterogeneidad espacial en suelos y microclimas (Zehetner y Miller, 2006; Buytaert *et al.*, 2007). Con pocas excepciones, los suelos alto-andinos son delgados, frágiles y tienen pocos nutrientes (Figuras 2, 3 y 4). Aunque los suelos volcánicos (andosoles) del Ecuador y el norte del Perú pueden ser más fértiles dado su alto contenido de materia orgánica (MOS) y una estructura de suelo más favorable, esto depende mucho de las condiciones de meteorización y del material original sobre el que se formaron. Por ejemplo, los andosoles alófanicos están entre los suelos más fértiles del mundo, mientras que los andosoles no alófanicos que dominan las altiplanicies ecuatorianas (Poulenard *et al.*, 2001), pueden presentar serios problemas de deficiencia de fósforo (debido a su alta capacidad de fijación de P; Figura 3), acidez y toxicidad por aluminio (Dahlgren *et al.*, 2004). Por su parte, los suelos de los Andes centrales (en el sur del Perú y en Bolivia) generalmente tienen bajo contenido de materia orgánica y nutrientes, su textura es más gruesa, son altamente susceptibles a la erosión y en promedio tienen un pH más neutral (Figura 4; Valente y Oliver, 1993; Bottner *et al.*, 2006; Cárdenas y Choque, 2008). A pesar de estas condiciones generales, conviene señalar que el manejo intensivo con estiércol y barbechos en las partes menos vulnerables de las tierras cultivadas puede generar áreas localizadas de alta fertilidad con niveles impresionantes de productividad (García, 2011). Asimismo, en contraste con los suelos de las tierras bajas altamente meteorizados por el clima y normalmente asociados con las latitudes tropicales, muchos suelos de los Andes centrales son similares a los suelos mediterráneos que se encuentran regiones templadas (p. ej., el sur de Europa y partes de América del Norte). Esto permite cierto grado de transferencia de conocimientos sobre manejo de suelos de estas regiones que han sido más estudiadas.

Es ampliamente aceptado que los cultivos se enfrentan con más amenaza de herbívoros, tanto plagas como agentes patógenos si están en sus

centros de origen (Jennings y Cock, 1977). La región andina no es una excepción. Por ejemplo, en los Andes, la papa enfrenta una doble amenaza: el tizón tardío y varias especies de polillas, el gorgojo y nemátodos, y cada uno de ellos puede causar la pérdida total de cultivos. En los últimos años, la gravedad de los problemas de plagas en los Andes se ha intensificado significativamente, presumiblemente debido a los efectos de la intensificación agrícola y al cambio climático, entre otros factores (Parsa, 2010). A pesar de las numerosas investigaciones, las soluciones a estos problemas están rezagadas, en particular para cultivos desatendidos como la oca (*Oxalis* *tuberosa*), a los que cada vez más agricultores abandonan a causa de las severas infestaciones de plagas (Hersh, 2000).

Condiciones socioeconómicas y culturales de la agricultura andina

Además de las limitaciones impuestas por el clima, tipo de suelo y plagas, muchos agricultores de esta región tienen poco acceso a insumos agrícolas básicos, como fertilizantes, plaguicidas, variedades mejoradas de cultivos, labranza mecanizada y riego. A pesar de que, en ausencia de tales insumos, la agricultura tradicional puede haber sido sostenible en gran medida durante siglos (Dick *et al.*, 1994), las recientes presiones (p. ej., crecimiento poblacional, acceso a mercados, actitudes locales, cambio climático) han generado mayor demanda del uso de estos insumos (Sarmiento *et al.*, 1993). Los insumos de materia orgánica disponibles a nivel local también están escaseando debido a la creciente demanda de combustibles y forrajes, y a la disminuida producción de biomasa –resultado de la decreciente fertilidad del suelo y el uso competitivo de la tierra (Swinton y Quiroz, 2003; Orsag, 2009). La larga tradición agrícola de la región, junto con la preservación de las culturas y conocimientos indígenas, han dotado a muchas comunidades andinas de un complejo nivel de manejo agroecológico (Sandor y Furbee, 1996; Winklerprins, 1999). No obstante, por los acelerados cambios en los contextos agrícola, climático y socioeconómico, se requiere nueva información y mayor intercambio de conocimientos para apoyar a los agricultores a adaptarse a los retos emergentes.

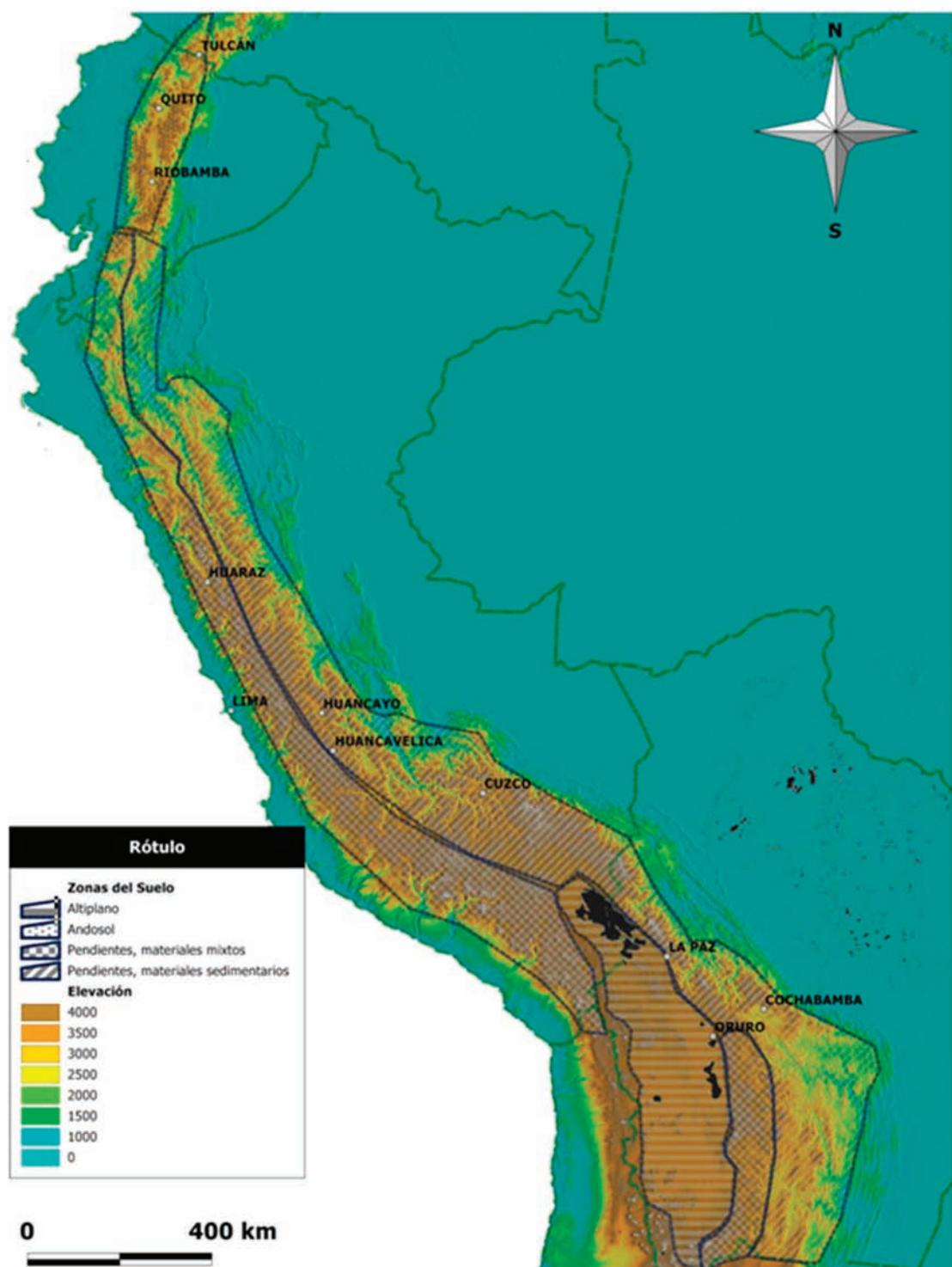


Figura 2. Mapa de las zonas de suelo propuestas para los Andes con el modelo digital de elevación (DEM) (Jarvis *et al.*, 2008).

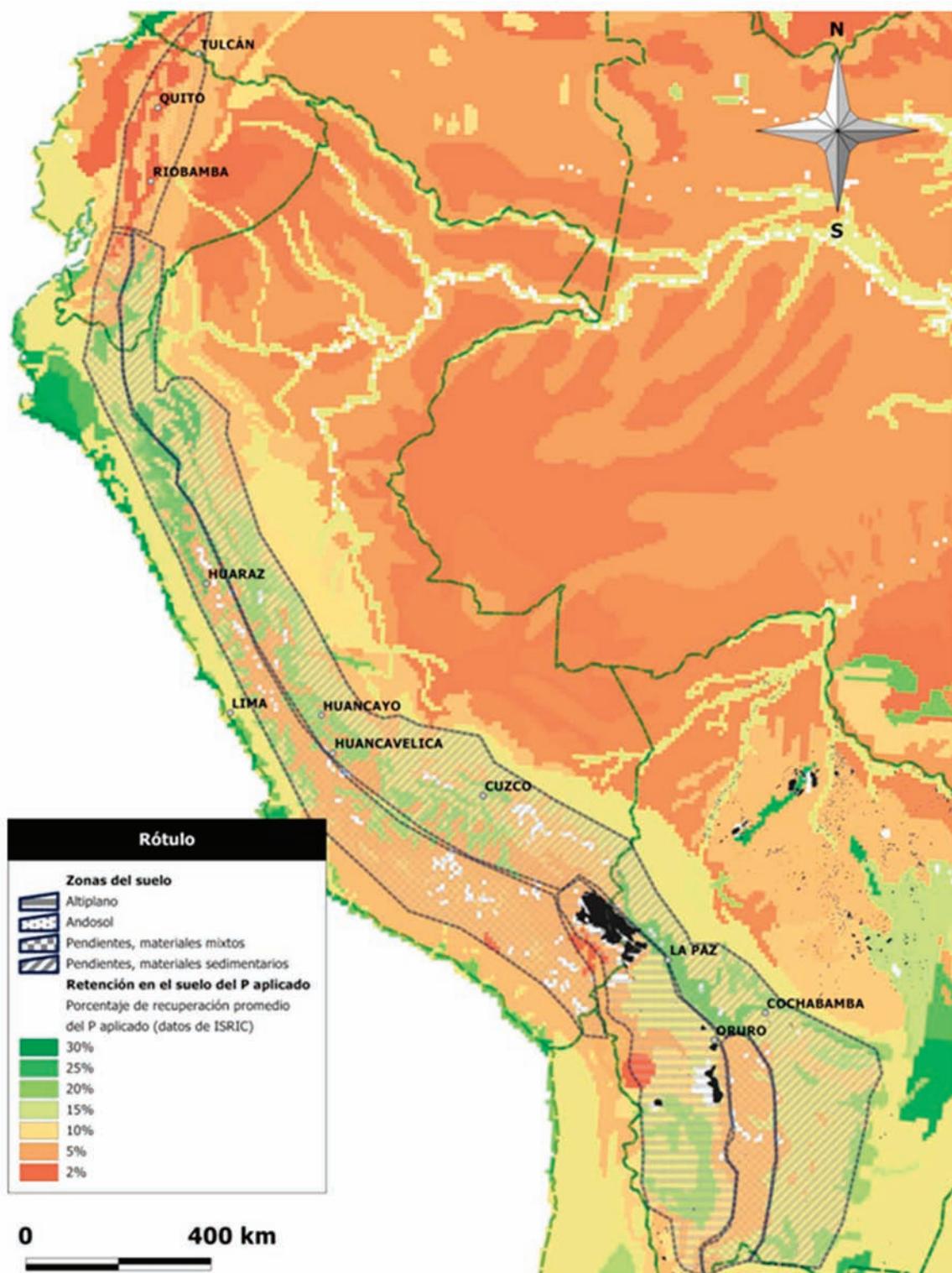


Figura 3. Retención estimada de fósforo (P) en suelos, expresada como porcentaje de recuperación de fósforo aplicado, con las zonas de suelo propuestas para los Andes (Batjes 2011).

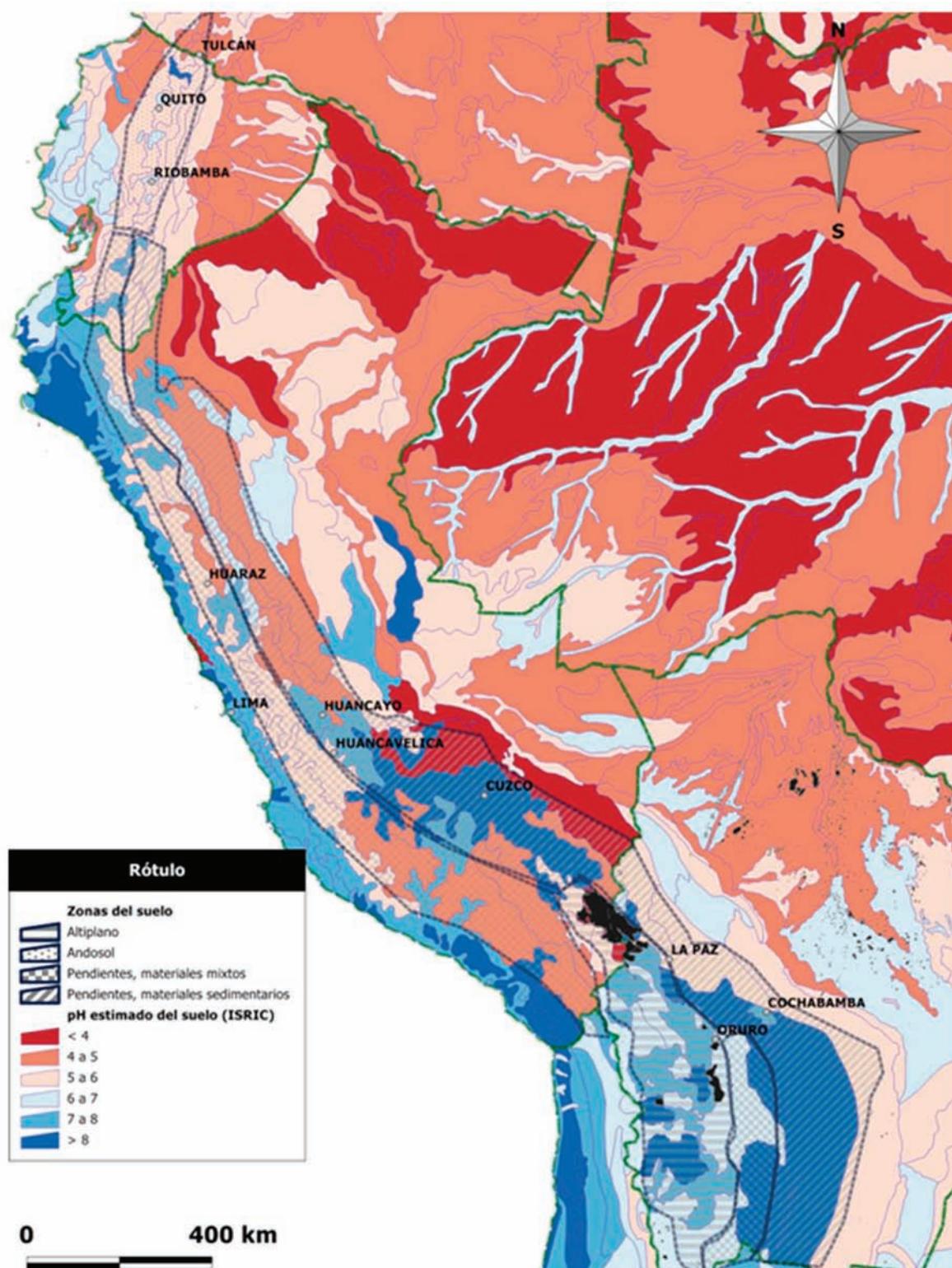


Figura 4. Mapa de pH estimado de los suelos de la región, según los datos globales de ISRIC-WISE³. Los mapas deben interpretarse con cautela en terrenos de laderas porque el pH del suelo puede variar ampliamente según el material original (calcáreo o no calcáreo) y la elevación debido a variaciones de temperatura y del balance hídrico del suelo.

El acceso a los insumos agrícolas y a conocimientos externos es particularmente difícil para las comunidades rurales ubicadas lejos de los centros poblados. El aislamiento en que viven eleva el costo de los productos importados; la transferencia de tecnología (tanto externa como local) a menudo es lenta; y la distancia a los mercados es tal, que los agricultores tienen pocos incentivos para invertir en su tierra más allá de lo que necesitan para el consumo familiar y el comercio local (Swinton y Quiroz, 2003). La pobreza también representa un obstáculo serio, ya que los agricultores pobres no tienen los recursos monetarios para invertir en nuevas tecnologías ni pueden darse el lujo de asumir el riesgo que implican estas actividades. Estos problemas son particularmente relevantes en el Altiplano, en donde los niveles de pobreza exceden en mucho a los promedios nacionales de Bolivia y de Perú, y donde más del 60% de la población vive en zonas rurales (Quiroz *et al.*, 2003). La escasez de mano de obra también puede limitar la inversión de los agricultores en zonas rurales, ya que cada vez más familias agrícolas buscan diversificar sus ingresos con la migración y en empleos fuera de la finca familiar (Zimmerer, 1993; Collins, 1988).

Además del acceso a los recursos, otros factores influyen en la productividad agrícola y en la capacidad de los agricultores de adoptar nuevas tecnologías. Por ejemplo, la tenencia de la tierra puede tener gran influencia en las decisiones de los agricultores, puesto que generalmente son renuentes a invertir en mejoras agrícolas de largo plazo (es decir, en estructuras de conservación del suelo, manejo adecuado de MOS) en tierras que no poseen (Tenge *et al.*, 2004). Los actuales cambios en el manejo de la tierra, del control comunal al privado, representa otra faceta única de la agricultura andina, cuyos resultados prácticos son unidades agrícolas más pequeñas e intensificación del uso de esos campos (Mayer, 1979; Cárdenas y Choque, 2008). A pesar de que el manejo individual potencialmente podría conllevar a innovaciones más rápidas, cada vez hay más pruebas que sugieren que la falta de un proceso coordinado de toma de decisiones acerca de las prácticas agrícolas puede agravar los problemas de fertilidad del suelo, manejo pecuario y regulación de plagas (Mayer, 1979; Orsag, 2009; Parsa, 2010). Las preferencias alimentarias locales y culturales

también afectan el uso que los agricultores dan a insumos y prácticas agrícolas. Por ejemplo, muchos agricultores deciden no cultivar las variedades mejoradas de papa o no aplicar productos agroquímicos a cultivos cuyas cosechas se consumen en casa o se venden a nivel local, porque piensan que las prácticas y variedades tradicionales confieren mejor calidad y sabor (Caycho-Ronco *et al.*, 2009).

Retos actuales y amenazas emergentes

A pesar de la larga historia agrícola de la región, en los últimos decenios ha surgido una serie de amenazas a la capacidad de estos agroecosistemas de proveer alimentos y servicios ambientales clave de largo plazo. Es evidente que el crecimiento poblacional y el aumento general de la demanda alimentaria son factores importantes de la intensificación agrícola (Winters *et al.*, 1998; Orsag, 2009); sin embargo, una serie de transformaciones tecnológicas y sociales también han contribuido a la degradación y a la pérdida de fertilidad de los suelos en los Andes (Córdoba y Novoa, 1997; Winters *et al.*, 1998). La introducción de nuevas tecnologías, como la labranza mecanizada y fertilizantes químicos, ha agravado la pérdida de MOS y la erosión (Sarmiento *et al.*, 1993; Poulenard *et al.*, 2001; Quintero, 2009); a su vez, otras formas de intensificación (p. ej., menor tiempo en barbecho o descanso) pueden tener repercusiones similares en toda una gama de condiciones agrícolas (Pestalozzi, 2000; Sarmiento y Bottner, 2002). Al mismo tiempo, la escasez de mano de obra local y los altos niveles de emigración (más comunes en las zonas rurales) pueden llevar a la des-intensificación y consiguiente incremento de la erosión por el consecuente deterioro de las estructuras de conservación del suelo o continuas pérdidas de suelo en los campos con vegetación degradada y mala cobertura (Zimmerer, 1993; Harden, 1996; Wiegers *et al.*, 1999). La degradación del suelo a menudo es un proceso que se auto-perpetúa cuando el descenso en la productividad de los cultivos induce a los agricultores a poner a producir nuevas tierras que a menudo son más marginales (Kessler y Stroosnijder, 2006). Estas tierras recién cultivadas con frecuencia se encuentran a mayores alturas, en pendientes más pronunciadas y/o tipos de suelo

inapropiados, por lo que son más susceptibles a la erosión y a la degradación del suelo (Córdoba y Novoa, 1997; Poulenard *et al.*, 2001; Hofstede *et al.*, 2002) y tienen rendimientos potenciales menores. Además de los problemas de la degradación y la sedimentación del suelo, la colonización de áreas naturales amenaza los servicios ecológicos clave de las cuencas (Hofstede, 1995; Buytaert *et al.*, 2002; Buytaert *et al.*, 2006) y la diversidad biológica (Jaimes y Sarmiento, 2002; Lawler *et al.*, 2009).

Aparte de las consecuencias directas de la intervención humana en los paisajes andinos, el cambio climático presenta una seria amenaza a los agricultores de las zonas altas de esta región (Valdivia y Quiroz, 2003; Perez *et al.*, 2010; Valdivia *et al.*, 2010). Aunque un incremento de la temperatura y una elevación del CO₂ podría aumentar el potencial de crecimiento de los cultivos en algunas áreas (Buytaert *et al.*, 2010a), la creciente variabilidad del clima (en particular, más precipitaciones erráticas) junto con la reducción del abastecimiento del agua de los glaciares a largo plazo (Bradley *et al.*, 2006) son causas de gran preocupación. Es probable que temperaturas más elevadas, combinadas con vientos más fuertes aumenten la evapotranspiración, lo cual exacerbaría la tensión por el tema de agua para cultivos. Aunque los cambios generales en la precipitación total aún no están claros, las lluvias podrían aparecer más tarde en el año y se espera que sean menos frecuentes y de mayor intensidad (Thibeault *et al.*, 2010; Valdivia *et al.*, 2010). Hay que anotar que en el corto plazo el derretimiento de los glaciares podría incrementar la disponibilidad de agua en algunas áreas (en particular, en los agroecosistemas en los valles), sin embargo no es claro hasta cuándo durará este efecto. El impacto del cambio climático en los suelos es quizás menos claro. La mayor productividad de plantas en algunas áreas podría contribuir a la MOS, pero eso también podría conducir a un mayor agotamiento de los nutrientes del suelo (van Groenigen *et al.*, 2006). Es probable que la reducción de la cubierta vegetal y la mayor variabilidad de las precipitaciones en algunas áreas tengan como resultado mayor erosión y la subsiguiente pérdida de nutrientes. Al mismo tiempo, es probable que las temperaturas en aumento aceleren las pérdidas de C en el suelo debido a la descomposición de la

MOS (Davidson y Janssens, 2006; Buytaert *et al.*, 2010a) y pueden causar un efecto negativo en los organismos de descomposición de suelos (Briones *et al.*, 2009).

La alta heterogeneidad de los microclimas, la compleja y baja resolución de los modelos climáticos globales generan gran incertidumbre acerca de las predicciones climáticas en los Andes y limitan la capacidad de los agricultores y de quienes toman las decisiones en la región de prever cambios y adaptarse a ellos (Buytaert *et al.*, 2010b; Valdivia *et al.*, 2010). Las alteraciones climáticas junto con la intensificación de la agricultura pueden conducir a una mayor presión de plagas ya que un clima más caliente favorecería su reproducción y debilitaría la resistencia de las plantas debido a mayor estrés por agua (Bale *et al.*, 2002, Garret *et al.* 2006). Encuestas a agricultores y pruebas preliminares sugieren que el cambio climático ya está produciendo impactos negativos en algunos cultivos andinos debido a crecientes déficits de agua, erosión y pérdidas de la MOS (Aguilera, 2010); y acentúan la necesidad de crear nuevas estrategias agrícolas que mejoren la capacidad ecológica para adaptarse y la flexibilidad de los agroecosistemas.

Intensificación agrícola ecológicamente basada para el contexto andino

Los grandes retos que la región andina tiene por delante muestran la necesidad de una intervención drástica que contrarreste la degradación generalizada y ayude a los agricultores a adaptarse a condiciones que cambian rápidamente. La intensificación agrícola basada exclusivamente en las tecnologías de la 'revolución verde' quizás no sea adecuada ni aconsejable si consideramos las complejas condiciones socioeconómicas de la región y su relativa fragilidad ambiental. La alta heterogeneidad del clima, la topografía, el tipo de suelo y la cultura obstaculizan aún más la implementación de soluciones generales (p. ej., variedades mejoradas) y resaltan la necesidad de disponer de tecnologías apropiadas y localmente adaptadas con las que se puedan abordar las limitaciones específicas de cada subregión. Las singulares necesidades culturales y la complejidad ecológica de los Andes resaltan la necesidad de

contar con enfoques ecológicos que enfoquen en maximizar la estabilidad a largo plazo y la capacidad para adaptarse frente a extremos climáticos, en lugar de buscar la rentabilidad económica a corto plazo. Dentro del contexto de fertilidad de suelos, la intensificación agroecológica debe centrarse en usar y aumentar la provisión de recursos locales y renovables para fertilizar el suelo (p. ej., abono, cultivos de cobertura, compost) así como optimizar el uso eficiente de nutrientes en la finca. Las prácticas en fertilidad y manejo del suelo deberán estar dirigidas a promover organismos benéficos para el suelo/planta, transformaciones biológicas que incrementen la disponibilidad de nutrientes y un mejor acoplamiento de los ciclos de nutrientes (especialmente N y P) con rotación de C (Drinkwater y Snapp, 2007). Para evitar confusiones, hacemos notar que la ‘intensificación’ en términos agroecológicos no necesariamente implica mayor productividad o rendimiento, sino que simplemente podría tratarse de un aumento de conocimientos y/o la complejidad del manejo con el fin de lograr rendimientos óptimos en un ambiente particular, sin amenazar la sostenibilidad

de la producción agrícola a largo plazo. De hecho, la intensificación no sostenible ya ha avanzado bastante en los Andes en el contexto de la migración, las transiciones que se alejan de los sistemas de manejo comunitario y el cambio climático, todo lo cual conduce a la degradación de los recursos del suelo. En muchos casos, la intensificación agroecológica puede equivaler ‘simplemente’ a detener el descenso de la productividad debido a la degradación del suelo mediante los enfoques aquí descritos, en lugar de nuevos métodos ‘agroecológicos’ que impulsen los ecosistemas más allá de su capacidad de producción. Sin embargo, más adelante también intentamos identificar oportunidades sostenibles para lograr algo más que sólo detener la degradación.

La región andina ofrece un valioso caso de ensayo de dicha intensificación agroecológica por una serie atributos claves: 1) una gran diversidad de cultivos, genotipos, estrategias de manejo y ambientes de cultivos (p. ej., NRC, 1989); 2), una creciente conciencia ambiental y apoyo social a las

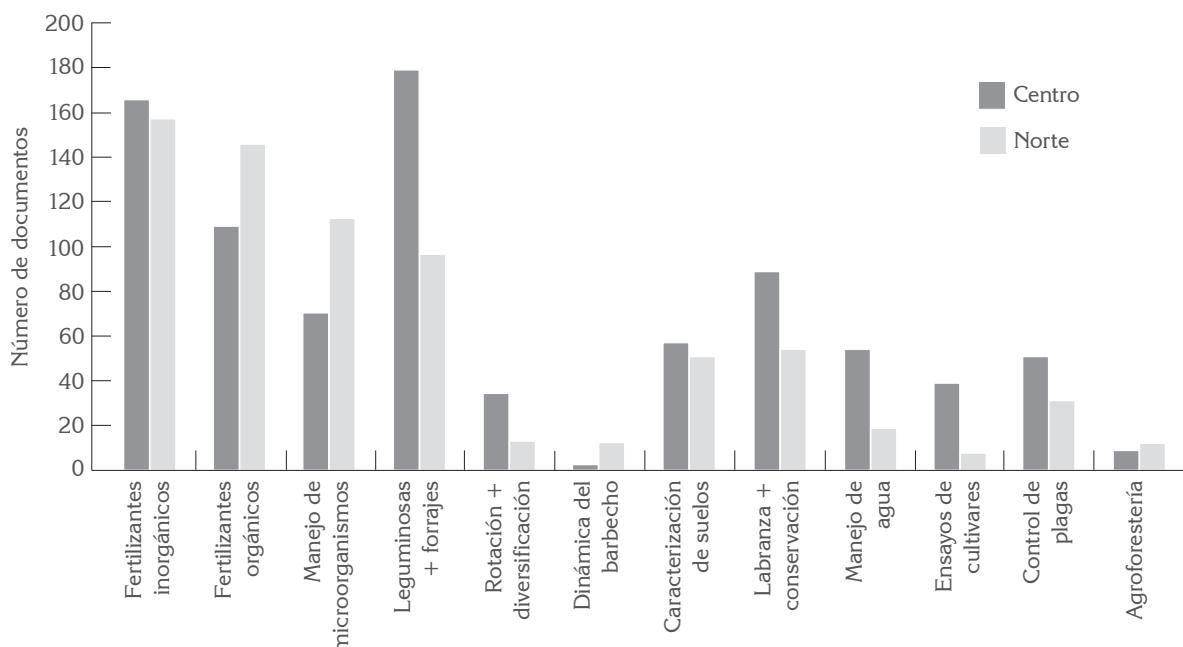


Figura 5. Distribución de los principales documentos de investigación entre los diferentes temas de investigación relacionados con fertilidad de suelos en el alto-andino central (Bolivia y Perú) y del norte (Colombia, Ecuador y Venezuela). Los documentos fueron calificados en una o más de las 12 categorías, puesto que algunos documentos cubren varios temas.

variedades y prácticas de cultivo indígenas (Bebbington ., 1993; Vargas, 2009); 3) una valiosa historia del conocimiento local y extensión agrícola; y 4) una densidad de población relativamente baja que permite más flexibilidad para explorar alternativas tecnológicas apropiadas. Tomando en consideración los mencionados principios ecológicos y las capacidades específicas de la región, este documento busca evaluar las anteriores investigaciones sobre la fertilidad del suelo en el alto-andino tropical, y explorar las opciones y potenciales sinergias más prometedoras para la intensificación agroecológica en la región. Con este plan en mente, realizamos una búsqueda bibliográfica extensa que incluyó artículos sometidos a revisión por pares, informes institucionales, tesis de estudiantes, memorias de conferencias y una amplia gama de documentos de instituciones de investigación y educación de los

Andes. En un intento inicial por cuantificar estos temas de investigación y sus enfoques, los documentos fueron clasificados en 12 temas amplios y se tabularon por región (Andes del norte vs. Andes centrales) para lograr una evaluación más cuantitativa del enfoque de los temas de investigación a la fecha (Figura 5). Asimismo, hemos considerado como potenciales fuentes de innovación a tecnologías promisorias e investigaciones sobre fertilidad del suelo elaboradas en otras partes del mundo donde existen similitudes económicas y/o ambientales claves respecto a la región de los Andes. El objetivo de esta revisión fue generar recomendaciones para intervenciones estratégicas *in situ* en las fincas, así como para futuras investigaciones sobre fertilidad de suelos, con el fin de hacer avanzar el desarrollo agrícola sostenible en la región.

La Fertilidad de Suelos y las Estrategias de Manejo en Los Sistemas De Pequeños Productores

Concepto general de fertilidad del suelo

En este documento usamos una definición integral de fertilidad del suelo que considera la disponibilidad de nutrientes y el conjunto de aspectos físicos, químicos y biológicos que caracterizan los ambientes de suelos y los servicios ecosistémicos que estos prestan. También consideramos los factores adicionales que limitan el crecimiento de los cultivos por sus importantes implicaciones en la absorción de nutrientes y en la productividad de los cultivos. En esta sección intentaremos abordar la fertilidad del suelo desde la perspectiva de su manejo, considerando seis enfoques básicos para optimizar los ciclos de nutrientes, la adquisición de nutrientes por los cultivos y la productividad a largo plazo. Estos enfoques son: 1) el balance de masa de nutrientes en los agroecosistemas; 2) la dinámica de nutrientes a corto plazo; 3) el ambiente físico-químico de los suelos; 4) el funcionamiento biológico de los suelos; 5) el fitomejoramiento para la intensificación agroecológica; y, 6) la organización espacial y temporal de las fincas. Por otro lado, estos enfoques pueden proveer respuestas a problemas comunes de fertilidad del suelo en fincas de pequeños agricultores.

Enfoques para examinar la fertilidad del suelo

Balance de masa de nutrientes

Uno de los enfoques más sencillos pero más valiosos para evaluar la dinámica a largo plazo de la fertilidad del suelo de agroecosistemas es considerar un balance general de entradas y pérdidas de nutrientes (Smaling y Fresco, 1993; Cobo *et al.*, 2010). Este enfoque considera tanto el manejo intencional de insumos (p. ej., fertilizante o abono) y pérdidas (p. ej., nutrientes que se van con cultivos o ganado producidos para el mercado), así

como las transferencias no intencionales de nutrientes (p. ej., nutrientes en el agua de riego o en la atmósfera; y pérdidas por erosión, quema, lixiviación o por emisión de gases). Según esta perspectiva, el ingreso de nutrientes en un sistema debe ser igual o mayor que la salida de nutrientes a fin de mantener los rendimientos a largo plazo (Figura 6). Aunque N y el P son los nutrientes más limitantes para la agricultura en los Andes (Bossio y Cassman, 1991; Devaux *et al.*, 1997), otros como K, S y Ca pueden convertirse en limitantes en varias circunstancias (van de Kop, 1996; de Koning *et al.*, 1997; Vanek, 2010). A este nivel, el manejo mejorado de la fertilidad del suelo debe enfocarse en el reciclaje mejorado de nutrientes en los agroecosistemas y requiere de una comprensión cuidadosa de los insumos y las pérdidas del sistema. Sugerimos que el enfoque del balance de masa es un punto de partida útil que impone una consideración de los límites del sistema de producción y de su sostenibilidad a largo plazo. Sin embargo, es importante recalcar que el balance de nutrientes de todo un sistema frecuentemente incluye grandes incertidumbres y dejan de lado detalles críticos de los ciclos internos y entradas de nutrientes por la meteorización.

La remoción de nutrientes de los agroecosistemas mediante la exportación en cultivos (o ganado) representa la forma de pérdida de nutrientes más importante en los sistemas de cultivo (Smaling *et al.*, 1993; Vitousek *et al.*, 2009). Comprender estas pérdidas es fundamental para asegurar una productividad a largo plazo. Por ejemplo, en algunos sistemas de cultivo andinos se ha calculado que la exportación de K en los cultivos es mayor que a través de otros mecanismos de remoción de K ,como la erosión o lixiviación (de Koning *et al.*, 1997; Vanek, 2010). La remoción de N y de P en los cultivos también puede ser importante pero no es siempre el principal mecanismo de pérdida de nutrientes en los Andes. Dado que, a la larga, la exportación de

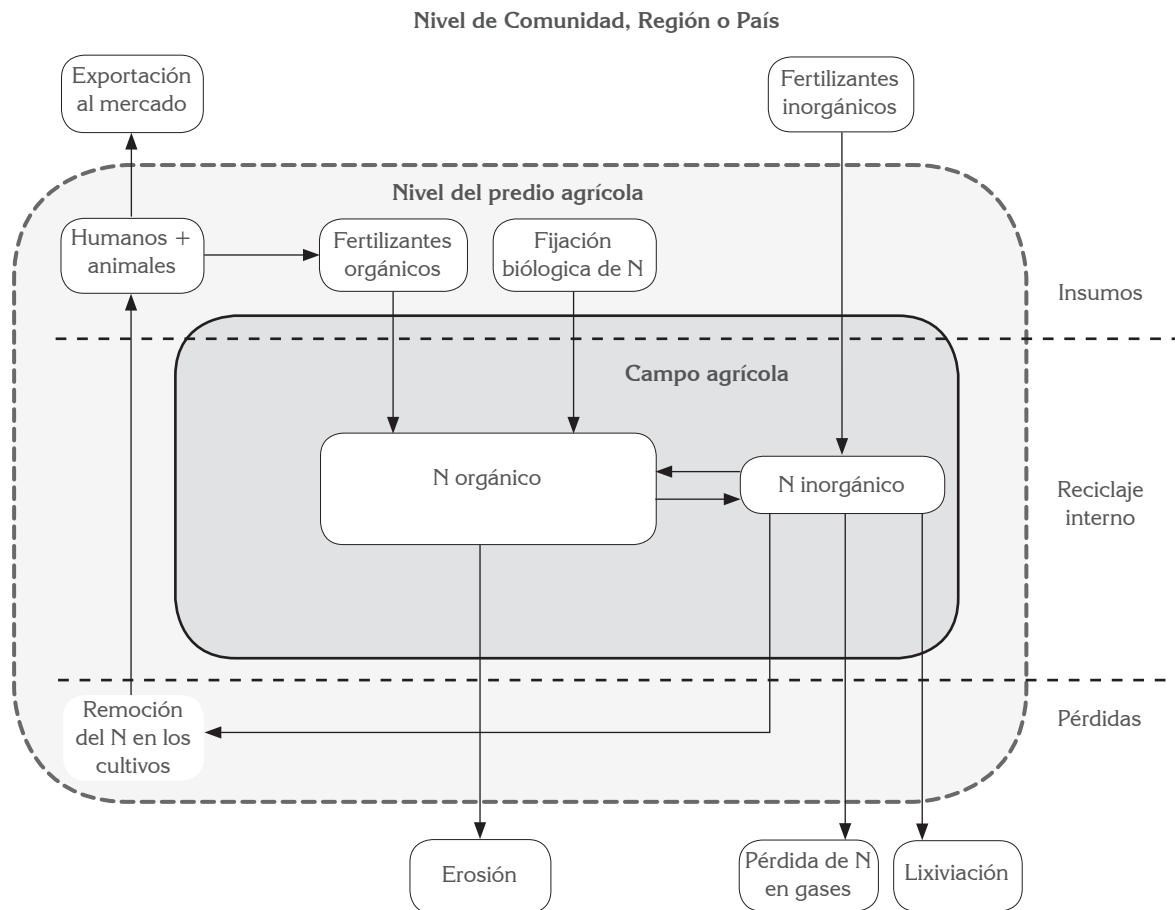


Figura 6. Diagrama generalizado del flujo de nitrógeno de un campo agrícola pequeño típico, que incluye las escalas espaciales de las fuentes de nutrientes. Los rectángulos representan los límites del predio o campo (rectángulo interno sólido) y la unidad de manejo familiar o de la finca (rectángulo exterior), y un límite entre la escala de la comunidad y los mercados urbanos que suministran el fertilizante inorgánico y otros materiales externos de fertilización y que son, además, un destino de los productos agrícolas comercializados y de exportación de N. El dibujo muestra que parte del N se recicla dentro campo y la mayoría de cultivos y los restos de nutrientes se reciclan dentro de las fincas o se pierde por la erosión. Las tierras de pastoreo pueden representar un recurso importante de fertilidad a través del pastoreo de ganado en los sistemas extensivos de los Andes centrales. Las flechas representan el tamaño aproximado de las rutas de pérdida.

nutrientes en la cosecha es aceptable ya que conlleva beneficios que percibe el agricultor en términos de rendimiento, valor nutricional, e ingreso, es preferible concentrar el trabajo de equilibrar el balance de nutrientes en otros mecanismos no intencionales de pérdida.

El terreno empinado y la vulnerabilidad general del suelo de los Andes elevan las tasas de erosión en la región (Harden, 1988; Alegre *et al.*, 1990;

Harden, 1993), y este mecanismo crítico de pérdida ha llamado mucho la atención en los últimos años. Por ejemplo, se ha calculado que las tasas de pérdida de suelos en los campos agrícolas de los Andes peruanos están en el orden de 10 y 100 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Felipe-Morales, 2002; Romero-León, 2005). Haciendo un cálculo conservador del contenido de N del suelo en 1 g kg⁻¹ de la capa superficial del suelo (Sandor y Eash, 1995) y una tasa de pérdida de suelo de 50 Mg ha⁻¹ año⁻¹, se

obtiene una pérdida anual de N de aproximadamente 50 kg ha⁻¹. Este valor es similar a las pérdidas reportadas en otros lugares de los Andes y generalmente supera las salidas de N asociadas con la cosecha (de 10 a 30 kg ha⁻¹ año⁻¹) (de Koning *et al.*, 1997). Sin embargo, las pérdidas de nutrientes por erosión pueden ser mucho más altas en ciertas circunstancias. En los Andes ecuatorianos, donde el contenido de MOS y de nutrientes tiende a ser bastante alto (Buytaert *et al.*, 2007; Tonneijck *et al.*, 2010), Harden (1988) calculó tasas de erosión de hasta 800 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en zonas con pendientes y altamente sensibles. Aunque este ejemplo representa un caso extremo, destaca el potencial de la erosión de contrarrestar rápidamente el balance de nutrientes en los agroecosistemas andinos. Es de anotar también que las pérdidas de P por erosión pueden ser aún más importantes que las de N, ya que a menudo exceden la limitada capacidad de los agricultores de reponer el P con abono o fertilizantes. Tal vez una consecuencia más grave de las elevadas tasas de erosión sea la pérdida de un sustrato apropiado para el crecimiento de los cultivos. Si bien las reservas de nutrientes pueden restaurarse mediante la fertilización, la formación del suelo es lenta: el promedio global estimado es de apenas 1 Mg de tierra formada ha⁻¹ año⁻¹ (Pimentel, 2006). Por consiguiente, la aplicación de estrategias viables de conservación del suelo es crítica en toda la región de los Andes, tanto desde la perspectiva del balance de nutrientes, como desde metas más generales de sostenibilidad del agroecosistema.

La susceptibilidad de los suelos a la erosión depende en mucho de la topografía, la pendiente, el clima y el tipo de suelo, aunque en gran medida se debe también a factores como la cobertura vegetal, el sistema de cultivo, la labranza y la intensidad de la ganadería (Inbar y Llerena, 2000; Coppus *et al.*, 2003). Dado el rol ampliamente reconocido de las perturbaciones agrícolas en el incremento exacerbado de la erosión (Montgomery, 2007), se ha propuesto una serie de tecnologías para conservar los suelos en los Andes y en otros sitios. Para las fincas en laderas con pendientes más pronunciadas, las terrazas de roca y tierra representan uno de los métodos más antiguos de conservación del suelo en la región y han resultado muy exitosos para combatir la erosión (Sandor y Eash, 1995; Goodman-Elgar, 2008); sin embargo,

estas estructuras ya no representan una opción viable debido a los altos requerimientos de mano de obra y a las condiciones políticas y socioeconómicas alteradas (Dehn, 1995; Posthumus y De Graaff, 2005). Las terrazas formadas por cercas vivas son atractivas porque requieren una inversión inicial considerablemente menor, ofrecen subproductos clave (p. ej., forraje, combustible, insumos basados en materia orgánica) y pueden controlar eficazmente la erosión (Craswell *et al.*, 1998; Sims *et al.*, 1999). Al trabajar en Bolivia, Sims *et al.* (1999) sugirieron que las gramíneas (*Phalaris sp.*) constituyen el mejor control de la erosión en esos sistemas ya que crecen rápidamente y proveen forraje para el ganado. Sin embargo, la competencia por nutrientes y agua entre las cercas vivas y los cultivos, junto con la gran variabilidad espacial existente dentro de las terrazas de cercas vivas indican que tales tecnologías requieren de mayor estudio y/o modificación (Dercon *et al.*, 2006). Los cultivos de cobertura son otro medio viable para controlar la erosión en los suelos de ladera, ya que protegen el suelo en sitios y épocas sin cultivos (Sims *et al.*, 1999; Bunch, 2004). El desarrollo de tecnologías de cultivos de cobertura adaptadas para controlar la erosión en los Andes es algo sumamente deseable, ya que los cultivos de cobertura también pueden ser una contribución significativa a las reservas de nutrientes de suelo y materia orgánica (Wheeler *et al.*, 1999; Snapp y Silim, 2002). A pesar del gran potencial de las tecnologías basadas en plantas para el control de la erosión, los costos de mantenimiento (p. ej., mano de obra, semilla) y las demandas de conocimientos podrían limitar su adopción por parte de los pequeños agricultores (Snapp *et al.*, 1998; Bunch, 2004; Posthumus *et al.*, 2010). Otras estrategias de control de erosión se concentran en reducir la perturbación de suelos (labranza) para reducir la demanda de mano de obra y conservar los suelos. Por ejemplo, el sistema wacho rozado de los Andes del norte (Sherwood *et al.*, 1999), así como los sistemas chiwa y chacméo de los Andes centrales (Oswald *et al.*, 2009) son sistemas indígenas únicos para sembrar papa cuyo objetivo es minimizar el movimiento de suelos en las fincas de los pequeños agricultores. Se han desarrollado también opciones de labranza reducida para fincas más grandes, que emplean la tracción animal o labranza mecanizada (Wall, 1999;

Mamani *et al.*, 2001; Quintero, 2009) y podrían ser especialmente importantes en las fincas de laderas en los Andes del norte, en donde la labranza mecanizada del suelo es más común y representa una amenaza mayor para la erosión. Sin embargo, aún se requiere de mucha inversión para trabajar con los agricultores en el desarrollo de tecnologías e implementos adaptados al lugar, que minimicen la perturbación del suelo y brinden opciones viables para las fincas pequeñas y medianas de la región. A la escala de cuencas, en algunas áreas de valles se ha mitigado la erosión recapturando el suelo erosionado (y los nutrientes) en el sedimento de los campos en los márgenes de los ríos. Esta era una característica clave de las antiguas prácticas de riego por inundación usadas en los Andes y en otros lugares (Mehari *et al.*, 2011; Zimmerer, 2011), y ese mismo beneficio es el que se busca con los muros de gaviones que capturan el suelo a lo largo de los ríos, y que algunas ONG promueven en la región (Pacheco *et al.*, 1992). A pesar de los progresos logrados en las tecnologías de conservación de suelos, es preciso evaluar aún más el potencial de la labranza mínima y otras estrategias para detener la erosión.

Existen otras formas de pérdida de nutrientes por lixiviación y emisión de gases, en particular de N. Estas pérdidas no solo amenazan los rendimientos a largo plazo, sino que pueden tener impactos altamente dañinos en la calidad del agua de la región, en los ecosistemas acuáticos cuenca abajo y en la emisión de gases de efecto invernadero (Matson *et al.*, 1998). Tales formas de exportación de nutrientes pueden ser considerables en los agroecosistemas con alto uso de fertilizantes o abono, pero a menudo son las menos comprendidas por los agricultores y puede resultar difícil cuantificarlas. Entre las estrategias de manejo para controlarlas está reducir la disponibilidad de nutrientes durante épocas de poca demanda de plantas (ver Figura 4 y Sección 2.2.2) así como, incrementar la MOS y la capacidad de almacenamiento de nutrientes de los suelos (Craswell y Lefroy, 2001).

Debido a que la mayoría de pequeños agricultores tiene pocos recursos, el reciclaje mejorado de nutrientes en las fincas ofrece una atractiva forma de cerrar las brechas de nutrientes, ya que muchos insumos (p. ej., residuos de

cultivos, abono, compost) están razonablemente disponibles y su obtención requiere de poca mano de obra adicional. Por ejemplo, Osman (1999) sugirió un manejo mejorado del estiércol y orina del ganado (es decir, compostaje, rápida incorporación en el suelo) como medio para reducir las pérdidas de N por volatilización y mejorar significativamente los presupuestos de N agrícola de los pequeños agricultores en Perú. Por una serie de razones, (facilidad para trillar el grano, uso de residuos de cultivos para forraje y combustible), los residuos de la quinua, maíz, chocho o tarwi y otros granos a menudo son retirados del campo durante la cosecha. La retención (o devolución) de estos residuos en el campo podría contribuir sustancialmente a restaurar el balance de nutrientes y a combatir el agotamiento de la MOS (Fuentes *et al.*, 2009). Aunque todas estas intervenciones sencillas prometen buenos resultados, muchos mecanismos de pérdida son más difíciles de controlar –en particular aquellos asociados a la orina y las heces humanas. La recuperación y aplicación seguras de desechos humanos –que puede significar un aporte importante en el balance de nutrientes de las fincas pequeñas (Kanmegne *et al.*, 2006)– a menudo enfrentan obstáculos tecnológicos y culturales (Cofie *et al.*, 2005; Karak y Bhattacharyya, 2011), resultando en pérdidas continuas de elementos claves. Aún bajo prácticas ideales de manejo, las pérdidas son inevitables y a la larga se necesitan fuentes alternas de ingreso de nutrientes para restaurar el equilibrio de nutrientes.

Aunque los insumos orgánicos (estiércol, residuos de plantas) y barbechos prolongados se han usado tradicionalmente para restaurar la fertilidad del suelo (Hervé, 1994; Sarmiento y Bottner, 2002), la intensificación de los sistemas de cultivo (esto es, períodos más cortos de barbecho) ha incrementado la dependencia en los fertilizantes sintéticos (cuando están disponibles y pueden costearse) para compensar la diferencia (Claverías, 1994; Wiegers *et al.*, 1999). Sin embargo, en varios agroecosistemas de las zonas alto-andinas se han reportado balances negativos de nutrientes debidos principalmente a la erosión (de Koning *et al.*, 1997; Osman, 1999; Vanek, 2010), lo cual sugiere que los niveles de fertilizante que los agricultores aplican a menudo son insuficientes. Quizá el medio más evidente para abordar los

déficits de N a largo plazo sea un mayor uso de las leguminosas y la fijación biológica del N, puesto que las leguminosas ya son un componente fundamental de los sistemas agrícolas, y los agricultores comprenden muy bien sus beneficios. No obstante, el aporte de N de las leguminosas generalmente es insuficiente para satisfacer la demanda de cultivos y además para reponer las reservas de N del suelo. Se necesita una mayor integración de legumbres en los sistemas de cultivo (dentro y fuera de los campos) para responder mejor a los requerimientos usuales de N en las fincas (Snapp *et al.*, 2005). La escasez de otros nutrientes, en particular del P, es más compleja y también podría tener consecuencias en la fijación de N (Chalk, 2000; Reed *et al.*, 2007). Aadir P, K, Ca y otros elementos potencialmente limitados a la producción de los cultivos generalmente depende de la extracción, refinación e importación de estos nutrientes minerales desde grandes distancias, lo que eleva sus costos. El mejoramiento de los mercados y redes de distribución rurales de estos fertilizantes contribuiría a aliviar algunos problemas del agotamiento de nutrientes, aunque la dependencia de estos insumos de los precios del petróleo y las fluctuaciones del mercado, no garantizan su sostenibilidad a largo plazo. La fosforita representa una fuente de P no refinada y de baja calidad más o menos disponible en varias partes de los Andes y que promete restaurar los balances del P en la región (Lorion, 2004). Entre otras posibles fuentes de insumos nutricionales están los desechos periurbanos de origen residencial y comercial, pero estos dependen en gran medida de la proximidad de la finca a los centros poblados y de la infraestructura necesaria para recolectar y transportar estos materiales (Harris *et al.*, 2001). El transporte de largo alcance para estos recursos también podría resultar económicamente viable y en ciertas circunstancias puede ser muy ventajoso para corregir los desequilibrios de nutrientes, por lo que merece una consideración más detenida.

Dinámica y sincronización de los nutrientes a corto plazo

El enfoque de balance de nutrientes explicado anteriormente es un punto de partida fundamental para la intensificación agroecológica y el manejo de la fertilidad del suelo a largo plazo. Sin embargo,

además de mantenerlos en cantidades suficientes, los nutrientes también deben estar en formas disponibles para las plantas y en las épocas que éstas los necesitan. Por ejemplo, en el caso de los andosoles de los Andes del norte y en otros suelos que fijan el P (Figura 3), la sorción de P limita su disponibilidad, aun cuando los balances de P en un año dado sea muy positivo (Espinosa, 1991; Dahlgren *et al.*, 2004). La sorción de P puede ser irreversible, limitando la producción a menos que el manejo (residuos orgánicos, proximidad raíz/fosfatos y tiempos de aplicación de P) contrarreste la baja disponibilidad de P. La sincronización de la disponibilidad de nutrientes con la demanda de las plantas es, por tanto, fundamental para maximizar la productividad de los cultivos y para minimizar las pérdidas de nutrientes y las consiguientes consecuencias ambientales (Woomer y Swift, 1994; Cassman *et al.*, 2002). Los fertilizantes inorgánicos brindan la ventaja particular de aportar nutrientes que están inmediatamente disponibles para las plantas y, en teoría, permiten un control relativamente sencillo de la disponibilidad de nutrientes en el para respaldar el crecimiento de los cultivos. Sin embargo, las diversas limitaciones económicas y de manejo (esto es, mano de obra, fluctuación de costos, riesgo de daño a los cultivos asociado con las múltiples entradas a los campos) generalmente tienen como resultado aplicaciones inadecuadas de fertilizantes, desde el punto de vista de la fertilidad de suelos y nutrición de plantas. Muchas investigaciones realizadas a lo largo de los Andes han analizado el potencial de los fertilizantes sintéticos de aumentar la productividad agrícola en diversos sistemas de cultivo. Aunque las grandes aplicaciones de fertilizantes sintéticos podrían ser representativas de los campos comerciales de la región, es mucho menos común en la agricultura de los pequeños productores, que domina los altos Andes (Terrazas *et al.*, 1998; Caycho-Ronco *et al.*, 2009). A pesar del considerable énfasis puesto en la investigación de fertilizantes inorgánicos en las universidades regionales, pocos estudios han considerado los temas de la lixiviación y volatilización de los nutrientes relacionadas con aplicaciones ineficientes de fertilizantes (p. ej., Machado *et al.*, 2010). Las evidencias sugieren que, en ciertas circunstancias, la aplicación de fertilizantes podría exceder enormemente a la demanda de los cultivos, por ejemplo, en áreas más altas con

rendimientos potenciales bajos y donde los fertilizantes sintéticos son más recientes (NRC, 1989; Oswald, 2010). Por lo tanto, si bien los costos ambientales y económicos de la aplicación de los fertilizantes pueden ser elevados, aún son poco conocidos en las zonas alto-andinas.

Entre las fuentes de nutrientes orgánicos en los altos Andes están el estiércol tradicional, los residuos vegetales, así como diversas innovaciones, como residuos y abonos externos, compost y bioles (abonos líquidos fermentados). Muchas investigaciones se centran en estos insumos orgánicos de fertilización, y son recurrentes las comparaciones simples del rendimiento con los fertilizantes sintéticos (Aguilera, 2010; García, 2011). Los insumos orgánicos tienen ciertos aspectos que desafían el manejo de fertilidad de suelos. Por ejemplo, si se comparan con los fertilizantes inorgánicos, debido a su contenido nutricional más bajo, es necesario transportar y aplicar mayores cantidades. Además, la mineralización de los nutrientes vegetales provenientes de la materia orgánica, condición para su captación por las plantas, es a menudo más difícil de predecir ya que la cantidad y tiempos de liberación depende de varios factores, entre los cuales está la calidad de la materia orgánica, humedad, temperatura y los descomponedores del suelo (Lavelle *et al.*, 1993; Palm *et al.*, 2001). La calidad de recursos orgánicos (contenido nutricional y facilidad de descomposición) también tiende a ser más heterogénea y puede depender enormemente de la fuente del material y los tiempos de su recolección o aplicación. En consecuencia, se requiere de más trabajo y más conocimientos para manejar de manera efectiva los recursos orgánicos, de manera que la liberación de nutrientes se sincronice con el crecimiento de los cultivos. A pesar de estas potenciales desventajas, los recursos orgánicos constituyen la forma más importante de insumos nutricionales para la producción de cultivos en los altos de los Andes (Terrazas *et al.*, 1998; Caycho-Ronco *et al.*, 2009) y ofrecen varios beneficios clave a los agricultores. Primero, los recursos orgánicos generalmente son menos costosos y están más al alcance de los agricultores que las fuentes de nutrientes inorgánicos, especialmente en las zonas rurales. Adicionalmente, los pequeños agricultores andinos han desarrollado complejos conocimientos locales

que han sido bien adaptados al uso de abonos y residuos del barbecho, y que puede transferirse fácilmente a las innovaciones de insumos orgánicos. La aplicación de recursos orgánicos también contribuye al mantenimiento de la MOS en los sistemas de cultivos (Fernandes *et al.*, 1997), con implicaciones vitales para la estructura del suelo, almacenamiento y movimiento del agua, suministro y retención de nutrientes y la promoción de saludables comunidades biológicas del suelo (Craswell y Lefroy, 2001). Por último, generalmente liberan los nutrientes con mayor lentitud que los inorgánicos y a través del tiempo, lo cual podría reducir la susceptibilidad de los nutrientes a la pérdida comparados con los fertilizantes sintéticos (Kramer *et al.*, 2006).

Reconociendo las complejidades inherentes de las fuentes de nutrientes orgánicos, los investigadores han invertido considerables esfuerzos a clasificar y procesar estos materiales para simplificar su manejo, lograr una liberación más predecible de nutrientes y enriquecer estos materiales para reducir su volumen y acelerar la mineralización. Por ejemplo, Palm *et al.* (2001) propusieron un sistema de clasificación para los residuos vegetales y materiales orgánicos que usualmente se encuentran en regiones tropicales húmedas, que se basa en el contenido de N residual y en la presencia de compuestos recalcitrantes (polifenoles y lignina). Este sistema identifica cuatro clases de calidad de materia orgánica, con diferentes recomendaciones sobre la mejor manera de aplicar los residuos para lograr una liberación óptima de nutrientes. Aunque algunos estudios han inspeccionado la calidad de los recursos orgánicos disponibles en los Andes (Mahboubi *et al.*, 1997; Coûteaux *et al.*, 2008; Machado *et al.*, 2010), esa información es limitada y no ha sido adecuadamente traducida a recomendaciones específicas de manejo de los agroecosistemas andinos.

Procesar los materiales orgánicos antes de aplicarlos se ha vuelto una práctica común en todo el mundo, incluyendo los países altos andinos (Herbas, 2000; Felipe-Morales, 2002). El compostaje abarca una gran variedad de prácticas que consisten en mezclar materiales orgánicos de diferente calidad (p. ej., estiércol, residuos vegetales, desechos de cocina, cenizas, aserrín) y la

descomposición controlada de residuos para concentrar los nutrientes, retirar plagas y patógenos, homogeneizar materiales y formar un sustrato más estable, aunque rico en nutrientes para aplicarlo al suelo y estimular la actividad biológica (Misra *et al.*, 2003; Litterick *et al.*, 2004). Un compostaje adecuado también puede ayudar a prevenir pérdidas de nutrientes de recursos orgánicos de alta calidad (p. ej., orina y estiércol frescos), especialmente cuando los materiales se producen en un momento inapropiado para su aplicación en el campo. Otras formas de compostaje, como el compostaje por lombrices, dependen de que las lombrices de tierra epígeas descompongan los materiales orgánicos mientras los nutrientes se concentran y estabilizan en sus moldes. Aunque este proceso puede ser más intensivo a nivel de manejo, el resultado es cambios a suelos de alta calidad en un tiempo relativamente corto, por lo que en los últimos años ha recibido cada vez más atención, en parte, debido a los beneficiosos subproductos relacionados con la actividad de las lombrices de tierra (Blouin *et al.*, 2005; Cardoza, 2011). En los Andes también existen métodos anaerobios de compostaje para la producción de fertilizantes líquidos, bioles o jaracha (basados en plantas o estiércol, respectivamente) (Felipe-Morales, 2002; Caycho-Ronco *et al.*, 2009). Estos contienen nutrientes en formas más o menos disponibles y a menudo se aplican al follaje o al suelo, como medio de corregir rápidamente deficiencias menores de nutrientes en los cultivos. Los materiales orgánicos también pueden procesarse mediante procesos no biológicos, p. ej., la quema de residuos es una práctica común que tiene la ventaja de reducir biomasa, suprimir plagas y aumentar la disponibilidad de algunos elementos clave (p. ej., K), aunque también puede causar también pérdidas considerables de otros elementos (como N) y en general no se la aconseja. Una opción prometedora para los residuos lignocelulósicos de baja calidad (como la madera o la paja del trigo) es pirolizar los materiales en un ambiente de bajo oxígeno para producir biocarbón (biochar). La producción y la aplicación del biochar proporcionan algunos nutrientes directamente (Novak *et al.*, 2009), pero quizás es más importante por los beneficios indirectos que trae a la fertilidad del suelo, almacenamiento de C y funcionamiento biológico de los suelos (Chan *et al.*, 2007; Noguera *et al.*, 2010).

A pesar de las muchas investigaciones sobre la eficacia de los fertilizantes sintéticos y orgánicos en la producción de los cultivos andinos, relativamente pocos estudios han considerado la aplicación combinada de estos recursos o el manejo integral de la fertilidad de suelos (MIFS, Vanlauwe *et al.*, 2001). Este enfoque reconoce la importancia de los insumos de materia orgánica en la provisión de nutrientes, mantenimiento de la MOS y promoción de redes saludables de alimentos de suelos (Craswell and Lefroy, 2001; Moore *et al.*, 2004), pero también permite la aplicación estratégica de nutrientes inorgánicos para satisfacer la demanda nutricional en etapas críticas de crecimiento de cultivos (Figura 7). A la larga, esta estrategia les permite a los agricultores optimizar el uso de los recursos orgánicos localmente disponibles agregando cantidades relativamente pequeñas de nutrientes agrícolas importados. Aunque este enfoque ha sido promovido por varios investigadores en la región andina (Valente y Oliver, 1993; Sarmiento *et al.*, 2001), pocas pruebas de campo lo han abordado en forma adecuada en los Andes (p. ej., uso de controles apropiados, aditamentos de nutrientes equivalentes) y se desconoce su potencial.

Además de las consideraciones relativas a la calidad de los recursos nutricionales y a la dinámica de liberación de nutrientes, otros factores, como el clima, tipo de suelo y manejo, cumplen una función clave en la elección de las estrategias óptimas de manejo de nutrientes para un determinado agroecosistema. Bottner *et al.* (2006), por ejemplo, compararon la descomposición de los residuos de cultivos enterrados en dos ambientes andinos opuestos (los suelos del páramo de Venezuela frente a los suelos secos de la puna de Bolivia) y encontraron que, aunque los primeros tenían condiciones más calientes y más húmedas, la textura más fina y más ácida de los suelos del páramo conducían a un deterioro más lento y un mayor aporte de residuos a la MOS (Pansu *et al.*, 2007). Esto sugiere que el potencial rol de los residuos orgánicos para satisfacer la demanda de nutrientes en los cultivos difiere en ambos sistemas y podría ser muy importante para la productividad en los suelos más arenosos, más secos y con baja MOS del Altiplano. En respaldo a esta idea, Chivenge *et al.* (2010), quienes examinaron las pruebas de MIFS en el África subsahariana,

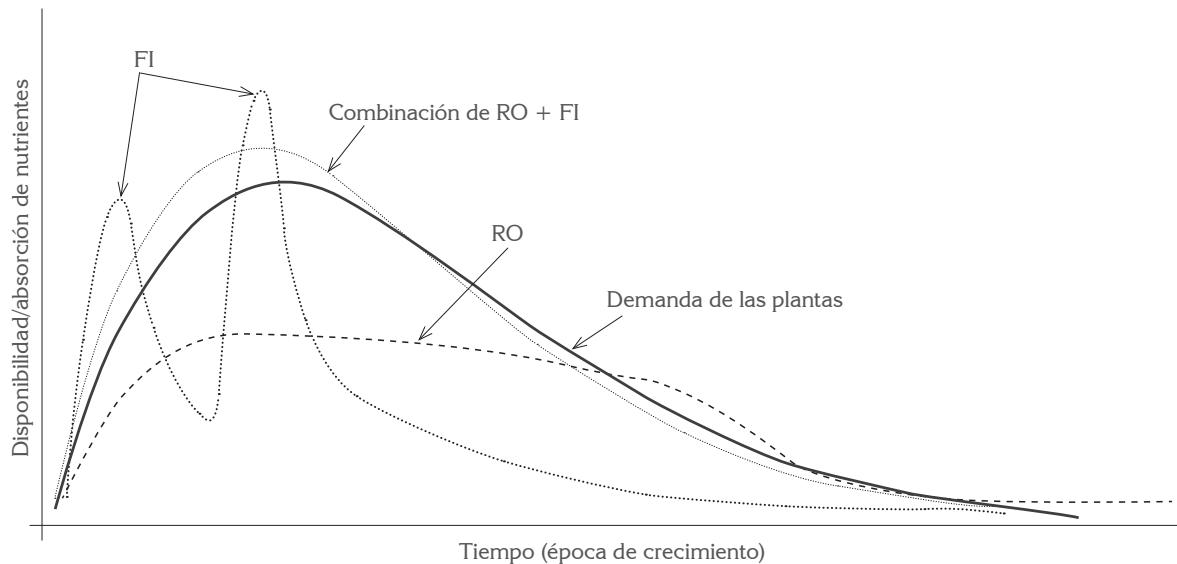


Figura 7. Curvas teóricas para la absorción y disponibilidad de nutrientes en las plantas bajo diferentes estrategias de fertilización (FI = fertilizante inorgánico; RO = recursos orgánicos). Las curvas de demanda de las plantas y de descomposición de materia orgánica representan lo que podría ocurrir durante una temporada de cultivo típica, para productos como el maíz o la papa. Los dos picos de FI representan dos fertilizaciones (en la siembra y al momento de demanda máxima del cultivo).

descubrieron que las añadiduras de residuos contribuían mucho más al rendimiento de los cultivos en los suelos de textura gruesa (al contrario de los de textura fina), y sugerían que añadiduras de materia orgánica podrían contribuir temporalmente a las funciones clave de la MOS (es decir, la capacidad de retener agua y nutrientes) en suelos arenosos de bajo contenido de MOS. Otro ejemplo proviene del sistema wachu rozado en los Andes del norte, en donde se invierte el suelo y se siembran las papas entre dos capas de yerba, una encima de la otra (Sherwood *et al.*, 1999). La materia orgánica en las capas de yerba empieza a descomponerse y aísla el cultivo de los andosoles ácidos que fijan el P, al tiempo que proporcionan una fuente de nutrientes y un ambiente ideal para el crecimiento de la papa. Este sistema es adecuado para los suelos de páramo ecuatorianos como medio para mejorar la disponibilidad de nutrientes, pero no sería el apropiado para otras áreas o tipos de suelo en los Andes. El gran número de posibilidades para tales interacciones entre el ambiente y el manejo recalca la necesidad de elaborar estrategias localmente adaptadas que hagan el mejor uso de los recursos nutricionales disponibles y manipulen estratégicamente el ambiente del suelo.

Ambiente físico-químico de los suelos

Aunque el concepto de fertilidad del suelo generalmente pone énfasis en la disponibilidad de los nutrientes para el crecimiento de plantas, las condiciones físicas y químicas del ambiente del suelo juegan un rol importante en la regulación de los procesos de nutrientes así como la capacidad de las raíces para explorar el suelo y asimilar los nutrientes. La condición física de los suelos se refiere a la estructura del suelo, es decir, a cómo se organizan y combinan las partículas individuales del suelo para formar agregados de suelo. La agregación de los suelos puede tener importantes impactos en varias propiedades clave del suelo. Por ejemplo, la agregación repercute directamente en funciones clave del suelo como la porosidad, aireación, almacenamiento de agua y movimiento del agua (Wu *et al.*, 1990); afecta también a la capacidad de las raíces de penetrar y explorar el volumen del suelo en busca de agua y de recursos nutricionales. La agregación del suelo también desempeña una función decisiva en la rotación de la MOS y en la regulación de las comunidades bióticas del suelo (Six *et al.*, 2002; Brussaard *et al.*, 2006). En muchos suelos, los agregados están estrechamente asociados con la materia orgánica, ya que los

agregados más grandes ($>50 \mu\text{m}$ de diámetro) generalmente se forman alrededor de los residuos orgánicos y/o se mantienen unidos mediante mucílago microbiano, las raíces muy finas o las hifas micóticas (Tisdall y Oades, 1982). Aunque la MOS es un factor esencial en la formación de la mayoría de suelos, los mecanismos de agregación varían según el tipo de suelo (Bronick y Lal, 2005). Por ejemplo, los carbonatos pueden dominar los procesos de agregación en los aridisoles, mientras que los complejos de Al/Fe-humus pueden ser más importantes en los andosoles (Dahlgren *et al.*, 2004; Bronick y Lal, 2005). Los ingenieros de ecosistema del suelo (por ej., lombrices de tierra y hormigas) son agentes clave de la agregación del suelo cuando hay condiciones favorables para su actividad (Lavelle *et al.*, 1997). La textura también tiene un papel en la agregación, pues los residuos orgánicos son relativamente más importantes para la agregación en suelos arenosos que aquellos en donde dominan las arcillas (Bronick y Lal, 2005). Aunque el manejo adecuado de la estructura del suelo es esencial para el crecimiento de cultivos, pocos estudios han considerado los efectos de la preparación y del manejo de suelos sobre la estructura del suelo en los Andes. Una excepción es el trabajo relativamente bien documentado sobre la influencia de los impactos del manejo en la agregación y la degradación en los suelos de cangahua (ceniza volcánica endurecida) del Ecuador. Esta investigación indica que los suelos cangahua tienen agregados muy inestables, altamente propensos a la formación de costras y a la erosión después del cultivo; y que finalmente se los debería dejar sin labrar y con cubierta vegetal permanente (Poulenard *et al.*, 2001; Buytaert *et al.*, 2002; Podwojewski y Germain, 2005). Aunque no es la regla para todos los suelos (por ej., suelos de cangahua), en general la estructura puede ser mejorada reduciendo la perturbación (por ej., la labranza) y con mayores aportes de materia orgánica. La poca información sobre la estructura del suelo de otras partes de los Andes sugiere que es necesario investigar más sobre el C del suelo y la dinámica de agregados para, a largo plazo, mejorar el manejo de la fertilidad del suelo de la región.

Quizás el ambiente químico del suelo ha recibido más atención (respecto a la fertilidad) en referencia a la capacidad de los suelos para mantener la disponibilidad de nutrientes y

contribuir a los procesos básicos de crecimiento de plantas. Aunque hay una serie de medidas químicas relevantes que influyen en la fertilidad del suelo, probablemente la más importante es el pH del suelo (acidez) (Figura 4), ya que afecta a muchos otros procesos químicos, biológicos y físicos. Por ejemplo, los suelos ácidos ($\text{pH} < 5$) pueden tener serios problemas de toxicidad de Al y de baja disponibilidad de nutrientes (entre ellos P, N, K y Ca). Además del pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es otro importante factor del suelo que se relaciona con su capacidad de mantener disponibles los nutrientes para las plantas; en las partes más secas del altiplano boliviano, la salinidad del suelo puede convertirse en una grave limitante para la productividad agrícola (Valente y Oliver, 1993). Aunque estos factores están estrechamente ligados a las características de los sitios (es decir, al tipo de suelo, al material de origen y al clima), el manejo puede en gran medida exacerbar o mejorar estas propiedades químicas. Por ejemplo, la labranza y la fertilización durante la etapa de cultivo en un sistema sectorial de barbecho en el páramo venezolano, demostraron que reducen el pH de los suelos, de por sí ácidos (Abadín *et al.*, 2002; Abreu *et al.*, 2009).</author><author>Llambí, L.D.</author><author>Sarmiento, L.</author></authors></contributors><titles><title>Sensitivity of soil restoration indicators during Páramo succession in the high tropical Andes: Chronosequence and permanent plot approaches</title><secondary-title>Restoration Ecology</secondary-title></titles><pages>619-628</pages><volume>17</volume><number>5</number><dates><year>2009</year></dates><urls></urls></record></Cite></EndNote>; y aunque el pH puede aumentar cuando los suelos vuelven al barbecho, podrían, por muchos años, no recuperarse al nivel que tenía antes del cultivo. El encalado (p. ej., aplicación de carbonato de calcio) es quizás el remedio prescrito con mayor frecuencia para elevar el pH de los suelos ácidos, pero las cantidades y costos requeridos pueden ser excesivos para la mayoría de los pequeños agricultores. Las adiciones de ceniza y materia orgánica también han probado reducir la acidez del suelo (Aguilera, 2010; García *et al.*, 2010) y, en ciertas circunstancias, podrían constituir una alternativa más asequible para los agricultores andinos. Se ha

probado que los aportes de materia orgánica aumentan la CIC (Oorts *et al.*, 2003; García *et al.*, 2010) y pueden mejorar significativamente otras propiedades físico-químicas del suelo como la agregación, capacidad de retención de agua y capacidad de amortiguación del suelo (Craswell and Lefroy, 2001; Kong *et al.*, 2005). El biochar ofrece muchos de los mismos beneficios de la materia orgánica, pero con impactos potencialmente más inmediatos y de mayor duración. Por ejemplo, se ha probado que el biochar aumenta el pH, la CIC y la capacidad de retención de agua del suelo (Chan *et al.*, 2007; Jha *et al.*, 2010; Karhu *et al.*, 2011) y que altera la distribución del tamaños de poros. lo que tiene múltiples impactos en el crecimiento de las plantas y en las comunidades biológicas del suelo (ver siguiente sección). Tal como en el caso de la estructura del suelo, las investigaciones sobre la caracterización y el manejo de los ambientes químicos del suelo son inexistentes en casi todos los Andes y merecen mayor énfasis en los esfuerzos investigativos del futuro.

Funcionamiento biológico de los suelos

Comprender y manejar los ciclos de nutrientes de suelos regulados por factores bióticos es fundamental para mantener la productividad de los sistemas agrícolas de los pequeños agricultores. Las comunidades microbianas y la fauna del suelo dependen a la larga, como fuente de energía y como hábitat, del carbono derivado de residuos vegetales, exudados de raíces y otras formas procesadas más estables de la MOS (Moore *et al.*, 2004). Al usar estos recursos, los organismos simbóticos y asociativos de la rizósfera pueden: 1) brindar acceso a las plantas a grupos de nutrientes que normalmente no están disponibles para ellas (p. ej., el N₂ atmosférico, fuentes recalcitrantes de P); 2) defender a las plantas contra plagas y enfermedades; y, 3) estimular el crecimiento de las plantas por medios hormonales u otros mecanismos fisiológicos. A continuación abordamos dos temas bien estudiados que enlazan la biología de suelos con la intensificación agroecológica en la región. Primero, el manejo adecuado de la materia orgánica por los pequeños productores es fundamental para las comunidades biológicas del suelo, puesto que la MOS es un sustrato clave para promover las redes alimentarias

del suelo y servicios ambientales conexos (Powlson *et al.*, 2011). Segundo, la inoculación del suelo con microorganismos, cuidadosamente seleccionados de entre grupos funcionales claves, para apalancar las mejoras hechas en los ciclos de nutrientes o en la sanidad vegetal, ofrece un medio prometedor y de bajo costo para mejorar el funcionamiento y la productividad del sistema. La esperanza (e hipótesis) es que el manejo mejorado de la MOS, junto con la introducción y/o promoción dirigidas de organismos benéficos, pueda aumentar de manera sostenible la productividad de las rotaciones de cultivos con inversiones relativamente bajas por parte de los agricultores.

En los suelos cultivados, las comunidades microbianas y de fauna reflejan la cantidad, calidad y diversidad de los aportes de C vegetal, así como la intensidad y frecuencia de las perturbaciones del suelo (Carney y Matson, 2005; Thies y Grossman, 2006). La intensificación productiva en los pequeños predios agrícolas a menudo conduce a una disminución en la diversidad de insumos derivados de residuos y a un incremento en la intensidad de la labranza, de modo que se reducen la abundancia y la diversidad de las comunidades del suelo y la MOS de la cual dependen (Postma-Blaauw *et al.*, 2010). Por ejemplo, en los sistemas de cultivo de maíz o trigo en las tierras altas mexicanas, se ha probado que la retención de residuos y reducción de labranza fomentan grandes poblaciones de bacterias benéficas, actinomicetos y bacterias pseudomonas fluorescentes (Govaerts *et al.*, 2008)i. En California, el manejo mejorado de residuos (mayor cantidad y diversidad de insumos) también ha demostrado incrementar la biomasa y la diversidad microbiana al compararlo con el manejo agrícola convencional (con pocos aportes de residuos) (Briar *et al.*, 2011). Además de la función directa de los exudados solubles desde las raíces, el C derivado de las raíces contribuye a la MOS y a la agregación del suelo y es un recurso clave para los microbios del suelo (Puget y Drinkwater, 2001; Kong y Six, 2010). Un examen más minucioso de las diferentes estrategias de manejo de residuos es particularmente importante en la región andina, en donde generalmente los residuos se retiran para el ganado; Sin embargo, poco se sabe sobre las consecuencias de esta práctica en el funcionamiento biológico del suelo.

A parte del manejo, los cambios temporales en el ciclo de barbecho en la región andina también afectan a la dinámica de las comunidades bióticas y ofrecen un punto de referencia para la diversidad funcional microbiana y de fauna que el barbecho debe proveer. Por ejemplo, en el Altiplano boliviano, tanto Sivila y Hervé (1999), como Sivila y Angulo (2006) encontraron cambios en las comunidades microbianas a lo largo de una cronosecuencia de los campos en barbecho, de manera que los recuentos de esporas micorrícicas aumentaron con la edad del barbecho y con los niveles de la MOS, pero decrecieron luego de las rotaciones de la quinua no-micorrícica y con la remoción de vegetación de arbustos de Baccharis.

Hoy es ampliamente conocida la sorprendente diversidad y gama de las funciones atribuidas a los microbios y a la fauna en la rizósfera de los cultivos, pero proviene de conocimientos anteriores sobre importantes simbiontes de plantas, como rizobios y micorizas, que han enseñado que los microbios son intermediarios en muchos de los procesos de los suelos que controlan el crecimiento de las plantas (Rodríguez *et al.*, 2006; Murphy *et al.*, 2007; Osorio-Vega, 2007). Las simbiosis entre las legumbres y rhizobium;bradyrhizobium y las asociaciones entre los actinomicetos Frankia y árboles, como la especie agroforestal *Alnus spp.*, actualmente dan cuenta de la mayoría del N fijado biológicamente en la tierra (Freiberg *et al.*, 1997). Entre las especies leguminosas presentes en los sistemas de cultivos andinos están el endémico chocho o tarwi andino (*Lupinus mutabilis*) simbiotizado por Bradyrhizobium lupini; la vicia, arveja y habas asociadas con Rhizobium leguminosarum bv. viciae; y la alfalfa y diversas especies endémicas e introducidas de trébol (*Trifolium spp.*). Otro simbionte bien estudiado son las micorrizas arbusculares (MA), prevalentes en las raíces de la mayoría de las especies cultivadas. Amplían el volumen de suelo explorado por la planta y facilitan el acceso al P y a los micronutrientes, especialmente en condiciones de suelos secos (Aroca y Ruiz-Lozano, 2009). En los Andes, la papa, maíz, cereales y leguminosas como *Vicia spp.*, hospedan las MA. Curiosamente, *L. mutabilis* y los cultivos de *Quenopodium* (quinua, kañawa, etc.) no albergan las MA. Otro simbionte potencialmente importante es Trichoderma, un género micótico conocido por inhibir patógenos de

las raíces (Lorito *et al.*, 2010) mediante toxinas y enzimas antimicóticas (ver: Verma *et al.*, 2007). También podrían contribuir otros modos de acción, como algunas en especies de Trichoderma que habitan la interfaz entre la corteza de la raíz y el suelo, y que actúan como simbiontes promotores del crecimiento de las plantas e inducen la resistencia a enfermedades en la planta huésped mediante señales químicas, y ocupan un nicho en la superficie de la raíz que desplaza a los patógenos (Vinale *et al.*, 2008). La Trichoderma también puede mejorar la absorción de nutrientes e inducir las respuestas positivas a la sequía y al estrés por plagas (Lorito *et al.*, 2010).

Cada vez más los Rhizobium, Trichoderma y las MA y se consideran parte de una clase de microbios promotores de crecimiento de plantas (MPCP) y que actúan, ya sea en la rizósfera o de modo endofítico – endósfera - para mejorar el crecimiento de las plantas por medio de la movilización de nutrientes poco disponibles, la acción hormonal (p. ej., síntesis de auxina), y/o la protección de la planta contra enfermedades y ataques de plagas (Martínez-Viveros *et al.*, 2010). Los modos de acción hormonal probablemente son importantes en el impacto de los MPCP en el desarrollo de los cultivos andinos. Por ejemplo, el ácido indolacético (AIA), una auxina que promueve el crecimiento de las plantas al afectar la elongación de las células apicales y estimular la ramificación de las raíces.. Oswald *et al.* (2010) hallaron que más de la mitad de las especies de *Bacillus* y *Actinomyces* encontradas en un sitio de Perú produjeron AIA in vitro y es posible que hayan mejorado el crecimiento de papa en un estudio con macetas. Otros microorganismos de rizósfera degradan el etileno, una hormona vegetal que impide el crecimiento de las plantas de manera significativa o persistente (Loon, 2007; Hayat *et al.*, 2010). Microbios que facilitan el acceso al P habitan en muchos suelos; entre ellos están los mineralizadores de fitato, que actúan sobre sustratos de P orgánico que a su vez forman una reserva sustancial de P en muchos suelos (Oberson *et al.*, 2006). Por su parte, los solubilizadores del P pueden disolver los fosfatos inorgánicos de calcio y los minerales de apatita, como la fosforita, empleando ácidos orgánicos y otros mecanismos (Sharma, 2003; Rodríguez *et al.*, 2006; Takeda y Knight, 2006). Además de colonizar la corteza de la

raíz (p. ej., rizobios y MA), los microorganismos endófitos colonizan otras partes de la planta, como los vasos del xilema, donde pueden favorecer el crecimiento de la planta en condiciones de estrés, incluyendo mayor tolerancia a la sequía y al estrés por sal (Hahn *et al.*, 2008; Compant *et al.*, 2010; Kane, 2011). También se debe anotar que a menudo hay una superposición de estas funciones en una sola especie de MPCP (p. ej., microbios que simultáneamente sintetizan auxina y solubilizan el P; Bashan y Bashan, 2010). A pesar de los adelantos logrados en la comprensión de las interacciones microbio-raíz, aún se desconoce la mayoría de los microorganismos que habitan la rizósfera y sus genes funcionales. Leveau (2007) sugirió, entonces, que la metagenómica del suelo, es decir, el intento de secuenciar directamente y derivar información funcional del ADN de toda la comunidad microbiana de una rizósfera o suelo particular, podría ayudar a explorar nuevas y aún desconocidas modalidades de acción de los MPCP. La metagenómica podría formar parte de una agenda básica de investigación en beneficio a largo plazo para los pequeños agricultores, a diferencia de los ensayos directos con microorganismos como inoculantes, tema que abordamos a continuación.

El interés por los inoculantes microbianos creció naturalmente a partir del conocimiento de los efectos benéficos de los microorganismos del suelo en los cultivos arriba indicados. No obstante, podría ser más difícil mejorar las comunidades benéficas para el suelo a través de la inoculación de las semillas o del suelo, de lo que sugieren los experimentos que prueban el efecto de una especie microbiana en un cultivo de interés (Benizri, 2001, Oswald *et al.* 2010). Los inóculos exitosos deberán exceder el impacto positivo de microbios similares que ya estaban en la rizósfera y, además, competir lo suficientemente bien como para poder permanecer ahí. Los resultados del rastreo in vitro, por ende, a menudo no están bien correlacionados con los ensayos de campo (Martínez-Viveros *et al.*, 2010; Oswald *et al.*, 2010). A pesar de estos retos, los inóculos microbianos han prometido buenos resultados en los predios de los Andes y en otros sistemas de pequeños agricultores. Para poder comprender en dónde podría contribuir positivamente a la intensificación agroecológica, el trabajo investigativo debe emplear una selección

rigurosa y estandarizada en las pruebas realizadas en las fincas, y crear hipótesis sobre el suelo y las condiciones de su manejo (p. ej., los suelos degradados) en donde los inoculantes tengan el mayor impacto, y en aquellos en donde sus efectos son redundantes o incoherentes (Oswald *et al.*, 2010).

La investigación realizada en los Andes con agentes inoculantes confirma la necesidad de seleccionar microorganismos eficaces y competitivos ecológicamente. Las diferencias en la eficacia de las cepas de rizobio en leguminosas andinas están documentadas mediante pruebas en la región (Lagacherie *et al.*, 1983; Barba *et al.*, 2000; Conde *et al.*, 2000). Aunque en general se cree que altos niveles de población de rizobios endémicos reducen el beneficio de la inoculación (Evans *et al.*, 1996), Mnasri *et al.*(2007) encontraron que una cepa competitiva de rizobio en fréjol podía desplazar las cepas nativas aun cuando éstas fueran abundantes. Los resultados obtenidos por Vanek (2010) en un sistema de cultivo de pequeños agricultores bolivianos sugieren que las tasas de fijación de N estarían más limitadas por el P disponible que por la falta de simbiontes eficaces de rizobio. Parece que en varias leguminosas comunes de los Andes las poblaciones de simbiontes se conservan mientras estos cultivos permanezcan en rotación (Meneses *et al.*, 2000), y que la inoculación continua podría no ser muy importante. Las investigaciones sobre el potencial de los inóculos de hongos MA también muestran el reto de mejorar los microorganismos endémicos; también apoya la idea de que los gradientes en fertilidad del suelo determinan el impacto de la MA en la nutrición de los cultivos. La simbiosis en micorrizas puede ser mutualista, neutras o parasitarias en su impacto con las plantas huéspedes (ver Tabla 1), dependiendo de las condiciones del suelo (p. ej., de la disponibilidad de P) y en la especie particular de MA (Moreno Díaz, 1988; Johnson, 2010). En experimentos de bajos niveles de P, que probaron solo el impacto de una cepa de MA, en general los cultivos se beneficiaron de la inoculación micorrícica, un beneficio que el cultivo puede ya estar recibiendo de un suelo biológicamente diverso. Por ejemplo, Davies *et al.*(2005) encontraron aumentos entre un 44 a 57% en materia seca total tras inoculación con MA, de una

variedad de papa peruana en un suelo estéril de bajo nivel de P. En cambio, los resultados de experimentos de campo con comunidades intactas de suelo fueron de mixtos a positivos (Tabla 1) porque la MA inoculante no garantiza una inversión favorable en C-asimilado al compararla con la MA nativa (Moreno Díaz, 1988; Rodríguez y Ortúño, 2007; Rodríguez *et al.*, 2010). La Trichoderma sigue siendo un inóculo atractivo porque por medio de la antibiosis y su capacidad de parasitar otros hongos es un competidor fuerte en la rizósfera, con lo que se aborda un reto clave para todo inóculo (Verma *et al.*, 2007; Schuster y Schmoll, 2010).

Ensayos realizados en Bolivia mostraron que la salud y vigor de los trasplantes de cebolla mejoraban al ser inoculados con *Trichoderma harzianum* (Medrano Echalar y Ortúño, 2007). En cuanto a otras investigaciones con inóculos realizadas hasta la fecha, los ensayos con *Trichoderma* a menudo se han enfocado en la producción de invernadero u hortícola; sin embargo, el trabajo en el futuro debe evaluar su efectividad en la rotación intensiva de cultivos pequeños, especialmente cuando la presión de las enfermedades del suelo es alta y cuando se esperan resultados positivos.

Cuadro 1. Ejemplo en la región andina de los impactos de la inoculación de micorriza arbuscular (MA) en cultivos estériles en invernaderos/viveros y en el campo en los que se inspecciona la micorriza. En este cuadro se da prioridad a las investigaciones de MA como microbio inoculador representativo debido a la suficiente disponibilidad de resultados publicados en la región.

Fuente	País	Cultivo	En testigo estéril/en el campo/ invernadero	Incremento de la colonización	Rendimiento o beneficio de la enfermedad (+/-0)	Interacción con otros insumos/tratamientos; comentarios
Davies <i>et al.</i> , 2005	Perú	papa	testigo estéril	+	+	Los cultivos mixtos del campo superan a <i>G. intraradices</i> .
Ortúño <i>et al.</i> , 2010	Bolivia	maíz	campo	sd	+	
Rodríguez y Ortúño 2007	Bolivia	cebolla	campo	+	+	Efecto positivo mayor al combinar con compost y abono de aves.
Rodríguez y Ortúño 2007	Bolivia	papa	campo	+	-	
Ibarra, 2008	Ecuador	pimiento	campo		+	
Orna, 2009	Ecuador	tomate	campo		+/0	Efecto aditivo de la inoculación de MA en la siembra y trasplante, y adición de P.
Moreno Díaz, 1988	Perú	papa	campo		0	
Medrano y Ortúño, 2007	Bolivia	plántulas de cebolla	invernadero	sd	+/0	Efecto positivo mayor al combinar con compostaje vermicular.
Arandia <i>et al.</i> , 2007	Bolivia	cebolla	invernadero	+	+	Impacto de micorriza mayor que la adición de fosforita o de vinagre de madera.
Ferrufino, 2006	Bolivia	palmito	vivero	+	+	
Urgiles, 2009	Ecuador	Especies arbóreas tropicales	vivero	+	+	Árboles tropicales, pero muestra la viabilidad de la micorriza de inoculación de en la raíz.
Moreno Díaz, 1988	Perú	papa	almácigo	ND	+	<i>G. fasciculatum</i> supera a las otras dos cepas.

Investigar los MPCP que mejoran el acceso de los cultivos al P es de particular interés en toda la región y el mundo (Barroso y Nahas, 2005; Chen *et al.*, 2006; Jorquera *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 2009; Keneni *et al.*, 2010), y sería especialmente útil en los suelos volcánicos fijadores de P (andosoles) en los Andes del norte. En Perú, Oswald *et al.* (2010) demostraron la actividad solubilizadora de P en cepas bacterianas, 44% de Azotobacter y 58% de Bacillus, aisladas de la rizósfera en un solo campo de papa, mientras que en un área de recolección del altiplano el 28% de los aislamientos bacterianos en quinua y 25% de las cepas de rizobios en habas tenían la capacidad de solubilizar el P (Ortuño, 2010). A pesar de la presencia aparentemente común de bacterias solubilizadoras de P en los Andes, su impacto en el crecimiento de los cultivos no siempre es claro. Mientras Faccini *et al.* (2007) encontraron que las bacterias solubilizadoras del P permitían obtener rendimientos de papa iguales aplicando la mitad del fertilizante de P, otros investigadores en los Andes del norte observaron poco impacto de estas bacterias en el crecimiento de los cultivos (Nustez and Acevedo, 2005; Rodríguez *et al.*, 2010). Los trabajos hechos anteriormente en la región se enfocaron principalmente en solubilizadores de formas inorgánicas de P; sin embargo, el uso prevalente del estiércol en los Andes indica que un mayor enfoque en la mineralización del P orgánico por los MPCP podría resultar productivo. Sorprendentemente, las bacterias que mineralizan y solubilizan el P pueden ser útiles, tanto ambientes bajos en P, como en ambientes de intensificación agrícola con fijación del P por medio de fertilizantes o abono (Chabot *et al.*, 1996).

Las bacterias que promueven el crecimiento de las plantas mediante actividad hormonal ofrecen un atisbo de fascinantes mecanismos de interacción entre microorganismos y plantas que pueden ser útiles en el campo. Por ejemplo, se halló que la inoculación con MPCP, que degradan el etileno, aumenta el rendimiento en arveja, tomate y pimiento en períodos de sequía al eliminar la señal de estrés que el etileno envía a las raíces y permitir una reanudación más rápida del crecimiento cuando mejoran las condiciones de humedad del suelo (Mayak *et al.*, 2004; Arshad *et al.*, 2008; Belimov *et al.*, 2009). Estos resultados sugieren que algunos microorganismos de suelo hacen de

mediadores en las señales de la planta al responder al estrés (Glick *et al.*, 2007) y son especialmente relevantes para los pequeños agricultores andinos en épocas de sequía.

Para los organismos inoculantes estudiados aquí, es necesario caracterizar mejor los dominios de las propiedades del suelo y del manejo en donde se garantiza la inoculación. Por ejemplo con hongos MA, una alta disponibilidad de P en el suelo haría redundante, o aun ineficiente, su inoculación en cultivos. Sin embargo, es probable que la intensificación agroecológica por los pequeños agricultores ocupe regímenes de fertilidad del suelo de baja a moderada, así como una mezcla de insumos de nutrientes orgánicos e inorgánicos. Aquí la MA podría ser muy adecuada para explorar las reservas disponibles de P con resultados positivos mutuos para los simbiontes (Douds *et al.*, 2007). En apoyo a esta idea, Mäder *et al.* (2011) hallaron mejoramientos sorprendentes de rendimientos de arroz en la India por el uso de MA y MPCP, cuando se usaron cepas aisladas de campos de baja fertilidad, con suelos degradados después de inundación. Por supuesto, en suelos altamente degradados podría no haber respuesta a la inoculación microbiana debido a una aireación deficiente o contenidos de C demasiado bajos como para posibilitar una función microbiana adecuada, por lo que previamente se deberían tomar otras medidas restauradoras (por ej., insumos de materia orgánica). Las investigaciones de los MPCP en los Andes podría obtener ventajas al aislar microbios en ambientes selectivos al desarrollo de características deseables y del empleo de enfoques críticos en prospección (Jorquera *et al.*, 2008; Oswald *et al.*, 2010). Para evitar fracasos costosos, estos incluyen pruebas de inoculantes en gradientes de fertilidad y degradación que permita establecer dónde estos tienen mayor impacto. Hay que anotar también que los MPCP son sumamente multifuncionales y que sus modos de acción en gran medida dependen de otros factores de la rizósfera (Martínez-Viveros *et al.*, 2010). Por consiguiente, producir un efecto inoculante consistente con estos microbios asociativos puede ser un todo un reto y las investigaciones con MPCP deben abordar las razones para efectos erráticos de microbios promisorios como inoculantes. Un concepto útil adaptado fácilmente de la patología de las

enfermedades radiculares transmitidas en el suelo es la receptividad del suelo y la supresión de microbios o simbiosis microbianas particulares. Estudios hechos por Oyarzun *et al.* (1998) y Herrera-Peraza *et al.* (2011) abordan este concepto y muestran cómo las técnicas estadísticas de multivariadas pueden relacionar la efectividad de los microbios con las propiedades bióticas y físico-químicas de los suelos y con su manejo, y ofrecen sugerencias prometedoras para futuras investigaciones.

Además de los efectos directos de la inoculación, las investigaciones se han enfocado en factores que catalizan o facilitan los impactos de los MPCP o de las MA nativas en el crecimiento de los cultivos. Por ejemplo, en el Perú Davies *et al.* (2005) demostraron que simples adiciones de la señal flavonoide formononetina detonaron una mayor esporulación del suelo con hongos nativos de la MA y que aumentaba el rendimiento de la papa. Vanek (2010) encontró que las leguminosas micorrízicas, en cultivos en los altos bolivianos, presentaban una tasa de captación de N:P mayor y mayor colonización de MA que en avena forrajera, lo cual sugiere que las leguminosas promueven una función mutualista en la rotación de cultivos. En los andosoles chilenos, Borie *et al.* (2010) encontraron que roca fosfórica parcialmente acidificada era particularmente adecuada para la absorción micorrízica, eludiendo la capacidad de fijación de P de estos suelos. Asimismo, el carbón derivado de la biomasa (biochar) es un medio para alterar el hábitat de los microbios de la rizósfera en formas que beneficien tanto a los cultivos como a los microbios. Los poros del biochar derivados de los vasos originales de materia vegetal, pueden ofrecer protección contra de la deshidratación y de la depredación de otros microbios y fauna del suelo. Pueden crear también cambios del pH que, para suelos ácidos y la mayoría de biochar darán origen a micrositios con un pH más neutro y por ello más favorable como hábitat bacteriano (Thies y Rillig, 2009). Al revisar los impactos de la aplicación de biochar en la MA, Warnock *et al.* (2007) documentaron respuestas que van de neutrales a muy positivas en la colonización micorrízica. Como posibles mecanismos para las relaciones MA-biochar, estos autores propusieron: la alteración local de las propiedades físico-químicas del suelo, efectos indirectos por medio del impacto sobre

otros microbios del suelo, la interferencia en las señales entre plantas y hongos; y la protección contra depredadores de hongos dentro del carbón. Además del biochar, las zeolitas, estructuras nanoporosas de silicatos de aluminio de composición química variada, tienen el potencial de aumentar el intercambio de cationes y la capacidad de retener agua de los suelos (Ramesh *et al.*, 2010). La combinación de un tamaño pequeño de poros y la capacidad de retener nutrientes pueden hacerlas especialmente activas en las transformaciones de nutrientes intermediados por microbios, que prolongan la disponibilidad de P, N y otros nutrientes, especialmente mediante la sorción de amonio y otros cationes (Flores Macías *et al.*, 2007; Ippolito *et al.*, 2011).

Además de ser una fuente de carbono y de nutrientes para sustentar a las redes tróficas de descomposición y mejorar las propiedades físico-químicas del suelo, el compost y el vermicompost también pueden aportar con inóculos microbianos benéficos que pueden suprimir competitivamente las enfermedades ligadas al suelo y de causar efectos similares a los de la inoculación con otros microbios de la rizósfera (Litterick *et al.*, 2004; Cardoza, 2011; Quilty y Cattle, 2011). Además, el compost y otros biomedios han sido probadoa como vehículos para microbios inoculantes en el suelo (Seneviratne *et al.*, 2011; Singhai *et al.*, 2011). Ocasionalmente se ha mezclado roca fosfórica u otros minerales con el compost para estimular su solubilización (Lange, 1994). De hecho, el compost puede concebirse como una versión concentrada del efecto que se desea lograr en todo el suelo, para mejorar el acceso de los cultivos a los nutrientes y proteger las raíces de los cultivos contra enfermedades. A pesar de algunos resultados prometedores del compost como promotor de inoculantes, su potencial podría ser limitado en las extensas fincas rurales de los pequeños agricultores de los Andes, donde la mano de obra para producir compost puede ser escasa y la materia prima empleada en su producción puede tener otros usos competitivos. Sin embargo, en áreas intensivas de producción de pequeños propietarios cercanas a las ciudades, en donde probablemente la materia prima puede estar más a mano, el compostaje como fuente integral de microbios benéficos y disponibilidad de nutrientes para cultivos podría ser muy prometedor.

El caso de compostaje muestra la necesidad de que las tecnologías de inoculación sean accesibles a los pequeños agricultores. Se debe considerar el costo y su acceso a nivel local, junto con la optimización técnica, para que estas tecnologías logren el máximo impacto entre los pequeños agricultores y es por ello que las investigaciones sobre los inóculos de la región andina a menudo incluyen análisis de costos económicos y ambientales, así como sus beneficios. Para evitar lo que Rosset y Altieri (1987) denominaron la amenaza de la “sustitución de importaciones” en agricultura sostenible de pequeños agricultores, los investigadores han mostrado resultados prometedores con métodos locales desarrollados en las fincas dirigidos a inocular cultivos con MA usando raíces infectadas de cultivos, que suelen dar mejores resultados que con inóculos comerciales (Douds *et al.*, 2007; Davies *et al.*, 2005; Mäder *et al.*, 2011). Este enfoque se adapta bien a las MA y al género *Rhizobium*, en donde los propágulos, como las esporas, están necesariamente asociados con las raíces, pero podría ser más difícil tratándose de hongos y bacterias de tipo asociativo que no presentan estructuras intra-radiculares. A pesar de ello, los enfoques de inoculación de un campo a otro conllevan riesgos de transmisión de agentes patógenos del suelo, un tema que deberá tratarse de manera muy seria debido a sus impactos potencialmente drásticos en los Andes.

Mientras que la función de las comunidades microbianas ha sido bien estudiada en los Andes, aún se desconoce la mayoría de impactos de la fauna del suelo en la región, a pesar del significativo efecto que causan en numerosos procesos clave del suelo en diversos ecosistemas del mundo. La fauna del suelo incluye un grupo variado de organismos que altera el funcionamiento del suelo de diversas maneras. Los invertebrados del suelo generalmente aumentan la disponibilidad de nutrientes de las siguientes maneras: 1) trituran los residuos de las plantas y aceleran los procesos de descomposición y la mineralización; y, 2) se alimentan de las bacterias y hongos del suelo, con lo que liberan los nutrientes incorporados a los tejidos microbianos (Lavelle y Spain, 2001). También se ha probado que mantener redes tróficas saludables en el suelo (fauna del suelo diversa y activa) controla los agentes patógenos de

las plantas y podría tener implicaciones importantes en el crecimiento de los cultivos (Blouin *et al.*, 2005; Sánchez-Moreno y Ferris, 2007). La macrofauna del suelo, en particular la representada por los ‘ingenieros’ del ecosistema (p. ej., lombrices de tierra, hormigas, termitas) puede alterar drásticamente las comunidades microbianas del suelo por sus efectos en la estructura del suelo, en el movimiento del agua, en la dinámica de los nutrientes y en la MOS (Lavelle *et al.*, 1997). Sus actividades pueden tener diversas implicaciones en el funcionamiento del suelo, pero en general han resultado ser beneficiosas para el crecimiento de las plantas (Brown *et al.*, 1999; Evans *et al.*, 2011). Los resultados preliminares sugieren que la macrofauna puede ser muy importante, al menos para ciertos agroecosistemas de los Andes. Por ejemplo, Tonneijck y Jongmans (2008) examinaron la bioestructura y la distribución de la MOS en los suelos del páramo del Ecuador y sacaron como conclusión que la bioturbación debida a las lombrices de tierra era un proceso fundamental porque regula la distribución vertical y rotación de la MOS en estos suelos. Los hallazgos de Morales y Sarmiento (2002) sugieren que las perturbaciones del suelo asociadas con los cultivos reducen la abundancia y diversidad de la macrofauna del suelo en el páramo venezolano. Aunque existen informes sobre la fauna de suelo para otras regiones (Righi y van der Hammen, 1996; Zurita, 1997), la información sobre los agroecosistemas en tierras altas es muy escasa. Dada la importancia mundial de la fauna del suelo y su potencial de ofrecer indicadores rápidos y de bajo costo acerca de la salud del suelo (Ferris *et al.*, 2001; Velasquez *et al.*, 2007), una mejor comprensión de su actividad y de los factores que afectan su abundancia en los agroecosistemas sigue siendo una brecha crítica para el manejo sostenible de la fertilidad del suelo en los Andes.

Fitomejoramiento para la intensificación agroecológica y el cambio climático

El fitomejoramiento de los cultivos andinos orientado a mejorar una amplia gama de rasgos deseables (p. ej., resistencia a las enfermedades, atributos de productos o eficiencia en el uso de nutrientes) es un tema lo bastante amplio como para merecer un capítulo aparte. Aquí nos hemos enfocado en los esfuerzos de investigación

relacionados con el fitomejoramiento para una mejor adaptación a dos tipos importantes de estrés: el edáfico y el climático, en especial el estrés por baja disponibilidad de nutrientes y por sequía. Ambos reducirán el rendimiento de los cultivos en los probables escenarios de cambio climático y degradación del suelo en la región. Reconocemos que la gran heterogeneidad ambiental y social que existe en los Andes limita la amplia aplicabilidad del fitomejoramiento convencional de cultivos como un enfoque de intensificación agroecológica en la región. Sin embargo, pensamos que mediante el fitomejoramiento, tanto a nivel local como regional, enfocado seriamente en la biodiversidad agrícola disponible, tratando de comprenderla, se podrían tener oportunidades importantes de mejorar la productividad y estabilidad de rendimiento de los cultivos.

Con pocas excepciones, que destacaremos más adelante, hay vacíos sustanciales en el fitomejoramiento y en la selección de los cultivos (nativos e introducidos) en las zonas alto-andinas, para un mejor desempeño bajo condiciones de estrés de nutrientes y sequía. Asimismo, el rango de variación en la eficiencia de adquisición de nutrientes o la resistencia a la sequía en las variedades nativas existentes, está mal documentado. Esta falta de perspectiva sobre la tolerancia al estrés de los cultivos de la región podría estar relacionada con factores que compiten por la atención de los mejoradores. Entre ellos destacamos: los altos requerimientos en recursos y conocimientos para reunir y conservar importantes colecciones de agrobiodiversidad (p. ej., papa y otros tubérculos andinos, quinua); el énfasis en la calidad del forraje; en características de calidad para mercado o en resistencia a enfermedades y plagas, las cuales son más fáciles de seleccionar en las estaciones experimentales (Sciarascia Mugnozza *et al.*, 1987); por último, una inclinación de los mejoradores hacia los agricultores más adinerados, que tienen mayor acceso a los insumos de fertilidad y al riego. No obstante, una encuesta hecha en 2006 a programas bolivianos de fitomejoramiento, reveló un interés sustancial en el mejoramiento del estrés abiótico, así como una ausencia de preparación técnica adecuada del personal local para emprender en nuevos enfoques del mejoramiento (Gabriel, 2006), lo que sugiere que hay un gran potencial para nuevos programas

de mejoramiento. Los bancos locales de germoplasma y la disponibilidad de recursos para el mejoramiento en los centros del CGIAR brindan una extraordinaria oportunidad tanto para caracterizar los genotipos existentes respecto a su adaptabilidad a un bajo suministro de nutrientes y al estrés hídrico, como para seleccionar nuevos genotipos en ambientes de estrés a través de gradientes de fertilidad y/o de degradación del suelo. Hay que señalar también que la falta de atención al fitomejoramiento de los cultivos andinos refleja el estado de orfandad de estas especies a nivel mundial, en comparación con otros cultivos (por ej., maíz, soya, arroz).

A excepción de los suelos del Altiplano, que han sido caracterizados por sus limitaciones de C y N, los valles andinos y, en particular, los andosoles de los Andes del norte presentan limitación de P (Valente y Oliver, 1993; Dahlgren *et al.*, 2004; Cárdenas *et al.*, 2008). El reto que plantea el P del suelo en los Andes es su disponibilidad, más que la provisión en sí, lo que sugiere que mejorar la capacidad de captación de P en cultivos forrajeros sería una estrategia viable en la región. Si bien en los agroecosistemas andinos la limitación en N también es importante para cultivos no leguminosos (lo que ha promovido el interés en el uso eficiente del N en cultivos como la papa; Errebbi *et al.*, 1999; ZebARTH *et al.*, 2008), pensamos que estas deficiencias de N pueden ser abordadas más fácilmente mediante el manejo (p. ej., mejorando la incorporación de legumbres, ver secciones i, vi) y no ameritan tratarse más aquí.

Las sustanciales inversiones hechas en fitomejoramiento han mejorado la capacidad de captación de P en el maíz, fréjol y soya cultivados en zonas bajas tropicales con bajo P (Zhu *et al.*, 2005; Beebe *et al.*, 2006; Ramaekers *et al.*, 2010). Un elemento transferible de ese trabajo es el concepto de que las características fenotípicas visibles de las raíces, como longitud de pelos vellos radicales, número de raíces basales, formación de parénquima y superficialidad de la raíz (gravitropismo de la raíz basal), indican la capacidad de captación de P y pueden usarse para seleccionar rápidamente genotipos promisorios para pruebas bajo diferentes niveles de disponibilidad de P (Beebe *et al.*, 2006; Lynch, 2007; Ao *et al.*, 2010). Otras características, como

la exudación de ácidos orgánicos, son también importantes para movilizar el P no disponible y se sabe que se presentan en las habas y en el chocho o tarwi andino (Hocking y Jeffery, 2004; Pearse *et al.*, 2006). Los investigadores también han enfocado en mecanismos de tolerancia en plantas a la toxicidad por aluminio en suelos meteorizados de las tierras tropicales bajas (Kochian *et al.*, 2005; Beebe *et al.*, 2009), fenómeno menos prevalente en las tierras altas de los trópicos, pero que pueden ser una limitación importante al crecimiento de las plantas en los Andosoles de los Andes del norte (Dahlgren *et al.*, 2004). La conexión entre las características de la raíz y su capacidad de captar P brinda un punto de entrada lógico para evaluar las variedades existente y mejorar el acceso al P de cultivos andinos como chochos o maíz.

Desde el inicio del trabajo de fitomejoramiento para P en el fréjol común, se compararon las variedades nativas de varios puntos geográficos respecto a su capacidad de captar P (Beebe *et al.*, 1997). Este proceso podría proporcionar un marco para pruebas de germoplasma tanto para leguminosas andinas, quinua, papa y maíz, ya recolectadas por los mejoradores andinos, así como accesiones de los cultivos de fuera de la región. Las variedades nativas seleccionadas por los agricultores en áreas de baja fertilidad podrían desde ya tener característica prometedora en capacidad de captación de P; sin embargo, poco se sabe sobre la forma en que los agricultores han seleccionado las variedades nativas actuales para adaptarlas a un clima cambiante y al estrés climáticos. La conservación *in situ* de variedades existentes tolerantes al estrés podría ser un complemento útil en los enfoques de fitomejoramiento. Sin embargo, los cruzamientos y la selección basados en esta caracterización serían otra contribución importante de los mejoradores que estaría dirigida a los gradientes de fertilidad en ambientes manejados por los agricultores de subsistencia en la región.

Según sugieren Noguera *et al.* (2011) en su estudio de interacciones de los cultivares con el manejo de lombrices de tierra y biochar, será importante que los esfuerzos regionales de fitomejoramiento cambien su enfoque de las estrategias de la revolución verde, que pusieron a prueba rendimientos en regímenes de fertilidad con

alta solubilidad, a un mejoramiento que interactúe más efectivamente con el marco de intensificación agroecológica, por ej., las simbiosis microbianas, los impactos directos y de sucesión de plantas en la rizósfera, el biochar y la fauna del suelo (ver las secciones anteriores sobre el tema; Drinkwater y Snapp, 2007). Por ejemplo, Snoek *et al.* (2003) revisaron los enfoques de fitomejoramiento en fréjol para mejorar la simbiosis con rizobios y la fijación de N. Por su parte, Boomsma y Vyn (2008) examinaron los mecanismos por los que el mejoramiento del maíz para obtener una simbiosis más efectiva con las MA podría promover una mejor tolerancia a la sequía. Se podría mejorar las variedades de los cultivos andinos para lograr un mejor desempeño con micorrizas u otras fuentes de nutrientes orgánicos, o incluso para mejorar el control biológico de plagas de suelo (Degenhardt *et al.*, 2009). Se debe reconocer, en los sistemas de los pequeños agricultores, la retroalimentación agroecológica positiva de la capacidad captar P y otras características de soporte al estrés abiótico. Por ejemplo, Henry *et al.* (2009) demostraron que, lejos de hurgar el suelo en búsqueda de P adicional, las variedades de fréjol y soya, que movilizan P no disponible, cubrieron mejor el suelo en un ambiente de ladera de pequeños agricultores, reduciendo las pérdidas de P por erosión, creando un mejor un balance de P que las variedades no eficientes en P.

La impredecibilidad de extremos climáticos, incluyendo heladas y sequías estacionales, siempre ha amenazado a la productividad de los cultivos y a la seguridad alimentaria en los Andes. Sin embargo, se pronostica que los aumentos en la temperatura promedio en las alturas debido al cambio climático, excederán el promedio mundial (Bradley, 2004), de este modo que la evapotranspiración podría sobrepasar cada vez más la capacidad del suelo de abastecer agua y, por lo tanto, el estrés por sequía podría aumentar. Ya hay evidencia de que los agricultores perciben un mayor riesgo de sequía y están adaptando sus combinaciones de cultivos al cambio climático, por ejemplo, aumentando la proporción de cebada precoz respecto a otros cultivos en el Altiplano boliviano para evitar el fracaso del cultivo (A. Bonifacio, pers. com.). El fitomejoramiento de plantas para resistencia a la sequía y estabilidad del rendimiento, para afrontar el cambio climático, es

ya un esfuerzo mundial y se puede ganar mucho si se vinculara a los mejoradores de los cultivos andinos a estos esfuerzos globales (Khan *et al.*, 2010). Hay que notar también que las características de las plantas objetivo de la intensificación agroecológica y cambio climático probablemente también son apropiadas para posibles alteraciones a los suelos de los agroecosistemas andinos (tema de la sección 1), ya que posiblemente la mayoría de las consecuencias del cambio climático en el suelo se presentarán por medio de alteraciones en la cubierta vegetal.

Entre los mecanismos de los cultivos para resistir la sequía están los siguientes: escape o precocidad ante la sequía; evitar la deshidratación (conservación del agua en la planta o formas de ingresar más agua en el perfil del suelo); y, tolerancia a la sequía (Khan *et al.*, 2010). La resistencia a la sequía incluye mecanismos fisiológicos de las plantas que mejoran los rendimientos bajo estrés, como enraizamiento profundo y ajuste osmótico de las células de la planta que permiten que la fotosíntesis y otros procesos metabólicos para mantener la productividad de la planta aun en condiciones de estrés por sequía (Vos y Oyarzun, 1987, 1988, Chaves *et al.*, 2003; Blum, 2005). Los fitomejoradores y fisiólogos de cultivos han dilucidado estas y otras características que brindan resistencia a la sequía a nivel fisiológico (Cattivelli *et al.*, 2008), y están empezando a manipular estas características por medio de fitomejoramiento con marcadores y otros enfoques moleculares (Miklas *et al.*, 2006; Araus *et al.*, 2008). Los métodos de fitomejoramiento para resistencia fisiológica a la sequía se aplican en muchas especies cultivadas y pueden ser útiles en la región andina. No obstante, hay que reconocer que los mecanismos de tolerancia a la sequía, como el ajuste osmótico, han tenido poco éxito para explicar la estabilidad de rendimiento en épocas de sequía, en comparación con los mecanismos que evitan el estrés por sequía por medio del tamaño de la planta, su precocidad o la arquitectura de las raíces para captar más agua.

Varios estudios en la región andina y en otros lugares han examinado las diferencias de resistencia a la sequía entre los genotipos de los cultivos andinos. Siddique *et al.* (2001) ensayaron

una gran variedad de leguminosas de tipo mediterráneo y dedujeron que una precocidad floración precoz y formación de las vainas (escape a la sequía) fue la característica predominante que incrementó el rendimiento en bajos niveles de precipitación. Estudios realizados con habas sugieren que la resistencia a la sequía y una mejor recuperación luego de ésta se deben más al cierre estomático y a la conservación del agua dentro de la planta que al ajuste osmótico (Amede *et al.*, 1999; Sau y Minguez, 2000; Khan *et al.*, 2010). Análogo a las características morfológicas de la raíz usadas para seleccionar por capacidad de captación de P, Khan *et al.* (2007) sugerieron varios parámetros fisiológicos promisorios de las habas como criterios de selección para resistencia a la sequía. La fisiología de la sequía no ha sido mayormente estudiada en *L. mutabilis* (ver Carvalho *et al.*, 2004), pero una investigación realizada en Australia con algunas variedades del lupino del Viejo Mundo mostró que el rendimiento en estrés por sequía se relacionaba más con la precocidad y la rapidez de llenado de vainas y granos que con el ajuste osmótico de las células (French y Buirschell, 2005; Palta *et al.*, 2007). En el caso de la quinua, la tolerancia a la sequía, heladas y salinidad están entre los objetivos de un mapeo de vinculación genética, así como la colaboración de científicos bolivianos y estadounidenses para el fitomejoramiento asistido por marcadores (Maughan *et al.*, 2004; Maughan *et al.*, 2009). Otros investigadores han argumentado que una mayor captación de agua en el perfil del suelo (p. ej., el enraizamiento profundo observado en *L. mutabilis*), y el uso efectivo de esa agua en productividad en planta son más importantes en condiciones de estrés por sequía, que solamente enfocar en fotosíntesis por unidad de agua. Por su parte, en Bolivia, Tourneaux *et al.* (2003a; 2003b) examinaron seis variedades de papa bajo estrés por sequía durante la tuberización y sugirieron que las diferencias de rendimiento no estaban correlacionadas con parámetros fisiológicos sino que, en variedades sensibles, se debían a un área foliar reducida y a la incapacidad de translocar carbohidratos a los tubérculos.

Al margen de los mecanismos de tolerancia o evasión a sequía, los enfoques para el fitomejoramiento en condiciones de estrés por sequía en los sistemas agrícolas de secano, como

aquellos en los Andes, recientemente han hecho énfasis en la importancia de seleccionar los ambientes para el fitomejoramiento. La selección de variedades en ambientes con un tipo particular de estrés por sequía, incluyendo la sincronización del estrés en el ciclo de vida de la planta, es importante para tener éxito en el mejoramiento en tolerancia a la sequía (Ceccarelli *et al.*, 1991). Por ejemplo, la papa es altamente sensible a la sequía durante la tuberización (DallaCosta *et al.*, 1997); en el maíz, los esfuerzos del mejoramiento para tolerancia a la sequía se concentra en las etapas de florecimiento y de llenado del grano (Banziger *et al.*, 2006); las habas son altamente sensibles a la sequía en la fase de inicio de formación de vainas y en la primera fase del llenado del grano (Khan *et al.*, 2010). Ceccarelli *et al.* (1991) argumentaron que las situaciones de estrés impredecibles en muchas fincas de pequeños agricultores significaba que se debía seleccionar como un todo una serie de características de resistencia a la sequía; esta opinión ha promovido una estrategia evolutiva de fitomejoramiento con la participación de los agricultores, que es de interés para el trabajo de fitomejoramiento en los Andes (Ceccarelli *et al.*, 2010). No obstante, aún es razonable escoger las fases más vulnerables de crecimiento del cultivo a un estrés determinado como la primera prioridad en el mejoramiento al estrés, con el fin de fomentar la comprensión de la mecánica de la resistencia al estrés; y, además, porque es probable que las variedades que resisten el estrés por sequía durante fases vulnerables responderán mejor en los años promedio a la restricción de agua.

Los fitomejoradores dedicados a seleccionar tolerancias al estrés en ensayos multiple-ambientes, han desarrollado experiencia en diseño eficiente e interpretación sofisticada de estos ensayos, que a menudo presentan retos en la separación de genotipos por interacciones ambientales (Settimela *et al.*, 2005; Banziger *et al.*, 2006; Bucheyeki *et al.*, 2008). Un concepto básico y transferible de estos trabajos es que los ensayos de variedades realizados en ambientes diversos pueden agruparse por “mega-ambientes”, que abarcan tipos de suelo, climas y agroecosistemas similares (Settimela *et al.*, 2005), dentro de los cuales, en el ensayo, hay otras fuentes de variación (p. ej., fertilidad y la textura del suelo, estrés por sequía), que ofrecen gradientes significativos para comparar el desempeño de las

variedades. Un esquema de clasificación de los ambientes andinos y otros ambientes de fitomejoramiento para pequeños agricultores en el mundo, resumiría las semejanzas y diferencias entre los climas andinos y climas mediterráneos similares o de tierras altas de otros lugares (p. ej., África del este o sur de Asia). Esta estrategia podría proveer de germoplasma útil al fitomejoramiento en los Andes. El uso de modelos de cultivos partiendo del desempeño de diferentes genotipos podría ser una herramienta útil de predicción para evaluar los impactos a través de ambientes. Por ejemplo, Condori *et al.* (2010) usaron un modelaje de cultivo con validación experimental en varios ambientes a lo largo de los Andes para evaluar el desempeño de las principales variedades de papa. Este trabajo demostró que los modelos de crecimiento de cultivos servirían para predecir el desempeño y utilidad de los cultivares de papa y la papa amarga con una amplia gama de características, con datos meteorológicos y una serie de situaciones de riesgo a heladas. Además, modelaje también puede aplicarse para hacer una valoración rápida de nuevas variedades de cultivos tolerantes al estrés a lo largo de los gradientes de lluvia y temperatura de los Andes; y para generar hipótesis y diseños de investigación para ensayos en múltiples ambientes.

Un enfoque muy diferente del fitomejoramiento orientado a la sostenibilidad, que debe ser ajustado cuidadosamente a las rotaciones en la región andina, es el desarrollo de cereales perennes como los que se están probando en Estados Unidos y en Australia. Estos cereales podrían reducir drásticamente la erosión y mejorar la estructura del suelo, el uso del agua de la precipitación fluctuante, así como los beneficios derivados de los procesos de la rizósfera (Cox *et al.*, 2002; Bell *et al.*, 2010).

Por último, reiteramos la importancia de los esfuerzo para recolectar y preservar en la región la diversidad genética de la papa, quinua, chocho o tarwi y otros cultivos andinos; así como subrayar que, para que estos recursos tengan su máxima utilidad para enfrentar situaciones de estrés abiótico, estos esfuerzos deben ir más allá que ser un almacén del patrimonio agrícola. Los bancos de germoplasma andinos (al igual que los de otros lugares) deben ser escrutados y usados

recurrentemente en mejoramiento y demás esfuerzos para generar nuevas opciones de variedades resistentes al estrés para los pequeños agricultores en vistas de la variabilidad y el cambio climático.

Organización espacial y temporal de fincas

Las secciones anteriores se han centrado en diversas tecnologías basadas en insumos y opciones de manejo que prometen progresos para mejorar la fertilidad del suelo, la productividad y la estabilidad de rendimiento en los Andes. Sin embargo, la mayoría de estas tecnologías ha sido considerada de forma aislada, y se ha pasado por alto la forma cómo podrían ser integradas las prácticas agrícolas para transferir los beneficios generales los pequeños agricultores. La integración espacial y temporal de las prácticas agrícolas en múltiples niveles juega un papel fundamental en la optimización de la productividad de los agroecosistemas y de los servicios ambientales. Por ejemplo, la integración temporal de los cultivos y ganado a nivel de la parcela es una práctica generalizada y muy exitosa, que se observa en los sistemas sectoriales de barbecho en los Andes (Pestalozzi, 2000; Molinillo y Monasterio, 2006). Estos sistemas normalmente incluyen fertilización y cultivo intensivo (de papa) durante 1 a 2 años, seguidas de cultivos de granos o legumbres durante 1 a 3 años; para luego, generalmente, dar paso a un período en barbecho (3 a 15 años), aunque a menudo usado para pastoreo comunal. La secuencia exacta de los cultivos incluidos y el manejo general varía considerablemente a lo largo de los Andes (Orlove y Godoy, 1986). El período de cultivo proporciona la mayor parte del producto, mientras que los componentes del barbecho o descanso tienen el doble propósito de proveer forraje para la producción animal y de recuperar la reserva de nutrientes, las funciones hidrológicas y las comunidades biológicas del suelo (Sivila de Cary y Hervé, 1994; Sarmiento, 2000; Sarmiento y Bottner, 2002). La combinación de estas dos fases en una misma parcela del campo genera mayor productividad que cualquiera de las prácticas aisladas. Igualmente, transferencia de estiércol desde los pastizales a los cultivos representa otra forma común de integración espacial del ganado con los sistemas de cultivo a escala de la finca

(Giller *et al.*, 2006; Caycho-Ronco *et al.*, 2009), que mejora la productividad general al reubicar nutrientes y materia orgánica a donde más se les necesita. A pesar de que la integración de las estrategias de producción agrícola puede ser común en los Andes, aún se pueden mejorar las cosas. Más aún, cada vez es más necesario reforzar estos conceptos, ya que la intensificación agrícola (esto es, períodos menores en barbecho y uso de agroquímicos) perturba el equilibrio y los beneficios asociados con prácticas integradoras de vieja data (Mayer, 1979; Claverías, 1994).

En los Andes, tanto en los sistemas basados en barbecho, como en los de cultivos continuo, la rotación de cultivos es la forma de diversificación temporal más utilizada a escala de parcela (Tapia, 1994; Caycho-Ronco *et al.*, 2009). La rotación de cultivos (que incluye cultivos de cobertura) puede brindar beneficios claves para el control de plagas y enfermedades, para el uso mejorado de nutrientes y en restauración del suelo (Lieberman y Dyck, 1993; Snapp *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2008), y es por ello una herramienta indispensable para el manejo sostenible. Varios cultivos (p. ej., *Brassica* sp., *Crotalaria* sp.) son incluidos en las rotaciones, específicamente, por sus efectos de supresión de plagas (Kirkegaard y Sarwar, 1998; Wang *et al.*, 2002). Sin embargo, las rotaciones menos estratégicas de cultivos comunes de diferentes familias de plantas pueden también ayudar a romper los ciclos de las plagas, puesto que, en esto las rotaciones más diversas han probado ser más eficaces (Miller *et al.*, 2006). Incluso rotaciones simples de maíz y soya han superado al monocultivo de cualquiera de estas especies (Crookston *et al.*, 1991), aunque los mecanismos no siempre son claros. A pesar de que existen algunas investigaciones en rotación, gran parte del trabajo se ha centrado en el efecto residual del fertilizante para cultivos sembrados después de papa altamente fertilizada (Condori *et al.*, 1997). La investigación hecha por Nieto-Cabrera *et al.* (1997) en Ecuador, para estudiar específicamente el rol de la secuencia de cultivos, reveló que la producción de papa y quinua aumenta significativamente después de sembrar *L. mutabilis*, presumiblemente debido a los aportes adicionales de N asociado con la leguminosa. Otros beneficios se han observado con habas en los sistemas de papa en Bolivia, donde se ha sugerido que la aplicación de residuos

es una herramienta valiosa para el manejo de nematodos parásitos de plantas (Iriarte *et al.*, 1999).

Un área prometedora para una mejor integración espacial a nivel de parcela es la implementación de policultivos o cultivos intercalados. En ciertos casos, combinar muchas especies dentro del mismo campo puede complicar su manejo, pero puede incrementar el rendimiento general gracias a un aumento de la complementariedad del uso de los recursos entre especies (Fornara y Tilman, 2008). Por ejemplo, en China, Li *et al.* (2007) encontraron sistemas de cultivo intercalado de maíz-haba que producían más de lo que cualquiera de las dos especies rendía en monocultivo debido a diferencias en profundidad de raíces, en épocas de captación de nutrientes (competencia reducida), así como a una mejor disponibilidad de P por la producción de ácidos orgánicos en las raíces de las habas (facilitación). En este mismo sistema de cultivo, el aumento de la competencia en N por maíz forzó al haba a fijar más N de fuentes atmosféricas, aumentando así el N total en el sistema (Li *et al.*, 2009). Tal como en la rotación de cultivos, una mayor diversificación espacial en agricultura andina podría aliviar problemas de pestes, debido a incrementos en la depredación/parasitismo de plagas y una menor densidad de los recursos (Gianoli *et al.*, 2006; Poveda *et al.*, 2008). A pesar de ofrecer un claro potencial en cultivos, los beneficios del intercalado se han demostrado en varios tipos de ecosistemas y parecen ser especialmente adecuados para los sistemas de pastoreo (Hector *et al.*, 1999; Oberson *et al.*, 1999; Fornara y Tilman, 2008). Estas prácticas podrían implementarse más fácilmente en periodo sin cultivos (pastizales naturales) en los sistemas sectoriales de barbecho, cuando los requisitos de manejo son mínimos y los riesgos para el agricultor relativamente bajos. Sin embargo, también hay un gran potencial de rotaciones más intensificadas de cultivos-pastizales. La idea barbechos y pastizales mejorados para los Andes (en donde la composición de especies es manejada intencionalmente) ya ha sido sugerida (Sarmiento *et al.*, 2001; Barrios *et al.*, 2005; García, 2011), aunque con un enfoque principal en leguminosas. Otros investigadores han sugerido combinaciones de leguminosas y gramíneas como una opción

para maximizar la fijación de N y la productividad de producción forrajera (Bentley *et al.*, 2007; Bartl *et al.*, 2009). Tales combinaciones podrían incorporar tanto especies exóticas bien adaptadas a los climas locales (por ej., tolerantes al frío, capaces de producir semilla antes de que llegue la época seca (Wheeler *et al.*, 1999), como especies nativas que ayuden a reducir la inversión de los agricultores y asegurar la supervivencia (Bartl *et al.*, 2009; Nezomba *et al.*, 2010). Además, los barbechos mejorados (con variedades óptimas y combinaciones de especies), junto con fertilización estratégica (en particular, adiciones de P), podrían mejorar enormemente la fijación de N, la producción de forraje y la estabilización de la MOS, que a la larga aceleraría la recuperación del funcionamiento del suelo y las reservas de nutrientes.

Otra forma de mejorar la integración espacial, tanto a nivel de parcela como de finca, es por medio de prácticas agroforestales. Aunque el potencial para el crecimiento de árboles en algunas partes de los Andes (esto es, regiones muy secas y/o tierras muy altas) puede ser bajo, la evidencia sugiere que en grandes áreas alto-andinas, los árboles pudieron haber sido mucho más comunes que en la actualidad (Chepstow-Lusty y Winfield, 2000; Hansen, 2002); y de que el potencial para las tecnologías agroforestales podría ser mayor de lo que muchas veces se reconoce (Reynel y Felipe-Morales, 1990; Mahboubi *et al.*, 1997; Cotler y Maass, 1999). Por ejemplo, Mahboubi *et al.* (1997) compararon la supervivencia de especies consideradas aptas en el altiplano boliviano y encontraron que varias (como la nativa Buddleja coriacea) toleraban las condiciones ambientales en alturas hasta de 4200 m, y que un gran número de especies arbóreas eran apropiadas para elevaciones menores. También sugirieron que los residuos obtenidos de estos árboles (excepto de Eucalyptus sp.) podrían aportar valiosos nutrientes para mejorar el crecimiento de los cultivos. Las comparaciones entre especies plantadas en hileras en contornos cerca de Cochabamba, Bolivia, sugieren que hay especies leñosas pueden crecer y, además, brindar un control efectivo de la erosión (Sims *et al.*, 1999). Asimismo, se ha sugerido la incorporación de leguminosas (en particular, especies leñosas), en barreras vivas de gramíneas en contorno, como un medio eficaz para mejorar

la fertilidad del suelo, el control rápido de la erosión, así como reducir la competencia de las plantas por los recursos (Sims y Rodríguez, 2001; Mutegi *et al.*, 2008). Junto con setos en contornos, entre otras opciones para integrar especies leñosas en los agroecosistemas están los bancos forrajeros, lotes de madera, sistemas de ‘corte y lleve’ y/o barreras cortavientos en los bordes de los campos (Reynel y Felipe-Morales, 1990; Young, 1997), así como también árboles entremezclados en el campo –una estrategia altamente exitosa en laderas de menor altura usada en el sistema agroforestal Quesungual, en Honduras (Hellin *et al.*, 1999; Fonte *et al.*, 2010). Finalmente, la incorporación de árboles en el paisaje tiene un gran potencial en la provisión de leña, forraje complementarios, y enmiendas a la fertilización del suelo (Barrios *et al.*, 2005); a la vez que aporta con servicios clave al ecosistema (por ej., control de erosión, mitigación del cambio climático, dinámica del agua mejorada) y mejora la biodiversidad de la región (Antle *et al.*, 2007; Otero y Onaindiam, 2009; Smukler *et al.*, 2010). Hay que considerar, sin embargo, que al aplicar las tecnologías agroforestales propuestas se debe tratar de minimizar los posibles efectos negativos de los árboles, tales como el aumento de competencia con los cultivos por luz, agua y nutrientes, la mayor necesidad de mano de obra, y la expansión de plagas de cultivos (por ej., aves). Basados en la relativa escasez de materiales encontrados en nuestra prospección de literatura, las investigaciones futuras deben aún explorar en profundidad el potencial completo de las opciones arbóreas en los Andes. A pesar de que la flexibilidad de las prácticas agroforestales en la zona alto andina es quizá más limitada que en zonas bajas, tienen un gran potencial y las futuras investigaciones deben abordar estas posibilidades.

Al tratar la organización espacial de las fincas, la heterogeneidad del suelo a menudo representa un importante reto para el manejo de la fertilidad del suelo. Los agroecosistemas andinos con frecuencia tienen una topografía extrema y diversa que puede generar fuertes gradientes de fertilidad, en cierto modo predecibles, en el paisaje, (Buytaert *et al.*, 2007). No obstante, los gradientes de fertilidad también se generan por factores antropogénicos a nivel de fincas, en donde, en general, se encuentra un mayor estatus nutricional en el suelo cercano a los hogares (Tittonell *et al.*,

2005; Vanek, 2010). En los sistemas agrícolas de las tierras altas de África Oriental, Vanlauwe *et al.* (2006) sugirieron que los campos más alejados de la vivienda de los agricultores debieran recibir mayor cantidad de nutrientes, ya que es probable que estos respondan mejor a las adiciones de fertilizantes. Sin embargo, en regiones más montañosas, como en sitios remotos de los Andes, estos campos pueden presentar mayores pendientes y/o sitios más pedregosos, donde el suelo no tiene el mismo potencial de rendimiento que en lugares más planos de las cercanías; y mayores aplicaciones de nutrientes podrían tener mayor riesgo de pérdida por la erosión (Vanek, 2010). En cualquiera de estas situaciones, se podría utilizar diferentes estrategias de manejo de la fertilidad del suelo que reflejen insumos diferenciales en mano de obra asociados con parcelas cercanas versus lejanas. Por ejemplo, en los Andes, tal vez sería mejor aplicar el abono y compost elaborados cerca de la vivienda rural, en los lotes colindantes para minimizar los esfuerzos de transporte. Por otro lado, en lotes más distantes, especialmente aquellos más propensos a la erosión, para evitar el transporte y a fin de generar una cubierta vegetal del suelo e insumos materia orgánica *in situ*, se puede realizar cultivos de cobertura o un barbecho mejorado, junto con aplicaciones estratégicas de fertilizantes. Tales gradientes de fertilidad son igualmente importantes, y quizás más manejables, a pequeña escala. Por ejemplo en Ecuador, Dercon *et al.* (2006), demostraron que la erosión dentro de barreras vivas en contorno, generaban gradientes de MOS, P y textura, tales que, la fertilidad era más baja en la parte superior de las pendientes y más alta en el fondo, donde las barreras desaceleraban la escorrentía favoreciendo la deposición del suelo. El rendimiento de los cultivos dentro de las terrazas variaba significativamente, con diferencias de hasta cuatro veces para el crecimiento de trigo en la parte superior con respecto al fondo, dentro de una sola terraza. Concluyeron de que el control de la erosión es decisivo para desacelerar la formación de tales gradientes. Sin embargo, también podría ser necesario mejorar el manejo de materia orgánica (con abono o residuos de plantas) en las partes superiores de la terraza para restaurar la MOS y la capacidad de esos suelos de proveer y retener los nutrientes.

La organización a mayor escala es importante para optimizar la eficiencia del manejo de la finca y asegurar diversas funciones del ecosistema, tanto a nivel de la finca como del paisaje. Aunque el clima, la topografía y el tipo de suelo determinan en gran medida dónde se colocan diferentes elementos de cultivos y el ganado, es probable que haya espacio para organizar mejor las fincas y los paisajes con miras a incrementar la eficiencia de la finca, la producción de los servicios del ecosistema y reducir la mano de obra. Por ejemplo, en los Andes se ha observado un manejo activo del paisaje, en el cual los agricultores dispersan estratégicamente sus campos de cultivo como forma de distribuir los riesgos y mejorar la estabilidad de cosecha y de rendimientos (Goland, 1993). Al mismo tiempo, el ordenamiento físico de los cultivos y de otros componentes agrícolas puede influir enormemente y de diversas maneras en funciones menos obvias del agroecosistema. El mantenimiento de la biodiversidad y de los servicios de polinización probablemente constituye el caso más claro del rol de la organización del paisaje en la provisión de servicios del agroecosistema. Los polinizadores, que son esenciales en la producción de numerosos cultivos en todo el mundo (Klein *et al.*, 2007), entre ellos, varios cultivos importantes de los Andes (p. ej., cebollas, habas, chocho o tarwi andino), están enormemente influenciados por la estructura y la

composición del paisaje (Ricketts *et al.*, 2008). Los agentes de control de pestes son también influenciados por el paisaje (Bianchi *et al.*, 2006), aunque a menudo en formas que contradicen la intuición (Parsa *et al.*, 2011). Quizás más importante para la fertilidad del suelo, es que la diversidad del paisaje puede influir la biodiversidad y distribución de la fauna del suelo. Por ejemplo, los parches de vegetación nativa pueden constituir reservorios o refugios para lombrices de tierra de los lotes agrícolas adyacentes y así mantener su diversidad, abundancia y actividad en los lotes cultivados (Marichal, 2011). La forma de manejo de los atributos a nivel de finca puede impactar a los servicios del ecosistema, como almacenamiento de C, pérdidas de N y control de erosión (Robertson y Swinton, 2005; Smukler *et al.*, 2010). En los análisis de estos patrones espaciales y temporales, los análisis de SIG y geoespaciales han ampliado radicalmente las formas cómo los investigadores interpretan el funcionamiento de los sistemas de cultivo de los pequeños agricultores (p. ej., Parsa *et al.*, 2011). Además, existe la promesa de desarrollar el SIG como una forma de comunicar los principios locales de manejo de suelo y cultivos, elaborados alrededor de la organización espacial y temporal de las fincas, entre los pequeños agricultores, investigadores y profesionales en desarrollo.

Consideraciones Adicionales sobre las Intervenciones en la Fertilidad del Suelo

Necesidad de incorporar los factores co-limítantes al crecimiento de cultivos

Si bien la disponibilidad de nutrientes, las condiciones óptimas del suelo a nivel físico, químico y biológico y los cultivares apropiados son fundamentales para la productividad de un agroecosistema, estos factores, por sí solos, no son suficientes para garantizar altos rendimientos de los cultivos. Como se mencionó anteriormente, el agua es una limitación crítica en gran parte de los Andes, en particular en los agroecosistemas de temporal del Altiplano. Las tecnologías que recomendamos en el presente documento para mejorar los balances de nutrientes, por lo tanto, deben considerar los impactos a las dinámicas del agua en suelo y cultivos. Por ejemplo, el uso de barreras vivas para controlar la erosión, la fijación de N y/o la producción de forraje pueden desarrollar una competencia por el agua y, en último término, hacer afectar el rendimiento de los cultivos (Deren et al., 2006; Pansak et al., 2007). Mayores aportes de materia orgánica podrían mejorar la disponibilidad de nutrientes y la actividad de la fauna del suelo, lo que beneficiaría la infiltración y almacenamiento de agua (Capowiez et al., 2009). Además del agua, otros factores co-limítantes son la luz, temperatura, plagas y enfermedades. Las tecnologías basadas en el mulch que funcionan bien en sitios tropicales secos de menor altura (Erenstein, 2003; Fonte et al., 2010), podrían no ser apropiadas para sitios más altos y fríos, en donde una capa de residuos podría inhibir el crecimiento al mantener temperaturas del suelo más bajas (M. Scurrah, pers. com.). Los factores asociados a plagas y enfermedades requieren de consideraciones aún más complejas respecto a las prácticas de fertilidad del suelo, ya que sus respuestas a cambios ambientales son menos predecibles y a menudo difíciles de controlar. Aunque hay indicaciones de que una mejor fertilidad del suelo y funcionamiento biológico

mejoran la resistencia de las plantas a las plagas (Blouin et al., 2005; Bennet y Bever, 2007; Thamer et al., 2011), varias prácticas de manejo podrían agravar el problema de plagas (Conklin et al., 2002; Alyokhin et al., 2005; Parsa, 2010). Aunque la importancia relativa de cada uno de estos factores co-limítantes depende del contexto ambiental y del manejo, al elaborar opciones agroecológicas para mejorar la fertilidad del suelo es esencial considerar todos los factores.

Herramientas para la evaluación y manejo de la fertilidad del suelo

El manejo adecuado de la fertilidad del suelo requiere conocimientos, tanto acerca del actual potencial de un suelo para sostener el crecimiento de cultivos, así como de las tendencias generales de la calidad del suelo en el tiempo. En vista de que los análisis estándar de laboratorio son lentos, costosos y difíciles de interpretar, es necesario elaborar medidas alternativas de fertilidad del suelo que sean precisas, de bajo costo, relativamente rápidas y que puedan realizadas *in situ* por agricultores y/o técnicos locales. Aunque desde hace mucho tiempo los agricultores de muchas regiones han empleado indicadores elaborados localmente (p. ej., color del suelo, textura, plantas o comunidades vegetales asociadas) para evaluar el estado de fertilidad de los suelos (Desbiez et al., 2004; Karlton et al., 2011), herramientas adicionales podrían ayudar a los agricultores a adaptarse a las cambiantes condiciones ambientales y a las nuevas tecnologías de manejo, a la vez que les proporcionarían diagnósticos más precisos de las deficiencias del suelo y de las intervenciones de manejo requeridas. Se ha propuesto una serie de pruebas de campo, como aquellas centradas en la MOS biológicamente activa (Weil et al., 2003), o aquellas que evalúan una serie de propiedades simples del suelo (por ej., infiltración, estructura, pH, N disponible (Ditzler y Tugel, 2002). Sin embargo, no se han realizado

pruebas similares para los agroecosistemas andinos; y es necesario investigar más para adaptar los indicadores de fertilidad del suelo ya existentes o elaborar otros nuevos. Velásquez *et al.* (2007) han propuesto una estrategia que puede ser útil para elaborar indicadores que se ajusten a cada región. En ella se evalúa primeramente una lista exhaustiva de mediciones biológicas, químicas y físicas del suelo (empleando una combinación de mediciones de campo y de laboratorio) y luego se las relaciona con variables medibles en el campo que explican mejor la variabilidad en estos parámetros.

Integración de las necesidades y conocimientos locales a la investigación de la fertilidad del suelo

Desde hace mucho tiempo, la adopción limitada de las nuevas tecnologías agrícolas ha sido un desafío para los científicos y los profesionales del desarrollo que trabajan para refinar y convalidar estas tecnologías; esta falta de adopción a menudo se considera un obstáculo serio para mejorar los medios de vida de las comunidades rurales (Ashby *et al.*, 1997). Algunos investigadores han examinado la forma en que los costos de implementación, la falta de compensación a corto plazo, la tenencia inestable de la tierra o el acceso a la información pueden obstaculizar tal adopción (Tenge *et al.*, 2004; Bayard *et al.*, 2006). Aunque estas limitaciones económicas y de información a la adopción sin duda tienen una función, los científicos que estudian la extensión y el desarrollo rural sugieren que la adopción o adaptación a nuevas tecnologías exógenas tendrán éxito solamente cuando se preste mayor atención a las actuales estructuras de conocimiento y necesidades percibidas de los agricultores, así como a los procesos de aprendizaje e innovación en las comunidades rurales (Bentley, 1989; Deugd *et al.*, 1998; Paredes, 2010). Como se mencionó anteriormente, muchas comunidades agrícolas de

los Andes se benefician de una larga historia de conocimientos agrícolas y a menudo cuentan con una comprensión íntima y compleja de su tierra (p. ej., Sandor y Furbee, 1996). A pesar de este atributo, a veces parece que existe una desconexión general entre las necesidades de los agricultores y los objetivos de los investigadores (Horton, 1983). Esto puede conducir a tasas bajas de adopción y, además, sugiere la necesidad de una mayor participación de los agricultores en la elaboración de nuevas estrategias de manejo (Barrios y Trejo, 2003; Altieri, 2004; Bentley *et al.*, 2007). Aunque una mayor interacción con los agricultores es fundamental, estos no siempre son capaces de expresar sus necesidades dentro del sistema de conocimientos usado por los investigadores (Bentley *et al.*, 2007). Por consiguiente, el aprendizaje mutuo y la participación en el proceso de investigación son críticos para el desarrollo de estrategias de intensificación agroecológica relevantes y con altas probabilidades de aceptación por los agricultores (Ashby *et al.*, 1997; Winklerprins, 1999). Igualmente, la sola participación de los agricultores, en sí, podría no ser suficiente para elaborar tecnologías exitosas. Existe una clara necesidad de elaborar estrategias flexibles que permitan a los agricultores comprender mejor los mecanismos detrás de las nuevas tecnologías, para ajustarlos a las necesidades locales y adaptarlos al cambio veloz en las actuales condiciones socioeconómicas y ambientales (Bentley *et al.*, 2007). Las nuevas tecnologías deben tener en cuenta la dinámica de la comunidad y los procesos locales de toma de decisiones, así como la política y las estructuras políticas regionales. Finalmente, la integración de los conocimientos, potencialidades y necesidades locales al proceso de investigación es fundamental para el desarrollo de tecnologías en fertilidad del suelo, que sean prácticas, que tengan altas probabilidades de ser adoptadas y de lograr un impacto regional.

Conclusiones y Recomendaciones

Panorama de la intensificación agroecológica en el contexto andino

Si bien la región andina enfrentará desafíos muy importantes en los próximos años, posee varias características únicas que podrían permitir una intensificación agroecológica exitosa y el mejoramiento de los medios de vida rurales. Como se mencionó anteriormente, la región está dotada de una gran diversidad de cultivos nativos y ha demostrado un fuerte interés en mantener las variedades locales y las técnicas de manejo indígenas (Brush *et al.*, 1995). Además, en los Andes, muchos de los agroecosistemas de los pequeños agricultores ya presentan una diversidad espacial y temporal considerables, complejas rotaciones de cultivos (o secuencias de barbecho) y mezclas de diversos cultivos, lo que sugiere que los agricultores están familiarizado con principios clave de la sostenibilidad y por ello son quizás más flexibles en sus estrategias de manejo agrícola. Tales cualidades, combinadas con conocimientos locales bien desarrollados, tienen un potencial que facilitará la innovación y mejorará la adaptación a las nuevas condiciones. A pesar de sus atributos, la región enfrenta muchos desafíos y la necesidad de un cambio es evidente. Si bien la creciente confianza en los insumos agroquímicos y en las tecnologías de la 'revolución verde' representa una alternativa a las prácticas tradicionales que han tenido lugar en otras partes, esta ruta podría no ser ni económica ni ecológicamente viable en las montañas andinas debido a la fragilidad relativa de los suelos y paisajes, al menor potencial de rendimiento en altura y los escasos recursos financieros de los agricultores rurales. Modificar la definición clásica del éxito agrícola de corto plazo basado en productividad, podría permitirnos elaborar estrategias de desarrollo más apropiadas para la región. El éxito de una intervención en particular no sólo debe considerar el rendimiento y retornos económico a corto plazo, sino también la estabilidad del rendimiento a largo plazo, la

capacidad ecológica para adaptarse y los impactos ambientales de una práctica determinada. Si se tienen en cuenta estos factores, la intensificación agroecológica, tal como se la explica aquí, tiene el potencial de mejorar significativamente la productividad y la estabilidad de la agricultura andina.

Recomendaciones a donantes y a organizaciones públicas de investigación y políticas

Criterios y razones del cambio propuesto por las recomendaciones

Después de revisar la bibliografía existente en fertilidad del suelo en la región andina y sobre enfoques agroecológicos en otras regiones del mundo, procedimos a definir varias áreas prioritarias de investigación para diferentes zonas edáficas de los Andes. Se anexa una lista más larga de opciones de investigación dentro de diversos enfoques de fertilidad del suelo considerados en esta revisión; en la Tabla 2 se evalúa esta lista ampliada desde el punto de vista de la escala relativa, tipo de inversión y plazo para el retorno de la inversión. Como punto de partida, enmarcamos nuestras recomendaciones dentro de un conjunto de supuestos y principios generales que, en nuestro ver, ayudará a interpretar y evaluar el éxito de estas recomendaciones:

1. Las investigaciones deben contribuir a mejorar los medios de vida de los agricultores. Suponemos que incrementos ecológicamente sostenible en productividad de cultivos, así como suelos que fomenten la capacidad para adaptarse a situaciones de estrés, como sequías, son el principal objetivo de la investigación en fertilidad de suelo. Esto es particularmente cierto en los Andes, donde la producción de subsistencia, cada vez más

Tabla 2. Áreas prioritarias de inversión dirigidas a mejorar y/o mantener la fertilidad y la productividad del suelo en los agroecosistemas alto-andinos. Las categorías propuestas se basan en el potencial global de mejorar los medios de vida de los agricultores en cuatro tipos amplios de suelo/topografía, el costo del agricultor (mano de obra y tiempo), el nivel de inversión necesaria investigaciones y el tiempo de retorno de la inversión.

Área de inversión	Asuntos principales abordados	Potencial de la intervención para mejorar los medios de vida de los agricultores (por tipo de suelo/topografía)*				Inversión del agricultor	Inversión de la investigación	Tiempo de retorno de la inversión
		Andosoles	Altiplano	Laderas	Valles de montañas			
Estructuras de conservación del suelo	Erosión	M	M	A	B	A	M	medio
Labranza	Erosión, agotamiento	A	M	M	B	M	M	corto
Manejo mejorado de la MOS/integración de los fijadores de N	Erosión, agotamiento de la MOS, balance de nutrientes agrarios	M	A	A	M	M	M	corto-medio
Agroforestal	Agotamiento de la MOS, balance de nutrientes del predio agrícola, etc.	M	A	A	B	A	M	medio
En enlaces de reciclaje agrícolas y periurbanos	Balance de nutrientes agrícolas	M	A	M	M	M	B	corto-medio
Procesamiento de materia orgánica (ej: compost, biochar)	Nutrición de cultivos, función del suelo	B	M	M	B	M	M	corto
Combinación de fertilizante y recursos orgánicos (MIFoS)	Nutrición de cultivos, balance de nutrientes agrícolas	M	M	M	B	M	M	corto
Inóculos microbianos	Función del suelo, nutrición de cultivos	A	M	M	M	B	B	medio
Investigación de biología del suelo	Función del suelo, nutrición de cultivos	M	B	M	A	B	B	medio
Fitomejoramiento para la adquisición de nutrientes	Nutrición de cultivos	A	M	M	B	B	M	medio-largo
Fitomejoramiento para resistencia a la sequía/heladas	Supervivencia del cultivo	M	A	A	B	B	M	medio-largo
Organización de la finca	Todos los anteriores	M	M	M	M	M	M	medio
Investigación básica de suelos y agricola de largo plazo	Todos los anteriores	M	M	M	B	B	A	medio-largo

* La diversidad de microambientes y de condiciones dentro de estas áreas amplias sugiere que las categorías pueden variar mucho dentro de cada área.

- vulnerable al estrés, es decisiva para la disponibilidad de alimentos para los pequeños agricultores empobrecidos. Las investigaciones en fertilidad también puede apoyar el trabajo de científicos sociales y geógrafos dirigido a definir los patrones espaciales en el manejo de agroecosistemas, desigualdades sociales, potenciales intervenciones en las cadenas de valor, etc., y procesos que definen los modos de vida de los pequeños agricultores por medio del acceso a activos agrícolas productivos.
2. Los agricultores andinos habitan en agroecosistemas frágiles que tradicionalmente fueron manejados con sistemas de cultivo de baja intensidad; y ciertamente, hay límites para la intensificación en estos sistemas, incluso por medios agroecológicos. Garantizar la prestación de los servicios ecosistémicos para los futuros agricultores y co-definir los límites del manejo sostenible es una función importante de los científicos y profesionales del desarrollo.
3. Nuestras recomendaciones y las acciones de los financieros, científicos, profesionales del desarrollo y los agricultores deben definir claramente el dominio de la investigación (p. ej., investigación aplicada o básica, con compensación a corto o largo plazo) y responder a experiencias investigativas anteriores en un área determinada. Por ejemplo, en todo el mundo, los métodos de conservación del suelo en los sistemas en pequeña agricultura de ladera han recibido mucha atención de investigadores y de los esfuerzos en extensión. El primer paso, por tanto, no es reinventar la rueda, sino considerar cuidadosamente la eficacia técnica y enfoques que más probablemente adoptarán los agricultores. En contraste, en el área de la biología de la rizósfera aún se necesita mucha investigación básica y aplicada, así como pruebas de campo sobre cómo los inóculos microbianos o el manejo de la biota del suelo, con insumos orgánicos, pueden mejorar la productividad y capacidad para adaptarse de los suelos degradados.
4. La investigación financiada por donantes externos puede ayudar a promover la coordinación en investigación entre las organizaciones de la región; y también a iniciar

evaluaciones a largo plazo de enfoques agroecológicos prometedores en el contexto de pequeños agricultores. Debido al valor de la coordinación regional y de los estudios a mayor plazo, varios de los temas de investigación expuestos aquí se extienden a las cuatro zonas de suelo anteriormente propuestas (Figura 2); en especial aquellos en manejo integrado de la fertilidad, con énfasis en biología de suelo, fitomejoramiento orientado a objetivos de estrés abiótico y análisis de paisaje o de rotación en sistemas de cultivo. En nuestra visión acerca de la función integral que pueden desempeñar las organizaciones externas también subyace nuestro llamado por mayores inversiones en una evaluación a largo plazo de innovaciones en el manejo del suelo y esfuerzos por compartir información en toda la región mediante la modalidad de comunidades de práctica y proyectos de investigación transversal.

Recomendaciones para cuatro zonas edáficas de los Andes

Es esencial que las recomendaciones para las investigaciones sobre la fertilidad del suelo, para apoyar a los medios de vida de los pequeños agricultores alto-andinos, respondan a la heterogeneidad de los ambientes de los suelos y de las zonas ecológicas en producción. Por ejemplo, el Altiplano, las laderas de los valles y los suelos volcánicos de la región tienen diferentes potenciales productivos, necesidades de conservación y restricciones. Las variaciones en el material madre del suelo, la topografía, las precipitaciones, la intensidad del manejo de suelos, así como el tamaño del mercado y el acceso a él, crean una enorme variedad de situaciones que parecerían complicar la coherencia de las recomendaciones para la región. No obstante, estos factores varían de manera sistemática en toda la región, o que permite elaborar un esquema relativamente sencillo de recomendaciones según los cuatro amplios ambientes edáficos (ver mapa en la Figura 4): 1) los andosoles sobre la ceniza volcánica de los Andes del norte; 2) una gran variedad de ambientes edáficos de ladera con una mineralogía sedimentaria y mixta, que ocupa la mayor parte de la región; 3) los suelos del Altiplano

en el sur; y, 4) amplias franjas de suelos aluviales de fondo de valles, que varían mucho en importancia según la pendiente de la topografía local y el acceso de los pequeños agricultores a dichos suelos. Además, al formular las recomendaciones para estos ambientes, hay que tener en cuenta los gradientes ecológicos, de manejo y de mercado. Por ejemplo, desde hace mucho tiempo las zonas elevadas han sido manejadas por las comunidades andinas para diversificar la producción y el riesgo. Las diferentes zonas de elevación obligan a los investigadores andinos a apuntar a una gama más amplia de climas, que permita aprovechar la gran diversidad de investigaciones hechas en otras regiones (incluyendo climas templados y mediterráneos). Otro ejemplo es el hecho de que la precipitación restringe más la productividad de cultivos y pastizales en el sector sur de los Andes que en el sector norte (Figura 1A), de modo que las rotaciones tradicionales generalmente son más extensivas allí. Por ello, la intensificación conlleva riesgos adicionales a la sostenibilidad en las laderas del sur y en algunas áreas del Altiplano. Los mercados para la producción de los pequeños agricultores son otro factor de estratificación. Los mercados locales para la producción agroecológica de los pequeños agricultores andinos tienen un mayor potencial para estimular la innovación en agricultura en las zonas cercanas a las áreas urbanas, mientras que el impulso de mercado en innovación podría ser menos intenso en zonas rurales más aisladas. Un ejemplo final de estos factores estratificantes son los gradientes en intensidad de manejo dentro de las comunidades agrícolas andinas, ya sea espacialmente, en donde los campos más cercanos a la finca se manejan de manera más intensa: o temporalmente, cuando el manejo privado de los campos reemplaza a los sistemas tradicionales de barbecho sectorial. Considerar las cuatro zonas de suelo junto con estos factores estratificantes ayudará a científicos, profesionales y formuladores de políticas a desarrollar el nivel requerido de complejidad de visión para interpretar nuestras recomendaciones. Empleando la lista global de recomendaciones basadas en nuestra revisión de la bibliografía (ver Anexo A), describimos cada zona y de tres a cinco áreas prioritarias de investigación que servirán para apoyar la intensificación agroecológica en la región.

Andosoles: Los Andes húmedos del norte

En los andosoles del norte de los Andes y, en menor grado, en los parches de andosoles encontrados en Perú y Bolivia, la MOS y la precipitación limitan menos la productividad que en otras regiones. Salvo algunos microclimas más secos, en los Andes del norte la precipitación anual alcanza los 800 a 1000 mm, más que en otras partes de la región (Figura 1A). La precipitación y la nubosidad también se distribuyen de modo más parejo a lo largo del año, lo que promueve una mayor cubierta vegetal en el paisaje y menos limitación de agua para el crecimiento de los cultivos. Por otro lado, el acceso mejorado a insumos químicos, los mercados locales de productos agrícolas y los desechos orgánicos en áreas periurbanas crean potencial para mejorar el balance de nutrientes y manejo de la fertilidad del suelo. La disponibilidad de P en suelos alofánicos, (Figura 3), la erosión y las pérdidas de las funciones del suelo por una labranza inapropiada constituyen las principales limitaciones en fertilidad del suelo. Las altas densidades demográficas significan que el actual manejo intensivo por parte de la mayoría de pequeños agricultores enfrenta retos formidables para una intensificación agroecológica sostenible. Para mejorar la forma en cómo la fertilidad del suelo fortalece a los medios de vida de los agricultores, la investigación y la innovación deberían concentrarse en cinco temas prioritarios de investigación estructurados en torno a: la labranza, mejorar la eficiencia de entrega de nutrientes del suelo al cultivo y el fitomejoramiento al estrés de nutrientes.

En primer lugar, la labranza mecanizada, basada en arado y rastras de discos, ampliamente adoptada por muchos pequeños agricultores de los Andes del norte, ha sido devastadora para la estructura del suelo; pero es más, las inadecuadas estrategias de tal labranza en pendientes han agravado dramáticamente la erosión en suelos que inicialmente mostraban un alto potencial productivo. Es necesario revisar en forma crítica y cuantificar los impactos de las prácticas actuales de labranza y manejo de residuos en términos de erosión; es necesaria más investigación en sistemas de labranza, mecanizados o no, que reduzcan la intensidad de la labranza y los impactos negativos, traducidos en pérdida de suelo y de desempeño. Prácticas tradicionales, como el

wachu rozado (labranza reducida que usa capas dobles de césped volteado; ver la sección 2.2.2), pueden contribuir a generar prácticas modernas híbridas, con respaldo científico, que como componente de la intensificación agro-ecológica, movilice a la agricultura andina hacia labranza mínima en laderas. El gran potencial de los andosoles para sostener amplias y complejas redes alimentarias del suelo, nos permite sugerir investigaciones paralelas en fauna del suelo, la que puede ofrecer un medio rápido, sensible y barato para evaluar los impactos de la labranza y el manejo de materia orgánica.

En segundo lugar, dada la alta densidad de ciudades medianas o grandes y la agroindustria en el norte de los Andes, y el interés de la región en el compostaje y otros métodos de reciclaje de desechos, los residuos orgánicos urbanos y del estiércol en los flujos de desechos constituyen un método prometedor para mantener la fertilidad del suelo en las fincas pequeñas con manejo intensivo. Estos esfuerzos deberían ser complementados con investigación aplicada continua, fundamentada en esfuerzos pasados, para determinar la mejor forma de usar los residuos orgánicos en la región, ya sea por aplicación directa, compostaje o producción e incorporación de biochar.

En tercer lugar, en los Andes del norte, los cultivos intercalados de especies como la papa, el maíz y las habas con franjas de forrajeras, son más comunes que en otras regiones andinas (ver Rhoades y Bebbington, 1990; Garrett *et al.*, 2001). Estos sistemas merecen más estudios, debido a su eficiencia en captación y retención de nutrientes, que pueden conducir a nuevas prácticas o a una mayor promoción de las ya existentes para una mejor eficiencia mediante la diversificación espacial y reciclaje de nutrientes (p. ej., la reincorporación de residuos de cultivos a los suelos). Igualmente, allí donde haya tierra disponible, los barbechos mejorados brindan extraordinarias oportunidades para el control de la erosión, restauración del suelo y/o mantener ganado.

Hay dos prioridades finales e integradas de investigación en los Andes del norte. En cuarto lugar, sobre un manejo integrado de la fertilidad del

suelo que sincroniza la disponibilidad de nutrientes a corto plazo con las necesidades de los cultivos (ver sección 2.2.2), mediante el uso de insumos químicos y fertilizantes orgánicos y que busca la comprensión de la biología de suelos en el reciclaje de nutrientes; y en quinto lugar, el fitomejoramiento como una estrategia para aliviar el estrés por nutrientes. Varios factores hacen que estas dos últimas prioridades sean muy prometedoras y que tengan gran importancia para los pequeños agricultores de los Andes y del mundo. Primero, los pequeños agricultores de los Andes del norte aplican mayores cantidades de fertilizantes que en otras zonas andinas y, a menudo, con una recuperación excesivamente baja, especialmente de insumos de P en los andosoles no alofánicos (Figura 4); de manera que hay mucho espacio para mejorar. Segundo, el interés y conocimiento en fitomejoramiento y biología del suelo entre investigadores y profesionales de la región, muestra las posibilidades de dar nuevos pasos importantes para comprender cómo el genotipo vegetal, la biología de la rizósfera y la química de los suelos volcánicos pueden interactuar para mejorar notablemente la eficiencia de los insumos orgánicos e inorgánicos, a fin de mantener o mejorar la productividad y, a la vez, reducir los requerimientos de fertilizantes. Éstos son temas de avanzada, no solo en los Andes, sino también a nivel mundial; y ese trabajo requerirá aumentar la capacidad científica y los enlaces globales en los Andes del norte en las áreas de biología de raíces, ecología del suelo e inóculos microbianos y fitomejoramiento de estrés por nutrientes, sin dejar de lado la actual comprensión de los científicos agrícolas locales sobre los agroecosistemas de los pequeños agricultores. Mucho más que los tres primeros temas relativos a los Andes del norte, estas dos últimas prioridades implican una coordinación entre enfoques “listos para adoptar” a corto plazo (por ej., la combinación de fertilizantes e insumos orgánicos) y los enfoques de la investigación con beneficios a más largo plazo, tales como una mejor comprensión de las relaciones entre raíces y microbios en la rizósfera. Estos esfuerzos integrados de fitomejoramiento y ciencias del suelo también deben coordinarse con proyectos similares realizados en otros sitios de la región.

Ambientes de ladera de carácter mixto y sedimentario: intensificación y fragilidad

Los ambientes de laderas a lo largo de Perú y de Bolivia encarnan la fragilidad de los agroecosistemas andinos. Estas campos de ladera en climas sub-húmedos y semiáridos se han mantenido con la agricultura tradicional de intensidad relativamente baja, con insumos de abono de pastoreo y rotaciones entre cultivos y pastizales con largos períodos de barbecho. En la mayoría de las laderas los suelos son delgados, por consiguiente susceptibles a sequías, son ácidos allí donde haya alta precipitación, y el variado material madre sedimentario e ígneo no es calcáreo. Aunque inicialmente fértiles bajo la vegetación de la gramínea y arbustos, estas laderas se degradan fácilmente, aun al perder unos pocos centímetros de suelo; esto puede conllevar a un ciclo vicioso de menor productividad que, a su vez, conduce a la extensión de la frontera agrícola e intensificación de la labranza y rotaciones de cultivos. No obstante, estos suelos son a menudo jóvenes y tienen una mineralogía relativamente fértil de silicatos de arcilla, comparable a los suelos templados y mediterráneos, en donde nutrientes aportados permanecen moderadamente disponibles para las plantas, y la calidad del suelo muestra mejoras notables con la incorporación de materia orgánica. En lugares donde se ha reducido la erosión y los insumos orgánicos son suficientes, los suelos pueden ser altamente productivos y más resistentes a la sequía, como lo evidencian las parcelas más planas, cercanas a las casas, sometidas a un manejo intensivo en toda la región, o los suelos altamente fértiles en las terrazas Incas conservadas en algunas áreas. Muchos suelos de laderas se encuentran en áreas remotas, con limitado acceso a los mercados locales o globales, de modo que la intensificación agroecológica impulsada por el mercado o el traslado de desechos periurbanos a las fincas en ocasiones es una opción menos viable. Sin embargo, ya sea con las exportaciones productivas desde las comunidades o en los esquemas de reciclaje de nutrientes desarrollados con los pequeños agricultores, se deben promover balances positivos de nutrientes y de materia orgánica en las finca (p. ej., forraje/franjas de abono verde, uso sensato de insumos externos de fertilización) que ayuden a recapitalizar los frágiles suelos sufriendo de décadas de degradación.

Cinco áreas de investigación defenderán mejor a estos frágiles suelos de una mayor degradación. La primera es la conservación del suelo. En estos suelos se han estudiado bien las estrategias de conservación y el primer paso no necesariamente es más investigación sobre la eficacia de diferentes métodos, sino una revisión estratégica que incluya un posible meta análisis de las estrategias de conservación del suelo apropiadas para los pequeños agricultores de los Andes y otras regiones similares (los ambientes semiáridos de ladera en África y de Asia). Puesto que la adopción de prácticas de conservación del suelo a menudo es baja, dado su potencial teórico, tal revisión no solo deberá hacer énfasis en la eficacia técnica, sino también en los estímulos e incentivos relevantes para la adopción de prácticas de conservación o innovación (p.ej., el uso de forraje derivado de las especies de las barreras vivas), y en la identificación de factores que expliquen experiencias desviantes positivas anteriores, en las que la aplicación de métodos de conservación del suelo por agricultores fue ampliamente difundida. Una vez que se haya identificado las opciones más prometedoras, la investigación de campo deberá orientarse a adaptar esas tecnologías a nuevas áreas y sistemas de cultivo.

La segunda prioridad principal deberá ser el fitomejoramiento respecto al estrés por nutrientes y sequía. Estos esfuerzos podrían estar más vinculados a estrés por nutrientes en los Andes del norte, sin embargo, los diferentes climas y tipos de suelo en los Andes centrales significan que los programas de mejoramiento de los Andes del norte y sur enfrentan diferentes limitaciones en estrés abiótico. Por consiguiente, serán complementarios en lugar de superponerse el uno al otro en el fitomejoramiento para diferentes "mega ambientes" dentro de la región. El mejoramiento en estrés nutricional debe centrarse no sólo en cultivos básicos (papas y cereales), sino también en leguminosas de granos y forrajes, donde a menudo los déficits en fósforo e hídricos restringen fuertemente la productividad.

En tercer lugar, la investigación sobre la organización de las fincas y paisajes, debe analizar los roles que las áreas dedicadas a cultivos, pastizales o especies agroforestales pueden desempeñar mejor para fortalecer medios de vida

sostenibles. Esta selección mejorada de innovaciones para los diferentes componentes espaciales de la finca es muy importante en los ambientes de suelos de laderas en los Andes, porque es muy importante comprender el manejo combinado de cultivos y de ganado y los componentes del uso de la tierra. Este trabajo de investigación incluirá los esfuerzos combinados de científicos sociales y geógrafos, especialistas en ganadería y científicos agrícolas que trabajan con representantes comunitarios y regionales en la elaboración de enfoques para adaptar paisajes frágiles enteros a los retos planteados por la intensificación, identificando las mejores especies agroforestales o innovaciones en el manejo de pastizales, y probando las soluciones más relevantes a través de gradientes de fertilidad del suelo. Esta metodología integradora ya forma parte de la agenda de desarrollo de algunas ONG en toda la región, y podría beneficiarse de un productivo aporte científico de los investigadores de las universidades y de gobierno. Más que cualquier otro, este objetivo de investigación se presta a una planificación que responda al diagnóstico dirigido por la comunidad sobre los retos planteados por la fertilidad del suelo, más que al uso de una innovación tecnológica o de manejo como propósito final de la investigación. Los SIG también serían una herramienta útil en estos trabajos si se aplican con criterio adecuado y sin perder de vista los impactos en la finca o en la comunidad.

La investigación sobre biología de suelos e inoculantes es una cuarta prioridad para los ambientes de laderas y debería avanzar en dos frentes. Un frente demandará un proceso riguroso de prospección de inóculos y evaluación de productos en suelos de laderas y proporcionara un conocimiento generalizado sobre la eficacia de los microbios inoculantes, como micorrizas o bacterias solubilizadoras de P. Asimismo, a fin de promover una mayor eficiencia de los insumos de fertilidad, las inversiones a largo plazo en la investigación deben dirigirse a las interacciones positivas entre el genotipo de las plantas y a los organismos en la rizósfera. Estos dos frentes también deberán examinar las interacciones de los microbios y la fauna de la rizósfera con los insumos de materia orgánica por medio de la incorporación de cultivos de cubierta u otros recursos disponibles. En vista

de que las comunidades faunísticas del suelo en estos sistemas han sido poco estudiadas, sugerimos que la investigación en esta área contribuiría enormemente a nuestra comprensión del funcionamiento del suelo en estos sistemas de ladera y podría aportar valiosos indicadores de la salud del suelo.

Nuestra quinta y última recomendación de investigación en la agricultura de laderas de los Andes, es examinar las formas de combinar cantidades pequeñas de fertilizante sintético con los insumos orgánicos que ya están usándose para promover la disponibilidad de nutrientes y su sincronía con la captación de las plantas. Como parte de ello, es necesario considerar de manera más activa la cantidad y la calidad de las entradas y salidas de materia orgánica en los agroecosistemas, y asegurarse de que se agreguen o retornen al suelo los residuos apropiados. El enfoque investigativo del MIFS, además de reducir la erosión del suelo mediante técnicas de conservación del suelo, promoverá un mejor balance de nutrientes en campos y fincas de laderas.

El Altiplano: Crisis por sequía y materia orgánica del suelo

Los suelos del Altiplano son algo diferentes a otros suelos de la región andina, comenzando por su topografía más plana y clima más seco (Figura 1A), que se manifiesta en estrés hídrico más frecuente que en otros sitios. A pesar de que en los suelos del Altiplano se han agotado todos los nutrientes importantes para los cultivos, tienden a ser preponderantemente más deficitarios en C y N, que en P (Valente y Oliver, 1993). Esta limitación de carbón y N se debe a múltiples factores: baja productividad de la vegetación de barbecho y de aportes en biomasa; una textura del suelo generalmente ligera y una creciente intensidad de la labranza debido una reducción de los períodos de barbecho. En el Altiplano, la tierra en barbecho se regenera lentamente por causa del clima seco y frío, que hace a los suelos muy vulnerables a la creciente presión humana sobre los recursos de la tierra, expresada en intensificación de cultivos, pastoreo y usos alternativos de la biomasa, como la leña. Los efectos de retroalimentación de los niveles bajos de C y de N restringen también la

productividad del barbecho. Con la topografía más plana en esta zona que en otros lugares de la región, la erosión hídrica es relativamente menos importante que la erosión eólica como amenaza a la sostenibilidad; estos los suelos secos y planos tienden a presentar un pH de neutro a alcalino y salinidad (Figura 4). La precipitación es cada vez más irregular en la parte sur de esta región edáfica y está causando una crisis en la productividad, que probablemente se intensificará con el cambio climático. Además, el auge del mercado internacional de quinua ha resultado en una menor duración de los períodos de barbecho y ha aumentado la intensidad del cultivo de la quinua, de modo que la labranza es más frecuente y las rotaciones menos diversas.

Las investigaciones en fertilidad del suelo, que mejoran los medios de vida, necesitan enfocarse en promover la disponibilidad de N, las reservas de C, la capacidad para adaptarse a la sequía de los sistemas de cultivo y en capitalizar el importante rol del ganado en términos económicos y en la fertilidad del suelo en la zona del Altiplano. Este plan puede resumirse en cinco temas de investigación para el Altiplano.

Primero, los investigadores y profesionales del desarrollo, de común acuerdo con las comunidades de agricultores, deben tratar de definir los límites de la intensificación agrícola en los ambientes frágiles de estepa que tradicionalmente se manejaban como barbechos sectoriales extensivos. La región está fuertemente organizada, tanto alrededor de la producción de cultivos como de la identidad étnica, lo que podría proporcionar el liderazgo necesario para vincular los elementos de la intensificación agroecológica, concebida por personas externas con los aspectos tradicionales e innovadores del manejo de los pequeños agricultores. Es probable que las limitaciones a la productividad en estos ambientes reflejen una triple amenaza expresada en, agotamiento de nutrientes en el suelo, limitaciones físicas del suelo debidas a la labranza excesiva y la reducción del tiempo de barbecho y al incremento del riesgo de sequía debido al cambio climático. Más adelante incluimos consejos sobre posibles soluciones a los cuatro temas prioritarios (del segundo al quinto), mientras que el enfoque de esta primera prioridad es el análisis por parte de los

actores locales. En el Altiplano, el nexo entre los investigadores involucrados, las asociaciones de productores vinculadas a una intensificación agrícola claramente impulsada por el mercado y las organizaciones comunitarias históricamente fuertes, pueden sentar las bases para cambiar las prácticas utilizando análisis de modelos de agotamiento de suelos, abordando los conocimientos de las familias y comunidades y realizando inversiones en investigaciones de tecnologías que cambien el rumbo de los procesos de degradación.

Segundo, la investigación debería contribuir a maximizar las reservas de MOS y la disponibilidad de N al nivel de finca. Los análisis del reciclaje de residuos (C) y balances de nutrientes en fincas y campos podrían ayudar a identificar los puntos de apoyo para lograr un mejor retorno de los residuos de cultivos, abono y del valor potencial de ingresar residuos externos. Los actuales esfuerzos de mecanización a pequeña escala para la trilla de quinua y otros granos en el campo, podrían ampliarse como una manera de devolver los residuos a los campos y de compensar la escasez de mano de obra (Bonifacio *et al.*, 2011). Dada la importancia del ganado y la necesidad de N en el suelo, las especies de legumbres agroforestales y forrajeras deben ser integradas al suministro de forraje, lo cual podría elevar la productividad general de forraje y la cantidad del abono que se aplicará en el campo. Puesto que en la parte más plana del Altiplano los insumos pueden ser transportados a grandes distancias, el reciclaje periurbano de desechos orgánicos en pueblos y ciudades de la región pueden ser una opción realista. La deficiencia de C en suelo podría motivar la integración de la pirólisis (producción de carbón) de los desechos de biomasa periurbana usada para cubrir las necesidades de energía térmica, como el horneado que en el Altiplano tradicionalmente dependía de la vegetación de arbustos y crear existencias de biochar para aumentar reservas de C en suelos.

Tercero, la investigación integral sobre la fertilidad del suelo detallada anteriormente, debe buscar formas para que aportes inorgánicos estratégicos maximicen la productividad de cultivos y residuos en el Altiplano. Este objetivo complementará los esfuerzos en construir reservas de C en el suelo.

Cuarto, al igual que en los Andes del norte, la alta intensidad de la labranza mecanizada y la falta de atención a la labranza como una práctica perjudicial a las funciones del suelo, crean oportunidades para que los investigadores trabajen en variantes andinas en agricultura de conservación. Estas innovaciones deberán abordar las limitaciones en labranza reducida por bajas temperaturas del suelo en zonas elevadas. Las actividades de investigación sobre la labranza podrían trabajarse en red entre los Andes del norte y el Altiplano, para maximizar la toma de conciencia acerca de los recursos del conocimiento tradicional y los nexos con los esfuerzos internacionales en la agricultura de conservación.

Quinto, los esfuerzos en fitomejoramiento deben abordar el estrés hídrico que padecen los tubérculos, granos y legumbres andinos, enfocando en las etapas sensitivas de crecimiento de estos cultivos al estrés por sequía. El fitomejoramiento requerirá el desarrollo de habilidades en la fisiología del estrés por sequía y fitomejoramiento para los mejoradores que tradicionalmente se han centrado en el estrés biótico y las características de calidad de cultivos. Las variedades resistentes a la sequía también serían un recurso importante para ambientes de laderas susceptibles a la sequía en los valles andinos del sur de Perú y Bolivia.

Valles aluviales: poca extensión, manejo intensivo y potencial productivo

Los suelos del fondo de los valles planos asentados sobre sedimentos aluviales, dispersos en toda la región andina, tienen propiedades diferentes de las que poseen los suelos de ladera y del Altiplano. Estas áreas cultivadas varían en tamaño: desde unas decenas de metros cuadrados ubicadas en terrazas sedimentadas en terrenos montañosos, hasta cientos de kilómetros cuadrados de valles con tierras agrícolas relativamente fértiles, situados alrededor de zonas urbanas montañosas, como Cochabamba, Cuzco o Quito. Los suelos de valles son más profundos y a menudo tienen una textura más pesada que los suelos circundantes de las laderas; donde los recursos lo permiten, los agricultores con frecuencia agregan sistemas de riego. Todo lo anterior hace que estos suelos sean

altamente productivos, excepto por otras limitaciones, como plagas, inundaciones o la salinización. En sitios con riego, los suelos de valles, basados en su alto valor y productividad, a menudo permiten cultivos bi-estacionales, con rotaciones muy intensas. Con frecuencia, los pequeños agricultores más pobres solo tienen acceso a áreas pequeñas del fondo del valle, lo cual tiende a exacerbar allí la intensidad de los cultivos y los problemas conexos, como la pérdida de la estructura del suelo y enfermedades radiculares. En lugares donde el agua de regadío es salina, los suelos pueden tener serios problemas de salinización.

Para muchos suelos de fincas pequeñas, tres temas de investigación ayudarán a mantener sus altos niveles de productividad. El primero es el uso del reciclaje de los desechos orgánicos periurbanos en áreas no muy alejadas de las ciudades. Algunos lugares con ciudades medianas y grandes ubicadas cerca de valles fértiles ya cuentan con reciclaje de desechos y de materia orgánica. En ellos se transfiere el abono de las industrias avícolas a las fincas de los pequeños agricultores y hay ciertas experiencias con compostaje que podrían ser ampliadas.

Segundo, los esfuerzos combinados en MIFS, en calidad física y biología del suelo, deberían examinar el uso más eficaz de fertilizantes e insumos orgánicos en los ambientes de valle, analizar los efectos de la labranza intensiva en estos suelos y determinar la forma cómo las comunidades de microorganismos y de fauna beneficiosos podrían fomentar la disponibilidad de nutrientes y la protección contra las enfermedades radiculares. Donde el espacio y los recursos, lo permitan, la incorporación de períodos cortos y mejorados de barbecho o rotaciones con cultivos de cobertura podría ser un medio para mejorar la función biológica del suelo, el almacenaje de nutrientes y regular las poblaciones de plagas. Observamos también que una mejor comprensión de la fauna del suelo podría ser muy importante en estos sistemas, ya que representa indicadores de bajo costo y altamente sensibles a la salud del suelo; pueden permitir una evaluación integral de los impactos del manejo en la fertilidad y en el funcionamiento del agroecosistema.

Tercero, los procesos que se desarrollan a nivel de paisaje también ameritan atención en relación con los suelos de valles. Por ejemplo, el acceso a estos suelos fértiles y, a menudo, resistentes a la sequía (dada su profundidad e irrigación) puede ser organizado según la condición socioeconómica de los agricultores; y los investigadores podrían considerar el potencial impacto de las iniciativas de reforma de las comunidades para promover una mayor equidad en la distribución de los beneficios que aportan estos suelos. Además, el manejo tradicional de estos suelos, que aplica el riego por inundación en algunas áreas, ha sido una manera de recuperar: flujos de nutrientes erosionados de los suelos de laderas y de la salinización de las terrazas. Estos procesos realizados por los agricultores a nivel de paisaje merecen mayor atención por parte de los investigadores.

Integración regional: evaluaciones de largo plazo a las prácticas sobre la capacidad productiva del suelo e integración de los esfuerzos de investigación en toda la región

Con el fin de monitorear los impactos de las estrategias para pasar de un modelo de intensificación insostenible a las prácticas agroecológicas, sugerimos establecer una red de sitios, según las capacidades de las organizaciones locales de investigación, para convalidar y comprender las implicaciones a largo plazo de las actuales estrategias de intensificación sostenible y el desarrollo de la fertilidad del suelo, y para probar nuevas hipótesis, prácticas y germoplasma en investigaciones de suelos y cultivos en la región. Estos sitios podrían ser los sitios de los agricultores manejados por proyectos no gubernamentales en red, mantenidos por universidades agrícolas de la región; o una combinación de acuerdos planificados por las redes de estas organizaciones. Independientemente, sería importante buscar un financiamiento estable para estos sitios de investigación agroecológica a largo plazo, basados en el nuevo nivel de compromiso con el desarrollo rural por parte de los gobiernos de la región. Propondríamos que nuestros cuatro ambientes edáficos, además de otra zonificaciones agroecológicas (elevación, estado de degradación, intensidad del manejo) podrían ser empleados para buscar acuerdos representativos de los sitios. Esta

red brindaría la oportunidad de apartarse de los enfoques de un solo año, un solo experimento o una sola comunidad, que predominan en la bibliografía que examinamos para la región andina. Lo ideal sería que estos sitios representaran más que un nuevo conjunto de estaciones experimentales, para convertirse en centros que apoyan la investigación en fincas.

Otro nivel de integración regional de proyectos que prevemos, es en la forma en que proyectos transversales podrían comparar el aprendizaje acerca de temas específicos de fitomejoramiento o manejo de suelos. Por ejemplo, un proyecto regional podría probar diversas variedades de cultivos para alimentos básicos o de leguminosas adaptadas al estrés por nutrientes a lo largo de diferentes zonas de precipitación, de norte a sur en la región, y de las zonas de suelo que delineamos en las recomendaciones. El trabajo sobre nuevos enfoques apropiados de labranza, manejo de residuos, inóculos microbianos o las opciones de leguminosas forrajeras en las rotaciones de cereales también podría juntarse en toda la región con fines comparativos.

Un esfuerzo final de integración sería dedicar recursos a un mejor mapeo de los suelos, en términos de unidades taxonómicas y otros parámetros (pH, contenido de arcilla, limitación de nutrientes), que ayudarán a los científicos y a los profesionales del desarrollo a predecir los ambientes en donde pueden aplicarse prácticas nuevas e investigación básica, así como 'mega ambientes' para el fitomejoramiento de los cultivos. Los mapas de suelos globales no describen bien la diversidad (ni el potencial) de los suelos andinos; y los mapas de suelos nacionales son anticuados y particularmente deficientes en el caso de Bolivia (ver la colección digitalizada de mapas para América Latina en: <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb%5Farchive/eudasm/latinamerica/>; y la base de datos de mapas de suelos del mundo del ISRIC en <http://www.isric.org>

Estos esfuerzos de mapeo de suelos demandarán nuevos métodos, algunos de los cuales son actualmente parte de los nuevos esfuerzos de mapeo mundial (p. ej.: <http://globalsoilmap.net/>), así como inversión de los gobiernos regionales.

Agradecimientos

Agradecemos a varias personas que brindaron asistencia y asesoría en diversas etapas del desarrollo de este documento, entre ellas: Javier Aguilera, Julio Alegre, Alejandro Bonifacio, Walter Bowen, Sady García, Edward Guevara, R. Magdalena López, Carlos Meneses, Ruddy Meneses, Marcela Quintero, Claire Nicklin, Óscar

Ortiz, Noel Ortuño, Carlos Pérez, María Scurrah, Femke Tonneijck, Karl Zimmerer y muchos otros.

Inversión continua en conservación del suelo

1. Estructuras físicas y barreras vivas
2. Cultivos de cobertura, insumos de materia orgánica en cuanto pertenecen a la erosión (cubierta del suelo de los impactos de la

Anexo A

Esquema completo de recomendaciones para las áreas temáticas de las futuras investigaciones andina de suelos, basadas en los enfoques del manejo de fertilidad del suelo

- precipitación, efectos de infiltración de la lluvia en la materia orgánica y la estructura del suelo)
3. Comprensión de los incentivos que motivan la adopción o innovación en métodos de conservación del suelo
 4. Prácticas de labranza
 - a. Urgentes en muchos sistemas andinos con labranza mecanizada
 - b. Comprender y promover la reducción de la labranza en sistemas no mecanizados
 - c. Comprender los puntos delicados clave del ciclo anual de cultivos para prevenir la erosión
 - d. Labranza de conservación adaptada a la región andina.

Biomasa mejorada y C fijo, incorporación de N/P orgánico en los suelos mediante cultivos dentro y fuera del campo; Impactos en los balances de nutrientes y materia orgánica, y en la liberación de nutrientes

1. Incorporación de leguminosas a las mezclas existentes de cultivos, en especial para enriquecer las fuentes de forraje
2. Tecnologías agroforestales, por ej., cercas vivas de contorno, lotes maderables y áreas forrajeras con menor manejo: comprender los retos de la adopción.
3. Se podría escoger áreas apropiadas del Altiplano en donde el uso de la tierra aún no es excesivamente intenso y donde el nivel de la MOS es bajo.

Mejor reciclaje de nutrientes e importación de fuentes no tradicionales

1. Desechos orgánicos periurbanos y compostaje
2. Fuentes no tradicionales de fertilidad:
 - a. Desechos orgánicos de aves e industriales

- aumentando el uso de abonos animales y otros desechos de biomasa de regiones periurbanas – identificar las mejores prácticas de uso
- b. Maleza invasora en los canales por la contaminación urbana de nutrientes – cosecha y compost
 - c. Fosforita
 - d. Producción de biocarbón (biochar) de desechos leñosos y con alto contenido de C.

MIFS: Sincronía y disponibilidad óptima de nutrientes en las combinaciones de fuentes de fertilidad orgánicas e inorgánicas

1. Clasificación de la variabilidad de insumos orgánicos; pruebas y patrones de respuesta a los insumos orgánicos; posible meta-análisis adicional usando las investigaciones existentes de la región
2. Uso estratégico de fertilizantes sintéticos; por ejemplo, fosfato diamónico/abono, que ya es una práctica entre los agricultores de la región
3. Evaluación de los enfoques de MIFS desde las tierras tropicales bajas y otras zonas altas para su uso en la región andina
4. Integración con la investigación para comprender y mejorar las funciones de los microbios en la rizósfera (más adelante).

Comprensión y manejo de la biología del suelo

1. Comprender los impactos del manejo del suelo en grupos funcionales importantes de la flora y la fauna, en especial la rotación e insumos tradicionales/innovadores; por ej., duración del barbecho, abono, función de los residuos e insumos innovadores: biocarbón (biochar) y zeolitas

2. Desarrollo y uso de los inóculos: identificación de dominios prometedores para prospectos de microbios útiles y máximo impacto en los cultivos – asumiendo que el mayor impacto se hallará en porciones moderadamente degradadas de los gradientes del manejo (suelos sobreexplotados o erosionados); o en aquellos con regímenes de cultivo intensivo en donde se establecen los complejos de enfermedades del suelo
3. Investigación a largo plazo sobre la metagenómica del suelo y las relaciones plantas/microbios en la rizósfera, que ofrezca principios y soluciones que se aplicarán a pequeños cultivos y al manejo de suelos.

Fitomejoramiento para ambientes marginales: estrés por nutrientes y por sequía

1. Aprender de los enfoques de arquitectura de la raíz y de otras estrategias de adquisición de nutrientes de esfuerzos de fitomejoramiento realizados en otras partes del mundo.
2. Hacer un análisis de 'mega regiones' sobre estrés por sequía (estrés estacional versus estrés por sequía terminal en diferentes áreas de los Andes) y los impactos durante los puntos sensibles del ciclo de crecimiento (p. ej., floración de las legumbres, tuberización en la papa); la elaboración de modelos de cultivos sería útil en este caso

3. Explorar la diversidad de características ya presentes en los recursos de germoplasma nativos
4. Fortalecer la función de apoyar cultivos huérfanos, como las legumbres andinas, así como alimentos básicos tradicionales (papa, cereales).

Planificación a nivel de paisaje y de finca, considerando la alta variabilidad espacial

1. En los lotes: promover la diversificación y comprender los sistemas diversos existentes (p. ej., el cultivos intercalado de legumbres-papa-maíz en Ecuador); con el fin de mejorar el uso de los recursos en el cultivo, suprimir plagas y la estabilidad de la productividad
2. A nivel del paisaje y entre lotes (o gradientes de pastizales/cultivos): mejorar la comprensión de los gradientes de fertilidad del suelo y ambientes de pendientes
3. Planificación de los enfoques para diferentes usos de la tierra entre los parches de la finca y de la comunidad: basarse en el trabajo existente de la comunidad y de las ONG para planificar el uso de la tierra en formas que respondan a los riesgos y a los procesos de degradación.

Referencias

- Abadín, J., González-Prieto, S.J., Sarmiento, L., Villar, M.C. y Carballas, T., (2002). Successional dynamics of soil characteristics in a long fallow agricultural system of the high tropical Andes. *Soil Biol. Biochem.* **34**, 1739-1748.
- Abreu, Z., Llambí, L.D. y Sarmiento, L., (2009). Sensitivity of soil restoration indicators during Paramo succession in the high tropical Andes: Chronosequence and permanent plot approaches. *Restor. Ecol.* **17**, 619-628.
- Aguilera, J., 2010. Impacts of soil management practices on soil fertility in potato-based cropping systems in the Bolivian Andean highlands. University of Missouri, Columbia.
- Alegre, J.C., Felipe-Morales, C. y LaTorre, B., (1990). Soil erosion studied in Peru. *J. Soil Water Conserv.* **45**, 417-420.
- Altieri, M., (2004). Linking ecologists and traditional farmers in the search for sustainable agriculture. *Front.Ecol. Environ.* **2**, 35-42.
- Alyokhin, A., Porter, G., Groden, E. y Drummond, F., (2005). Colorado potato beetle response to soil amendments: A case in support of the mineral balance hypothesis? *Agric. Ecosyst. Environ.* **109**, 234-244.
- Amede, T., Kittlitz, E.V. y Schubert, S., (1999). Differential drought responses of faba bean (*Vicia faba* L.) inbred lines. *J. Agron. Crop Sci.* **183**, 35-45.
- Antle, J.M., Stoorvogel, J.J. y Valdivia, R.O., (2007). Assessing the economic impacts of agricultural carbon sequestration: Terraces and agroforestry in the Peruvian Andes. *Agric. Ecosyst. Environ.* **122**, 435-445.
- Ao, J., Fu, J., Tian, J., Yan, X. y Liao, H., (2010). Genetic variability for root morph-architecture traits and root growth dynamics as related to phosphorus efficiency in soybean. *Funct. Plant Biol.* **37**, 304-312.
- Arandia, W., Ortúño, N., Gutierrez, E., y Cáceres, A., (2007). Evaluación en invernadero de la respuesta del cultivo de cebolla (*Allium cepa*) de la variedad rosada criolla al uso combinado con aciduantes y micorrizas (m.a.). Facultad de Agronomía. Universidad Mayor San Simon, Cochabamba, Bolivia.
- Araus, J.L., Slafer, G.A., Royo, C. y Serret, M.D., (2008). Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* **27**, 377-412.
- Aroca, R. y Ruiz-Lozano, J.M., (2009). Induction of plant tolerance to semi-arid environments by beneficial soil microorganisms – A review. *Sustainable Agriculture Reviews* **2**, 121-135.
- Arshad, M., Shahroona, B. y Mahmood, T., (2008). Inoculation with *Pseudomonas* spp. containing ACC-deaminase partially eliminates the effects of drought stress on growth, yield, and ripening of pea (*Pisum sativum* L.). *Pedosphere* **18**, 611-620.
- Ashby, J., Beltrán, A.J., Guerrero, M. y Ramos, H.F., (1997). Improving the acceptability to farmer of soil conservation practices. *J. Soil Water Conserv.* **51**, 309-312.
- Bale, J.S., Masters, G.J., Hodkinson, I.D., Awmack, C., Bezemer, T.M., Brown, V.K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J.C., Farrar, J., Good, J.E.G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T.H., Lindroth, R.L., Press, M.C., Symrnioudis, I., Watt, A.D., y Whittaker, J.B., (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob. Change Biol.* **8**, 1-16.
- Banziger, M., Settimela, P., Hodson, D. y Vivek, B., (2006). Breeding for improved abiotic stress tolerance in maize adapted to southern Africa. *Agr. Water Manage.* **80**, 212-224.

Referencias

- Barba, R., Coca, G., Tuma, N. y Pijnenborg, J., (2000). Pre-selección de cepas de (Brady) rhizobium para leguminosas de grano en Bolivia. En: Meneses, R. (Ed.), Compendio de trabajos presentados por el proyecto rizobiología (Cochabamba) en eventos y publicaciones de otras instituciones. Proyecto Rizobiología Bolivia (CIAT-CIF-PNLG-CIFP-UAW/DHV), Cochabamba, Bolivia, pp. 47-49.
- Barrios, E., Cobo, J.G., Rao, I.M., Thomas, R.J., Amezquita, E., Jiménez, J.J. y Rondón, M.A., (2005). Fallow management for soil fertility recovery in tropical Andean agroecosystems in Colombia. *Agric. Ecosyst. Environ.* **110**, 29-42.
- Barrios, E., y Trejo, M.T., (2003). Implications of local soil knowledge for integrated soil management in Latin America. *Geoderma* **111**, 217-231.
- Barroso, C.B. y Nahas, E., (2005). The status of soil phosphate fractions and the ability of fungi to dissolve hardly soluble phosphates. *Appl. Soil Ecol.* **29**, 73-83.
- Bartl, K., Gamarra, J., Gómez, C.A., Wettstein, H.R., Kreuzer, M. y Hess, H.D., (2009). Agronomic performance and nutritive value of common and alternative grass and legume species in the Peruvian highlands. *Grass Forage Sci.* **64**, 109-121.
- Bashan, Y. y Bashan, L.E.d., (2010). Chapter two - how the plant growth-promoting bacterium Azospirillum promotes plant growth - a critical assessment. *Adv. Agron.* **108**, 77-136.
- Batjes, N.H. Global Distribution of Phosphorus Retention Potential. Wageningen- ISRIC (with dataset) ISRIC report 2011/06, 42 pp.
- Bayard, B., Curtis, M.J. y Dennis, S., (2006). The economics of adoption and management of alley cropping in Haiti. *J. Environ. Manage.* **84**, 62-70.
- Bebington, A.J., Carrasco, H., Peralbo, L., Ramon, G., Trujillo, J. y Torres, V., (1993). Fragile lands, fragile organizations: Indian organizations and the politics of sustainability in Ecuador. *T. I. Brit. Geogr.* **18**, 179-196.
- Beebe, S., Lynch, J., Galwey, N., Tohme, J. y Ochoa, I., (1997). A geographical approach to identify phosphorus-efficient genotypes among landraces and wild ancestors of common bean. *Euphytica* **95**, 325-336.
- Beebe, S., Rao, I.M., Blair, M.W. y Butare, L., (2009). Breeding for abiotic stress tolerance in common bean: Present and future challenges. *SABRAO J. Breed. Genet.* **41**, 1-11.
- Beebe, S.E., Rojas-Pierce, M., Yan, X., Blair, M.W., Pedraza, F., Munoz, F., Tohme, J. y Lynch, J.P., (2006). Quantitative trait loci for root architecture traits correlated with phosphorus acquisition in common bean. *Crop Sci.* **46**, 413-423.
- Belimov, A.A., Dodd, I.C., Hontzeas, N., Theobald, J.C., Safranova, V.I. y Davies, W.J., (2009). Rhizosphere bacteria containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase increase yield of plants grown in drying soil via both local and systemic hormone signalling. *New Phytol.* **181**, 413-423.
- Bell, L.W., Wade, L.J. y Ewing, M.A., (2010). Perennial wheat: A review of environmental and agronomic prospects for development in Australia. *Crop Pasture Sci.* **61**, 679-690.
- Benizri, E., Baudoin, E., y Guckert, A., (2001). Root colonization by inoculated plant growth-promoting rhizobacteria. *Biocontrol Sci. Techn.* **11**, 557-574.
- Bennet, A.E. y Bever, J.D., (2007). Mycorrhizal species differentially alter plant growth and response to herbivory. *Ecology* **88**, 210-218.
- Bentley, J., Velasco, C., Rodríguez, F., Oros, R., Botello, R., Webb, M., Devaux, A. y Thiele, G., (2007). Unspoken demands for farm technology. *Int. J. Agric. Sustain.* **5**, 70-84.
- Bentley, J.W., (1989). What farmers don't know can't help them: The strengths and weaknesses of indigenous technical knowledge in Honduras. *Agr. Human Val.* **6**, 25-31.
- Bianchi, F.J.J.A., Booij, C.J.H. y Tscharntke, T., (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *P. R. Soc. B-Biol. Sci. B* **273**, 1715-1527.

- Blouin, M., Zuijly-Fodil, Y., Pham-Thi, A.T., Laffray, D., Reversat, G., Pando, A., Tondoh, J. y Lavelle, P., (2005). Belowground organism activities affect plant aboveground phenotype, inducing plant tolerance to parasites. *Ecol. Lett.* **8**, 202-208.
- Blum, A., (2005). Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential - are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Aust. J. Agr. Res.* **56**, 1159-1168.
- Bonifacio, A., Saravia, R., Alcon, M., Apaza, R., Vargas, A. y Ruiz, R., (2011). Quinoa IPM and potatoes: advances and perspectives in the Bolivian altiplano. En: D'Angles, O. (Ed.), Integrated pest management in developing countries: fostering new approaches to merge social and ecological views at the landscape level. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Boomsma, C.R. y Vyn, T.J., (2008). Maize drought tolerance: Potential improvements through arbuscular mycorrhizal symbiosis? *Field Crops Res.* **108**, 14-31.
- Borie B, F., Rubio, R., Morales, A., Curaqueo, G. y Cornejo, P., (2010). Arbuscular mycorrhizae in agricultural and forest ecosystems in Chile. *J. Soil Sci. Plant Nut.* **10**, 185-206.
- Bossio, D. y Cassman, K., (1991). Traditional rainfed barley production in the Andean highlands of Ecuador: Soil nutrient limitations and other constraints. *M. Res. Dev.* **11**, 115-126.
- Bottner, P., Pansu, M., Sarmiento, L., Dominique Hervé, D., Ruben Callisaya-Bautista, R. y Metselaar, K., (2006). Factors controlling decomposition of soil organic matter in fallow systems of the high tropical Andes: A field simulation approach using ^{14}C - and ^{15}N -labelled plant material. *Soil Biol. Biochem.* **38**, 2162-2177.
- Bradley, R.S., Vuille, M., Diaz, H. F., y Vergara, W., (2006) Threats to water supply in the Tropical Andes. *Science*, **312**, 1755-1756.
- Briar, S.S., Fonte, S.J., Park, I., Six, J., Scow, K.M. y Ferris, H., (2011). The distribution of nematodes and soil microbial communities across soil aggregate fractions and farm management systems. *Soil Biol. Biochem.* **43**, 905-914.
- Briones, M.J.I., Ostle, N.J., McNamara, N.P. y Poskitt, J., (2009). Functional shift of grassland communities in response to soil warming. *Soil Biol. Biochem.* **41**, 315-322.
- Bronick, C.J. y Lal, R., (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma* **124**, 3-22.
- Brown, G.G., Pashanasi, B., Villenave, C., Patrón, J.C., Senapati, B.K., Giri, S., Barrios, I., Lavelle, P., Blanchart, E., Blakemore, R.J., Spain, A.V. y Boyer, J., (1999). Effects of earthworms on plant production in the tropics. En: Lavelle, P., Brussaard, L., Hendrix, P. (Eds.), *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*. CAB International, Oxon, pp. 87-147.
- Brush, S., Kesseli, R., Ortega, R., Cisneros, P., Zimmerer, K. y Quiros, C., (1995). Potato diversity in the Andean center of crop domestication. *Conserv. Biol.* **19**, 1189-1198.
- Brussaard, L., Pulleman, M.M., Ouedraogo, E., Mando, A. y Six, J., (2006). Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. *Pedobiología* **50**, 447-462.
- Bucheyeki, T.L., Shenkalwa, E.M., Mapunda, T.X. y Matata, L.W., (2008). On-farm evaluation of promising groundnut varieties for adaptation and adoption in Tanzania. *Afr. J. Agric. Res.* **3**, 531-536.
- Bunch, R., (2004). Adopción de abonos verdes y cultivos de cobertura. LEISA Revista de Agroecología, 11-13.
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F. y Tobón, C., (2010a). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecol. Biogeogr.* **20**, 19-33.
- Buytaert, W., Deckers, J., Dercon, G., De BieÁvre, B., Poesen, J. y Govers, G., (2002). Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in south Ecuador. *Soil Use Manage.* **18**, 94-100.
- Buytaert, W., Deckers, J. y Wyseure, G., (2007). Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena* **70**, 143-154.

Referencias

- Buytaert, W., Rolando Céller, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. y Hofstede, R., (2006). Human impact on the hydrology of the Andean paramos. *Earth-Sci. Rev.* **79**, 53-72.
- Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A. y Céller, R., (2010b). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **14**, 1247-1258.
- Capowiez, Y., Cadoux, S., Bouchant, P., Ruy, S., Roger-Estrade, J., Richard, G. y Boizard, H., (2009). The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil Till. Res.* **105**, 209-216.
- Cárdenas, J., Choque, W. y Guzmán, R., 2008. Fertilidad, uso y manejo de suelos en la zona del intersalar, departamentos de: Oruro y Potosí. Fundación AITAPO, Programa Quinoa Sur, Oruro, Bolivia.
- Cardoza, Y.J., (2011). Arabidopsis thaliana resistance to insects mediated by an earthworm-produced organic soil amendment. *Pest Manage. Sci.* **67**, 233-238.
- Carney, K.M. y Matson, P.A., (2005). Plant communities, soil microorganisms, and soil carbon cycling: does altering the world belowground matter to ecosystem functioning? *Ecosystems* **8**, 928-940.
- Carvalho, I.S., Ricardo, C.P. y Chaves, M., (2004). Quality and distribution of assimilates within the whole plant of lupines (*L-albus* and *L-mutabilis*) influenced by water stress. *J. Agron. Crop Sci.* **190**, 205-210.
- Cassman, K.G., Dobermann, A. y Walters, D.T., (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* **31**, 132-140.
- Cattivelli, L., Rizza, F., Badeck, F.W., Mazzucotelli, E., Mastrangelo, A.M., Francia, E., Mare, C., Tondelli, A. y Stanca, A.M., (2008). Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crop. Res.* **105**, 1-14.
- Caycho-Ronco, J., Arias-Mesia, A., Oswald, A., Esprella-Elias, R., A. Rivera, A., Yumisaca, F. y Andrade-Piedra, J., (2009). Tecnologías sostenibles y su uso en la producción de papa en la región altoandina. *Revista Latinoamericana de la Papa* **15**, 20-37.
- Ceccarelli, S., Acevedo, E. y Grando, S., (1991). Breeding for yield stability in unpredictable environments - single traits, interaction between traits, and architecture of genotypes. *Euphytica* **56**, 169-185.
- Ceccarelli, S., Grando, S., Maatougui, M., Michael, M., Slash, M., Haghparast, R., Rahamanian, M., Taheri, A., Al-Yassin, A., Benbelkacem, A., Labdi, M., Mimoun, H. y Nachit, M., (2010). Plant breeding and climate changes. *J. Agr. Sci.* **148**, 627-637.
- Chabot, R., Antoun, H. y Cescas, M.P., (1996). Growth promotion of maize and lettuce by phosphate-solubilizing Rhizobium leguminosarum biovar phaseoli. *Plant and Soil* **184**, 311-321.
- Chalk, (2000). Integrated effects of mineral nutrition on legume performance. *Soil Biol. Biochem.* **32**, 577-579.
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. y Joseph, S., (2007). Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Aust. J. Soil Res.* **45**, 629-634.
- Chaves, M.M., Maroco, J.P. y Pereira, J.S., (2003). Understanding plant responses to drought: From genes to the whole plant. *Funct. Plant Biol.* **30**, 239-264.
- Chen, Y.P., Rekha, P.D., Arun, A.B., Shen, F.T., Lai, W.A. y Young, C.C., (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Appl. Soil Ecol.* **34**, 33-41.
- Chepstow-Lusty, A. y Winfield, M., (2000). Inca agroforestry: Lessons from the past. *Ambio* **29**, 322-328.
- Chivenge, P., Vanlauwe, B. y Six, J., (2010). Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant Soil* **342**, 1-30.

- Claverías, R., (1994). Causas de la reducción del período de descanso de las tierras en comunidades campesinas de Puno: Alternativas para la sostenibilidad. En: Hervé, D. (Ed.), Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes. IBTA - OSTROM, La Paz, Bolivia, pp. 249-258.
- Cobo, J.G., Dercon, G. y Cadisch, G., (2010). Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales: A review of approaches, challenges and progress. *Agric. Ecosyst. Environ.* **136**, 1-15.
- Cofie, O.O., Kranjac-Berisavljevic, G. y Drechsel, P., (2005). The use of human waste for peri-urban agriculture in Northern Ghana. *Renew. Agr. Food Syst.* **20**, 73-80.
- Collins, J.L. (1988) *Unseasonal Migrations: The Effects of Rural Labor Scarcity in Peru*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Compart, S., Clement, C. y Sessitsch, A., (2010). Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biol. Biochem.* **42**, 669-678.
- Conde, M., Gutiérrez, S. y Meneses, R., (2000). Respuesta a fertilizantes orgánicos y cepas del género Rhizobium, en el cultivo de haba en invernadero y campo. En: Meneses, R. (Ed.), Compendio de trabajos presentados por el Proyecto Rizobiología (Cochabamba) en eventos y publicaciones de otras instituciones. Proyecto Rizobiología Bolivia (CIAT-CIF-PNLG-CIFP-UAW/DHV), Cochabamba, Bolivia, pp. 237-240.
- Condori, B., Devaux, A., Mamani, P., Vallejos, J. y Blajos, J., (1997). Efecto residual de la fertilización del cultivo de papa sobre el cultivo de haba (*Vicia faba L.*) en el sistema de rotación. *Revista Latinoamericana de la Papa* **9/10**, 171-187.
- Condori, B., Hijmans, R.J., Quiroz, R. y Ledent, J.F., (2010). Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modeling. *Field Crop. Res.* **119**, 135-144.
- Conklin, A.E., Erich, M.S., Liebman, M., Lambert, D., Gallandt, E.R. y Halteman, W.A., (2002). Effects of red clover (*Trifolium pratense*) green manure and compost soil amendments on wild mustard (*Brassica kabera*) growth and incidence of disease. *Plant Soil* **238**, 245-256.
- Coppus, R., Imeson, A.C., y Sevink, J., (2003). Identification, distribution and characteristics of erosion sensitive areas in three different Central Andean ecosystems. *Catena* **51**, 315-328.
- Córdoba, J.J. y Novoa, V., (1997). Problemática, experiencias y enfoque sobre la erosión, manejo y conservación de suelos de ladera en Ecuador. En: Tapia, M. (Ed.), *Manejo Integral de Microcuenca*. Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú.
- Cotler, H. y Maass, J.M., (1999). Tree management in the northwestern Andean Cordillera of Peru. *Mt. Res. Dev.* **19**, 153-160.
- Coûteaux, M., Hervé, D. y Mita, V., (2008). Carbon and nitrogen dynamics of potato residues and sheep dung in a two-year rotation cultivation in the Bolivian altiplano. *Commun. Soil Sci. Plant* **39**, 475-498.
- Cox, T.S., Bender, M., Picone, C., Van Tassel, D.L., Holland, J.B., Brummer, E.C., Zoeller, B.E., Paterson, A.H. y Jackson, W., (2002). Breeding perennial grain crops. *Crit. Rev. Plant Sci.* **21**, 59-91.
- Craswell, E.T. y Lefroy, R.D.B., (2001). The role and function of organic matter in tropical soils. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* **61**, 7-18.
- Craswell, E.T., Sajjapongse, A., Howlett, D.B.J. y Dowling, A.J., (1998). Agroforestry in the management of sloping lands in Asia and the Pacific. *Agroforest. Syst.* **38**, 121-137.
- Crookston, R.K., Kurle, J.E., Copeland, P.J., Ford, J.H. y Lueschen, W.E., (1991). Rotational cropping sequence affects yield of corn and soybean. *Agron. J.* **83**, 108-113.
- Dahlgren, R.A., Saigusa, M., y Ugolini, F.C., (2004). The nature, property, and management of volcanic soils. *Adv. Agron.* **82**, 113-182.
- DallaCosta, L., DelleVedove, G., Gianquinto, G., Giovanardi, R. y Peressotti, A., (1997). Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: Influence of drought stress. *Potato Res.* **40**, 19-34.

Referencias

- Davidson, E.A. y Janssens, I.A., (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* **440**, 165-173.
- Davies, F.T., Jr., Calderón, C.M. y Huaman, Z., (2005). Influence of arbuscular mycorrhizae indigenous to Peru and a flavonoid on growth, yield, and leaf elemental concentration of ‘Yungay’ potatoes. *HortScience* **40**, 381-385.
- de Koning, G.H.J., Van de Kop, P.J. y Fresco, L., (1997). Estimates of sub-national nutrient balances as sustainability indicators for agro-ecosystems in Ecuador. *Agric. Ecosyst. Environ.* **65**, 127-139.
- de la Torre, C. y Burga, M., 1986. Andenes y camellones en el Perú andino: Historia, presente y futuro. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Lima.
- Degenhardt, J., Hiltbold, I., Koellner, T.G., Frey, M., Gierl, A., Gershenson, J., Hibbard, B.E., Ellersieck, M.R. y Turlings, T.C.J., (2009). Restoring a maize root signal that attracts insect-killing nematodes to control a major pest. *P. Natl. Acad. Sci.-USA* **106**, 13213-13218.
- Dehn, M., (1995). An evaluation of soil conservation techniques in the Ecuadorian Andes. *Mt. Res. Dev.* **15**, 175-182.
- Dercon, G., Deckers, J., Poesen, J., Govers, G., Sánchez, H., Ramírez, M., Vanegas, R., Tacuri, E. y Loaiza, G., (2006). Spatial variability in crop response under contour hedgerow systems in the Andes region of Ecuador. *Soil Till. Res.* **86**, 15-26.
- Desbiez, A., Matthews, R., Tripathi, B. y Ellis-Jones, J., (2004). Perceptions and assessment of soil fertility by farmers in the mid-hills of Nepal. *Agric. Ecosyst. Environ.* **103**, 191-206.
- Deugd, M., Roling, N. y Smaling, E.M.A., (1998). A new praxeology for integrated nutrient management, facilitating innovation with and by farmers. *Agric. Ecosyst. Environ.* **71**, 269-283.
- Devaux, A., Vallejos, J., Hijmans, R. y Ramos, J., (1997). Respuesta agronómica de dos variedades de papa (spp. *tuberosum* y *andigena*) a diferentes niveles de fertilización mineral. *Revista Latinoamericana de la Papa* **9/10**, 123-139.
- Dick, R.P., Sandor, J.A. y Eash, N.S., (1994). Soil enzyme activities after 1500 years of terrace agriculture in the Colca Valley of Peru. *Agric. Ecosyst. Environ.* **50**, 123-131.
- Ditzler, C.A. y Tugel, A.J., (2002). Soil quality field tools: Experiences of USDA-NRCS Soil Quality Institute. *Agron. J.* **94**, 33-38.
- Douds, D.D., Nagahashi, G., Reider, C. y Hepperly, P.R., (2007). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi increases the yield of potatoes in a high-P soil. *Biol. Agr. Hort.* **25**, 67-78.
- Drinkwater, L.E. y Snapp, S.S., (2007). Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm. *Adv. Agron.* **92**, 163-186.
- Erenstein, O., (2003). Smallholder conservation farming in the tropics and sub-tropics: a guide to the development and dissemination of mulching with crop residues and cover crops. *Agric. Ecosyst. Environ.* **100**, 17-37.
- Errebhi, M., Rosen, C.J., Lauer, F.L., Martin, M.W. y Bamberger, J.B., (1999). Evaluation of tuber-bearing Solanum species for nitrogen use efficiency and biomass partitioning. *Am. J. Potato. Res.* **76**, 143-151.
- Espinosa, J., (1991). Efecto residual de fósforo en andisoles. *Revista Facultad de Agronomía (Maracay)* **17**, 39-47.
- Evans, J., Gregory, A., Dobrowolski, N., Morris, S.G., O'Connor, G.E. y Wallace, C., (1996). Nodulation of field-grown *Pisum sativum* and *Vicia faba*: Competitiveness of inoculant strains of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* determined by an indirect, competitive ELISA method. *Soil Biol. Biochem.* **28**, 247-255.
- Evans, T.A., Dawes, T.Z., Ward, P.R. y Lo, N., (2011). Ants and termites increase crop yield in a dry climate. *Nature Commun.* **2**, 1-7.
- Faccini, G., Garzón, S., Martínez, M. y Varela, A., 2007. Evaluation of the effect of a dual inoculum of phosphate-solubilizing bacteria and *Azotobacter chroococcum*, in crops of creole potato (‘papa criolla’) ‘yema de huevo’ variety (*Solanum phureja*). En: Rodríguez-Barueco, E.V.a.C. (Ed.), First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization. Springer, pp. 301-308.

- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.1). FAO, Roma, Italia e IIASA, Laxenburg, Austria
- Felipe-Morales, C., (2002). Manejo agroecológico del suelo en sistemas andinos. Agroecología. Ediciones Científicas Sudamericanas, Buenos Aires.
- Fernandes, E.C.M., Motavalli, P.P., Castilla, C. y Mukurumbira, L., (1997). Management control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems. *Geoderma* **79**, 49-67.
- Ferris, H., Bongers, T. y de Goede, R.G.M., (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Appl. Soil Ecol.* **18**, 13-29.
- Ferrufino, A., y Sanchez, M., (2006). Efecto de la inoculación con micorrizas en el crecimiento de plántulas de tembe para palmito (*Bactris gasipaes* Kunth) en fase de vivero. *Revista de Agricultura* **37**, 1-10.
- Flores Macías, A., Galvis Spinola, A., Hernández Mendoza, T.M., De León González, F. y Payán Zelaya, F., (2007). Effect of zeolite (clinoptilolite and mordenite) amended andosols on soil chemical environment and growth of oat. *Interciencia* **32**, 692-696.
- Fonte, S.J., Barrios, E. y Six, J., (2010). Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. *Geoderma* **155**, 320-328.
- Fornara, D.A. y Tilman, D., (2008). Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. *J. Ecol.* **96**, 314-322.
- Freiberg, C., Fellay, R., Balroch, A., Broughton, W.J., Rosenthal, A. y Peret, X., (1997). Molecular basis of symbiosis between Rhizobium and legumes. *Nature* **387**, 394-401.
- French, R.J. y Buirchell, B.J., (2005). Lupin: the largest grain legume crop in Western Australia, its adaptation and improvement through plant breeding. *Aust. J. Agr. Res.* **56**, 1169-1180.
- Fuentes, M., Govaerts, B., De León, F., Hidalgo, C., Dendooven, L., Sayre, K.D. y Etchevers, J., (2009). Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *Eur. J. Agron.* **30**, 228-237.
- Gabriel, J., (2006). Plant breeding and biotechnology capacity survey: Bolivia. Fundación Proinpa, Cochabamba.
- García, S., (2011). Evaluating the Biophysical Resource Management Strategies of the Agro-ecosystems in Farm Communities of the Mantaro Valley, Central Andes of Peru. Bioscience Engineering. K.U. Leuven, 276 pp.
- García, S., Rodríguez, J., Vera, J. y Schrevens, E., (2010). Effect of compost application on soil chemical and biological properties under potato crop in the Mantaro Valley – Peru. Proceedings of the International Soil Science Congress, Samsun, Turquía, pp. 211-217.
- Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N., y Travers, S.E., (2006). Climate change effects on plant disease: Genomes to ecosystems. *Annu. Rev. Phytopathol.* **44**, 489-509.
- Garrett, K.A., Nelson, R.J., Mundt, C.C., Chacon, G., Jaramillo, R.E. y Forbes, G.A., (2001). The effects of host diversity and other management components on epidemics of potato late blight in the humid highland tropics. *Phytopathology* **91**:993-1000.
- Geerts, S., Raes, D., García, M., Del Castillo, C. y Buytaert, W., (2006). Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. *Agr. Forest Meteorol.* **139**, 399-412.
- Gianoli, E., Ramos, I., Alfaro-Tapia, A., Valdés, Y., Echegaray, E.R. y Yábar, E., (2006). Benefits of a maize-bean-weed mixed cropping system in Urubamba Valley, Peruvian Andes. *Int. J. Pest Manage.* **52**, 283-289.
- Giller, K.E., Rowe, E.C., de Ridder, N. y van Keulen, H., (2006). Resource use dynamics and interactions in the tropics: Scaling up in space and time. *Agr. Syst.* **88**, 8-27.
- Glick, B.R., Cheng, Z., Czarny, J. y Duan, J., (2007). Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria. *Eur. J. Plant Pathol.* **119**, 329-339.

Referencias

- Goland, C., (1993). Field scattering as agricultural risk management: A case study from Cuyo Cuyo, Department of Puno, Peru. *Mt. Res. Dev.* **13**, 317-338.
- Goodman-Elgar, M., (2008). Evaluating soil resilience in long-term cultivation: A study of pre-Columbian terraces from the Paca Valley, Peru. *J. Archaeol. Sci.* **35**, 3072-3086.
- Govaerts, B., Mezzalama, M., Sayre, K.D., Crossa, J., Licherter, K., Troch, V., Vanherck, K., De Corte, P. y Deckers, J., (2008). Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on selected soil micro-flora groups in the subtropical highlands. *Appl. Soil Ecol.* **38**, 197-210.
- Hahn, H., McManus, M.T., Warnstorff, K., Monahan, B.J., Young, C.A., Davies, E., Tapper, B.A. y Scott, B., (2008). Neotyphodium fungal endophytes confer physiological protection to perennial ryegrass (*Lolium perenne L.*) subjected to a water deficit. *Environ. Exp. Bot.* **63**, 183-199.
- Harden, C., (1988). Mesoscale estimation of soil erosion in the Rio Ambato drainage, Ecuadorian sierra. *Mt. Res. Dev.* **8**, 331-341.
- Harden, C., (1993). Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an Andean drainage basin in Ecuador. *Mt. Res. Dev.* **13**, 177-184.
- Harden, C., (1996). Interrelationships between land abandonment and land degradation: A case from the Ecuadorian Andes. *Mt. Res. Dev.* **16**, 274-280.
- Harris, P.J.C., Allison, M., Smith, G., Kindness, H.M. y Kelley, J., (2001). The potential use of waste-stream products for soil amelioration in peri-urban interface agricultural production systems. CAB International, Wallingford.
- Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R. y Ahmed, I., (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A review. *Ann. Microbiol.* **60**, 579-598.
- Hellin, J., Welchez, L.A. y Cherrett, I., (1999). The Quezungual system: an indigenous agroforestry system from western Honduras. *Agroforest. Syst.* **46**, 229-237.
- Henry, A., Kleinman, P.J.A. y Lynch, J.P., (2009). Phosphorus runoff from a phosphorus deficient soil under common bean (*Phaseolus vulgaris L.*) and soybean (*Glycine max L.*) genotypes with contrasting root architecture. *Plant Soil* **317**, 1-16.
- Hensen, I., (2002). Impacts of anthropogenic activity on the vegetation of Polylepis woodlands in the region of Cochabamba, Bolivia. *Ecotropica* **8**, 183-203.
- Herbas, J.E., (2000). Elaboración de compost por los métodos indore y bocashi en la comunidad de Millu Mayu, municipio de Tiraque. Programa de Agronomía. Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Herrera-Peraza, R.A., Hamel, C., Fernández, F., Ferrer, R.L. y Furrazola, E., (2011). Soil-strain compatibility: The key to effective use of arbuscular mycorrhizal inoculants? *Mycorrhiza* **21**, 183-193.
- Hersh, N., (2000). Landrace Adaptation and Andean Farming Systems: Distribution and Weevil (*Mycrotrypes spp.*) Infestation of Oca (*Oxalis tuberosa*) tuber varieties in Cusco, Peru. Pennsylvania State University.
- Hervé, D., (1994). Respuesta de los componentes de la fertilidad del suelo a la duración del descanso. En: Hervé, D. (Ed.), Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes. IBTA - OSTROM, La Paz, Bolivia, pp. 155-169.
- Hijmans, R.J., Cameron, S., Parra, J.L., Jones, P.G. y Jarvis, A., (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **25**, 1965-1978.
- Hocking, P.J. y Jeffery, S., (2004). Cluster-root production and organic anion exudation in a group of old-world lupins and a new-world lupin. *Plant Soil* **258**, 135-150.
- Hofstede, R., (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian paramo grasslands. *Plant Soil* **173**, 111-132.
- Hofstede, R., Coppus, R., Mena Vásquez, P., Segarra, P., Wolf, J. y Sevink, J., (2002). The conservation status of tussock grass paramo in Ecuador. *Ecotrópicos* **15**, 3-18.

- Horton, D., (1983). Potato farming in the Andes: Some lessons from on-farm research in Peru's Mantaro Valley. *Agr. Syst.* **12**, 171-184.
- Ibarra, E., (2008). Efecto de especie y dosis de micorrizas en la producción de pimiento. Pontificia Universidad Católica de Ecuador, Quito, Ecuador.
- Inbar, M. y Llerena, C.A., (2000). Erosion processes in high mountain agricultural terraces in Peru. *Mt. Res. Dev.* **20**, 72-79.
- Ippolito, J.A., Tarkalson, D.D. y Lehrsch, G.A., (2011). Zeolite soil application method affects inorganic nitrogen, moisture, and corn growth. *Soil Sci.* **176**, 136-142.
- Iriarte, L., Franco, J. y Ortúño, N., (1999). Efecto de abonos orgánicos sobre las poblaciones de nematodos y la producción de la papa. *Revista Latinoamericana de la Papa* **11**, 149-163.
- Jaimes, V. y Sarmiento, L., (2002). Regeneración de la vegetación de páramo después de un disturbio agrícola en la Cordillera Oriental de Colombia. *Ecotrópicos* **15**, 61-74.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A. y Guevara, E., (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Jennings, P.R. y Cock, J.H., (1977). Center of origin of crops and their productivity. *Econ. Bot.* **31**, 51-54.
- Jha, P., Biswas, A.K., Lakaria, B.L. y Rao, A.S., (2010). Biochar in agriculture – prospects and related implications. *Curr. Sci. India* **99**.
- Johnson, N.C., (2010). Resource stoichiometry elucidates the structure and function of arbuscular mycorrhizas across scales. *New Phytol.* **185**, 631-647.
- Jorquera, M.A., Hernández, M.T., Rengel, Z., Marschner, P. y Mora, M.d.I.L., (2008). Isolation of culturable phosphobacteria with both phytate-mineralization and phosphate-solubilization activity from the rhizosphere of plants grown in a volcanic soil. *Biol. Fert. Soils* **44**, 1025-1034.
- Kane, K.H., (2011). Effects of endophyte infection on drought stress tolerance of *Lolium perenne* accessions from the Mediterranean region. *Environ. Exp. Bot.* **71**, 337-344.
- Kanmegne, J., Smaling, E.M.A., Brussaard, L., Gansop-Kouomegne, A. y Boukong, A., (2006). Nutrient flows in smallholder production systems in the humid forest zone of southern Cameroon. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **76**, 233-248.
- Karak, T. y Bhattacharyya, P., (2011). Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. *Resour. Conserv. Recy.* **55**, 400-408.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I. y Regina, K., (2011). Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agric. Ecosyst. Environ.* **140**, 309-313.
- Karlton, E., Lemenih, M. y Tolera, M., (2011). Comparing farmers' perception of soil fertility change with soil properties and crop performance in Beseku, Ethiopia. *Land Degrad. Develop.* En impresión.
- Kenen, A., Assefa, F. y Prabu, P.C., (2010). Isolation of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of faba bean of Ethiopia and their abilities on solubilizing insoluble phosphates. *J. Agric. Sci. Technol.* **12**, 79-89.
- Kessler, C.A. y Stroosnijder, L., (2006). Land degradation assessment by farmers in Bolivian mountain valleys. *Land Degrad. Dev.* **17**, 235-248.
- Khan, H.R., Paull, J.G., Siddique, K.H.M. y Stoddard, F.L., (2010). Faba bean breeding for drought-affected environments: A physiological and agronomic perspective. *Field Crops Res.* **115**, 279-286.
- Khan, H.U.R., Link, W., Hocking, T.J. y Stoddard, F.L., (2007). Evaluation of physiological traits for improving drought tolerance in faba bean (*Vicia faba* L.). *Plant Soil* **292**, 205-217.
- Kirkegaard, J.A. y Sarwar, M., (1998). Biofumigation potential of brassicas. I. Variation in glucosinolate profiles of diverse field-grown brassicas. *Plant Soil* **201**, 71-89.
- Klein, A.-M., Vaissiere, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C. y Tscharntke, T., (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *P. Royal Soc. Lond. B. Bio.* **274**, 303-313.

Referencias

- Kochian, L.V., Piñeros, M.A. y Hoekenga, O.A., (2005). The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant and Soil* **274**, 175-195.
- Kong, A.Y.Y. y Six, J., (2010). Tracing root vs. residue carbon into soils from conventional and alternative cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **74**, 1201-1210.
- Kong, A.Y.Y., Six, J., Bryant, D.C., Denison, R.F. y van Kessel, C., (2005). The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **69**, 1078-1085.
- Kramer, S.B., Reganold, J.P., Glover, J.D., Bohannan, B.J.M. y Mooney, H.A., (2006). Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils. *P. Natl. Acad. Sci.-USA.* **103**, 4522-4527.
- Lagacherie, B., Bours, M., Giraud, J.J. y Sommer, G., (1983). Interaction between Rhizobium lupini strains and species or cultivars of lupin (*Lupinus albus*, *Lupinus luteus* and *Lupinus mutabilis*). *Agronomie* **3**, 809-816.
- Lange, F.R., (1994). Mejoramiento de la disponibilidad de fósforo por procesos biológicos de la roca fosfórica. Facultad de Agronomía. Universidad Mayor San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W. y Dhillon, S., (1997). Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *Europ. J. Soil Biol.* **33**, 159-193.
- Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, A., Martin, S., Spain, A., Toutain, F., Barois, I., and Schaefer, R., (1993). A hierarchical model for the decomposition in terrestrial ecosystems: Application to soils of the humid tropics. *Biotropica* **25**, 130-150.
- Lavelle, P. y Spain, A.V., (2001). *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos.
- Lawler, J.J., Shafer, S.L., White, D., Kareiva, P., Maurer, E.P., Blaustein, A.R. y Bartlein, P.J., (2009). Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology* **90**, 588-597.
- Leveau, J.H.J., (2007). The magic and menace of metagenomics: Prospects for the study of plant growth-promoting rhizobacteria. *Eur. J. Plant Pathol.* **119**, 279-300.
- Li, L., Li, S.M., Sun, J.H., Zhou, L.L., Bao, X.G., Zhang, H.G. y Zhang, F.S., (2007). Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *P. Natl. Acad. Sci.-USA.* **104**, 11192-11196.
- Li, Y.Y., Yu, C.B., Cheng, X., Li, C.J., Sun, J.H., Zhang, F.S., Lambers, H. y Li, L., (2009). Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N₂ fixation of faba bean. *Plant Soil* **323**, 295-308.
- Liebman, M. y Dyck, E., (1993). Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecol. Appl.* **3**, 92-122.
- Litterick, A.M., Wallace, P., Watson, C.A. y Wood, M., (2004). Compost extracts in reducing pest and disease incidence and severity in sustainable temperate agricultural and horticultural crop production—A review. *Crit. Rev. Plant Sci.* **23**, 453-479.
- Loon, L.C., (2007). Plant responses to plant growth-promoting rhizobacteria. *Eur. J. Plant Pathol.* **119**, 243-254.
- Lorion, R., (2004). Rock phosphate, manure and compost use in garlic and potato systems in a high intermontane valley in Bolivia. Dept. of Crop and Soil Sciences. Washington State University, 63 pp.
- Lorito, M., Woo, S.L., Harman, G.E. y Monte, E., (2010). Translational research on *Trichoderma*: From 'omics to the field. *Annual Review of Phytopathology* **48**, 395-417.
- Lynch, J.P., (2007). Roots of the second Green Revolution. *Aust. J. Bot.* **55**, 493-512.
- Machado, D., Sarmiento, L. y González-Prieto, S., (2010). The use of organic substrates with contrasting C/N ratio in the regulation of nitrogen use efficiency and losses in a potato agroecosystem. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **88**, 411-427.

- Mäder, P., Kaiser, F., Adholeya, A., Singh, R., Uppal, H.S., Sharma, A.K., Srivastava, R., Sahai, V., Aragno, M. y Wiemken, A., (2011). Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat-rice and wheat-black gram rotations in India. *Soil Biol. Biochem.* **43**, 609-619.
- Mahboubi, P., Gordon, A.M., Stoskopf, N. y Voroney, R.P., (1997). Agroforestry in the Bolivian Altiplano: Evaluation of tree species and greenhouse growth of wheat on soils treated with tree leaves. *Agroforest. Syst.* **37**, 59-77.
- Mamani, P., Botello, R., Condori, B., Moya, H. y Devaux, A., (2001). Efecto del tipo de labranza con tracción animal en las características físicas del suelo, conservación de la humedad y en el crecimiento y producción del cultivo de la papa. *Revista Latinoamericana de la Papa* **12**, 130-151.
- Marichal, R., (2011). Impact de la déforestation sur les communautés de macrofaune et de vers de terre en Amazonie – relation avec les services écosystémiques. *Université Pierre et Marie Curie*, Paris, 155 pp.
- Martínez-Viveros, O., Jorquera, M.A., Crowley, D.E., Gajardo, G. y Mora, M.L., (2010). Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by Rhizobacteria. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **10**, 293-319.
- Matson, P.A., Naylor, R. y Ortiz-Monasterio, I., (1998). Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management. *Science* **280**, 112-115.
- Maughan, P.J., Bonifacio, A., Jellen, E.N., Stevens, M.R., Coleman, C.E., Ricks, M., Mason, S.L., Jarvis, D.E., Gardunia, B.W. y Fairbanks, D.J., (2004). A genetic linkage map of quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on AFLP, RAPD, and SSR markers. *Theor. Appl. Genet.* **109**, 1188-1195.
- Maughan, P.J., Turner, T.B., Coleman, C.E., Elzinga, D.B., Jellen, E.N., Morales, J.A., Udall, J.A., Fairbanks, D.J. y Bonifacio, A., (2009). Characterization of Salt Overly Sensitive 1 (SOS1) gene homoeologs in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Genome* **52**, 647-657.
- Mayak, S., Tirosh, T. y Glick, B.R., (2004). Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. *Plant Sci.* **166**, 525-530.
- Mayer, E., (1979). Land-Use in the Andes: Ecology and Agriculture in the Mantaro Valley of Peru with Special Reference to Potatoes. Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú.
- Medrano Echalar, A.M. y Ortúño, N., (2007). Control de damping off mediante la aplicación de bioinsumos en almácigos de cebolla en el Valle Alto de Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova* **3**, 660-679.
- Mehari, A., Van Steenbergen, F. y Schultz, B., (2011). Modernization of spate-irrigated agriculture: A new approach. *Irrig. Drain.* **60**, 163-173.
- Meneses, R., Oller, V. y Waijienberg, H., (2000). Inoculación y fertilización en el cultivo de alfalfa en valles y alturas de Bolivia. En: Meneses, R. (Ed.), *Compendio de trabajos presentados por el Proyecto Rizobiología (Cochabamba) en eventos y publicaciones de otras instituciones. Proyecto Rizobiología Bolivia (CIAT-CIF-PNLG-CIFP-UAW/DHV)*, Cochabamba, Bolivia, pp. 66-67.
- Miklas, P.N., Kelly, J.D., Beebe, S.E. y Blair, M.W., (2006). Common bean breeding for resistance against biotic and abiotic stresses: From classical to MAS breeding. *Euphytica* **147**, 105-131.
- Miller, D.R., Chen, S.Y., Porter, R.M., Johnson, G.A., Wyse, D.L., Stetina, S.R., Klossner, L.D. y Nelson, G.A., (2006). Rotation crop evaluation for management of the soybean cyst nematode in Minnesota. *Agron. J.* **98**, 569-578.
- Misra, R.V., Roy, R.N. y Hiraoka, H., (2003). On-Farm Composting Methods. FAO, Roma, Italia.
- Mnasri, B., Tajini, F., Trabelsi, M., Aouani, M.E. y Mhamdi, R., (2007). *Rhizobium gallicum* as an efficient symbiont for bean cultivation. *Agron. Sustain. Dev.* **27**, 331-336.
- Molinillo, M. y Monasterio, M., (2006). Vegetation and grazing patterns in Andean environments: A comparison of pastoral systems in punas and paramos. En: *Land Use Change and Mountain Biodiversity*. Taylor & Francis Group, pp. 1-15.
- Montgomery, D.R., (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *P.Natl. Acad. Sci.-USA* **104**, 13268-13272.

Referencias

- Moore, J.C., Berlow, E.L., Coleman, D.C., de Ruiter, P.C., Dong, Q., Hastings, A., Johnson, N.C., McCann, K.S., Melville, K., Morin, P.J., Nadelhoffer, K., Rosemond, A.D., Post, D.M., Sabo, J.L., Scow, K.M., Vanni, M.J. y Wall, D.H., (2004). Detritus, trophic dynamics and biodiversity. *Ecol. Lett.* **7**, 584-600.
- Morales, J. y Sarmiento, L., (2002). Dinámica de los macroinvertebrados edáficos y su relación con la vegetación en una sucesión secundaria en el páramo venezolano. *Ecotropicos* **15**, 99-110.
- Moreno Díaz, P., (1988). Inoculación de micorrizas MVA en papa (*Solanum tuberosum*): Respuesta en el crecimiento y nutrición de plantas inoculadas en invernadero y en campo. *Revista Latinoamericana de la Papa* **1**, 84-103.
- Murphy, D.V., Stockdale, E.A., Brookes, P.C. y Goulding, K.W.T., (2007). Impact of Microorganisms on Chemical Transformations in Soil. En: Abbott, L.K., Murphy, D.V. (Eds.), *Biological Fertility - A Key to Sustainable Land Use in Agriculture*. Springer, Berlín, Alemania. pp. 37-59.
- Mutegi, J.K., Mugendi, D.N., Verchot, L.V. y Kung'u, J.B., (2008). Combining napier grass with leguminous shrubs in contour hedgerows controls soil erosion without competing with crops. *Agroforest. Syst.* **74**, 37-49.
- Nezomba, H., Tauro, T.P., Mtambanengwe, F. y Mapfumo, P., (2010). Indigenous legume fallows (indifallows) as an alterative soil fertility resource in smallholder maize cropping systems. *Field Crop Res.* **115**, 149-157.
- Nieto-Cabrera, C., Francis, C., Caicedo, C., Gutiérrez, P.F. y Rivera, M., (1997). Response of four Andean crops to rotation and fertilization. *Mt. Res. Dev.* **17**, 273-282.
- Noguera, D., Laossi, K.R., Lavelle, P., Cruz de Carvalho, M.H., Asakawa, N., Botero, C. y Barot, S., (2011). Amplifying the benefits of agroecology by using the right cultivars. *Ecol. Appl.* **21**, 2349-2356.
- Noguera, D., Rondón, M., Laossi, K., Hoyos, V., Lavelle, P., Cruz de Carvalho, M.E. y Barot, S., (2010). Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil Biol. Biochem.* **42**, 1017-1027.
- Novak, J.M., Busscher, W.J., Laird, D.L., Ahmedna, M., Watts, D.W. y Niandou, M.A.S., (2009). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Sci.* **174**, 105-112.
- NRC, (1989). Lost Crops of the Incas: Little-Known Plants of the Andes with Promise for Worldwide Cultivation. National Academy Press, Washington D.C.
- Nustez, C.E. y Acevedo, J.C., (2005). Evaluating using *Penicillium janthinellum* Biourge on the efficiency of phosphoric fertilisation of potato crops (*Solanum tuberosum* L. var. Diacol Capiro). *Agronomía Colombiana* **23**, 290-298.
- Nziguheba, G., Palm, C.A., Buresg, R.J. y Smithson, P.C., (1998). Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. *Plant Soil* **198**, 159-168.
- Oberson, A., Büntemann, E.K., Friesen, D.K., Rao, I.M., Smithson, P.C., Turner, B.L. y Frossard, E., (2006). Improving Phosphorus Fertility in Tropical Soils through Biological Interventions. *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. (Uphoff et al., Eds.), pp. 531-546. CRC Press, Boca Raton.
- Oberson, A., Friesen, D.K., Tiessen, H., Morel, C. y Stahel, W., (1999). Phosphorus status and cycling in native savanna and improved pastures on an acid low-P Colombian Oxisol. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **55**, 77-88.
- Oliveira, C.A., Alves, V.M.C., Marriel, I.E., Gomes, E.A., Scotti, M.R., Carneiro, N.P., Guimaraes, C.T., Schaffert, R.E. y Sa, N.M.H., (2009). Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado biome. *Soil Biol. Biochem.* **41**, 1782-1787.
- Oorts, K., Vanlauwe, B. y Merckx, R., (2003). Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a ferric lixivisol with different organic matter inputs. *Agric. Ecosyst. Environ.* **100**, 161-171.
- Orlove, B. y Godoy, R., (1986). Sectoral fallowing systems in the central Andes. *J. Ethnobiology* **6**, 169-204.
- Orna Chavez, A.R., (2009). Evaluación del efecto de la aplicación de micorrizas en la producción de tomate riñon (*Solanum lycopersicon*) bajo invernadero. Recursos Naturales. ESPPOCH, Riobamba, Ecuador.

- Orsag, V., (2009). Degradación de suelos en el Altiplano Boliviano. Análisis - Instituto Boliviano de Economía y Política Agraria **1**, 27-30.
- Ortuño, N., (2010). Desarrollo de bioinsumos para la producción sostenible de hortalizas con pequeños agricultores para una soberanía alimentaria en los Andes. CIAT, Colombia.
- Ortuño, N., Navia, O., Medrano, A., Rojar, K., y Torrico, L., (2010). Desarrollo de bioinsumos: Un aporte a la soberanía alimentaria de Bolivia. Revista de Agricultura **47**, 30-38.
- Osman, A., (1999). Soil fertility management in Cajamarca, Peru. Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú.
- Osorio-Vega, N.W., (2007). Review of beneficial effects of rhizosphere bacteria on soil nutrient availability and plant nutrient uptake. Revista de la Facultad Nacional de Agronomía Medellín **60**, 3621-3643.
- Oswald, A., 2010. Soil fertility management and crop productivity of potato-based cropping systems of the Andean highlands of Peru. Working Paper. Centro Internacional de la Papa, pp. 1-29.
- Oswald, A., Calvo Vélez, P., Zúñiga Dávila, D. y Arcos Pineda, J., (2010). Evaluating soil rhizobacteria for their ability to enhance plant growth and tuber yield in potato. Ann. Appl. Biol. **157**, 259-271.
- Oswald, A., Haan, S., Sánchez, J. y Ccanto, R., (2009). The complexity of simple tillage systems. J. Agr. Sci. **147**, 399-410.
- Otero, J. y Onaindiam, M., (2009). Landscape structure and live fences in Andes Colombian agroecosystems: Upper basin of the Cane-Iguaque River. Int. J. Trop. Biol. **57**, 1183-1192.
- Oyarzun, P.J., Gerlagh, M. y Zadoks, J.C., (1998). Factors associated with soil receptivity to some fungal root rot pathogens of peas. Appl. Soil Ecol. **10**, 151-169.
- Pacheco, V., Zelada, A. y Navarro, C., (1992). Recuperación de tierras en el Proyecto Norte Chuquisaca. Proyecto Norte Chuquisaca, Sucre, Bolivia.
- Palm, C.A., Gachengo, C.N., Delve, R.J., Cadisch, G. y Giller, K.E., (2001). Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: Application of an organic resource database. Agric. Ecosyst. Environ. **83**, 27-42.
- Palta, J.A., Turner, N.C., French, R.J. y Buirchell, B.J., (2007). Physiological responses of lupin genotypes to terminal drought in a Mediterranean-type environment. Ann. Appl. Biol. **150**, 269-279.
- Pansak, W., Dercon, G., Hilger, T., Kongkaew, T. y Cadisch, G., (2007). ¹³C isotopic discrimination: A starting point for new insights in competition for nitrogen and water under contour hedgerow systems in tropical mountainous regions. Plant Soil **298**, 175-189.
- Pansu, M., Sarmiento, L., Metselaar, K. y Bottner, P., (2007). Modelling the transformations and sequestration of soil organic matter in two contrasting ecosystems of the Andes. Eur. J. Soil Sci. **58**, 775-785.
- Paredes, M., (2010). Peasants, Potatoes and Pesticides: Heterogeneity in the Context of Agricultural Modernization in the Highland Andes of Ecuador. School of Social Sciences. Wageningen University, Wageningen, Países Bajos. 322 pp.
- Parsa, S., (2010). Native herbivore becomes key pest after dismantlement of a traditional farming system. American Entomologist **56**, 242-251.
- Parsa, S., Ccanto, R. y Rosenheim, J.A., (2011). Resource concentration dilutes a key pest in indigenous potato agriculture. Ecol. Appl. **21**, 539-546.
- Pearse, S.J., Veneklaas, E.J., Cawthray, G.R., Bolland, M.D.A. y Lambers, H., (2006). Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain legume species as affected by phosphorus status. Plant Soil **288**, 127-139.
- Perez, C., Nicklin, C., D'angles, O., Vanek, S.J., Sherwood, S., Halloy, S., Garrett, K. y Forbes, G., (2010). Climate change in the high Andes: Implications and adaptation strategies for small-scale farmers. International Journal of Environmental, Cultural, Economic and Social Sustainability **6**, 71-88.

Referencias

- Pestalozzi, H., (2000). Sectoral fallow systems and the management of soil fertility: The rationality of indigenous knowledge in the high Andes of Bolivia. *Mt. Res. Dev.* **20**, 64-71.
- Pimentel, D., (2006). Soil erosion: A food and environmental threat. *Environ. Dev. Sustain.* **8**, 119-137.
- Podwojewski, P. y Germain, N., (2005). Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (Cangahua) in Ecuador. *Eur. J. Soil Sci.* **39**, 39-51.
- Posthumus, H. y De Graaff, J., (2005). Cost-benefit analysis of bench terraces: A case study in Peru. *Land Degrad. Dev.* **16**, 1-11.
- Posthumus, H., Gardebroek, C. y Ruben, R., (2010). From participation to adoption: Comparing the effectiveness of soil conservation programs in the Peruvian Andes. *Land Econ.* **86**, 645-667.
- Postma-Blaauw, M., De Goede, R.G.M., Bloem, J., Faber, J.H. y Brussard, L., (2010). Soil biota community structure and abundance under agricultural intensification and extensification. *Ecology* **91**, 460-473.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.-L. y Collinet, J., (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Paramo: Effect of tillage and burning. *Catena* **45**, 185-207.
- Poveda, K., Gómez, M.I. y Martínez, E., (2008). Diversification practices: Their effect on pest regulation and production. *Revista Colombiana de Entomología* **34**, 131-144.
- Powlson, D.S., Gregory, P.J., Whalley, W.R., Quinton, J.N., Hopkins, D.W., Whitmore, A.P., Hirsch, P.R. y Goulding, K.W.T., (2011). Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy* **36**, S72-S87.
- Puget, P. y Drinkwater, L.E., (2001). Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**, 771-779.
- Quilty, J.R. y Cattle, S.R., (2011). Use and understanding of organic amendments in Australian agriculture: A review. *Aust. J. Soil Res.* **49**, 1-26.
- Quintero, M., (2009). Effects of conservation tillage in soil carbon sequestration and net revenues of potato-based rotations in the Colombian Andes. University of Florida, 103 pp.
- Quiroz, R., León-Velarde, C., Valdivia, R., Zorogastúa, F.P., Baigorria, G., Barreda, C., Reinoso, J., Holle, M. y Li Pun, H., (2003). Making a difference to Andean livelihoods through an integrated research approach. En: Harwood, R.R., Kassam, A.H. (Eds.), *Research towards Integrated Natural Resources Management - Examples of Research Problems, Approaches and Partnerships in Action in the CGIAR*. FAO, Roma, Italia.
- Ramaekers, L., Remans, R., Rao, I.M., Blair, M.W. y Vanderleyden, J., (2010). Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field Crop Res.* **117**, 169-176.
- Ramesh, K., Biswas, A.K., Somasundaram, J. y Rao, A.S., (2010). Nanoporous zeolites in farming: Current status and issues ahead. *Curr. Sci. India* **99**, 760-764.
- Reed, S.C., Seastedt, T.R., Mann, C.M., Suding, K.N., Townsend, A.R. y Cherwin, K.L., (2007). Phosphorus fertilization stimulates nitrogen fixation and increases inorganic nitrogen concentrations in a restored prairie. *Appl. Soil Ecol.* **36**, 238-242.
- Reynel, C. y Felipe-Morales, C., (1990). Agroforestería tradicional en los Andes del Perú: Un inventario de tecnologías y especies para la integración de la vegetación leñosa a la agricultura. Proyecto FAO/Holanda/INFOR, Perú.
- Rhoades, R.E. y Bebbington, A.J., (1990). Mixing it up: Variations in Andean farmers' rationales for intercropping of potatoes. *Field Crop Res.* **25**:145-156.
- Ricketts, T.H., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Bogdanski, A., Gemmill-Herren, B., Greenleaf, S.S., Klein, A.M., Mayfield, M.M., Morandin, L.A., Ochieng, A., Potts, S.G. y Viana, B.F., (2008). Landscape effects on crop pollination services: Are there general patterns? *Ecol. Lett.* **11**, 499-515.

- Righi, G. y van der Hammen, T., (1996). Distribución de especies de lombrices en las dos vertientes de la Cordillera Central (transecto Parque Los Nevados, Colombia). En: Van der Hammen, T., dos Santos, A.G. (Eds.), Estudios de ecosistemas tropandinos 4, Berlin-Stuttgart, pp. 475-483.
- Robertson, G.P. y Swinton, S.M., (2005). Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: A grand challenge for agriculture. *Front. Ecol. Environ.* **3**, 38-46.
- Rodríguez, E.A., Bolaños B., M.M. y Menjivar Flores, J.C., (2010). Efecto de la fertilización en la nutrición y rendimiento de ají (*Capsicum spp.*) en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica* **59**, 55-64.
- Rodríguez, H., Fraga, R., González, T. y Bashan, Y., (2006). Genetics of phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth-promoting bacteria. *Plant Soil* **287**, 15-21.
- Rodríguez, K.R. y Ortúño, N., (2007). Evaluación de micorrizas arbusculares en interacción con abonos orgánicos como coadyuvantes del crecimiento en la producción hortícola del Valle Alto de Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova* **3**, 697-720.
- Romero-León, C.C., (2005). A multi-scale approach for erosion assessment in the Andes. Wageningen University, Wageningen, Países Bajos, 162 pp.
- Rosset, P.M., y Altieri, M.A., (1997). Agroecology Versus Input Substitution: a Fundamental Contradiction of Sustainable Agriculture. *Soc. Natur. Resour.* **10**, 283-295.
- Sánchez-Moreno, S. y Ferris, H., (2007). Suppressive service of the soil food web: Effects of environmental management. *Agric. Ecosyst. Environ.* **119**, 75-87.
- Sandor, J. y Eash, N., (1995). Ancient agricultural soils in the Andes of southern Peru. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **59**, 170-179.
- Sandor, J. y Furbee, L., (1996). Indigenous knowledge and classification of soils in the Andes of southern Peru. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60**, 1502-1512.
- Sarmiento, L., (2000). Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. *Mt. Res. Dev.* **20**, 1-9.
- Sarmiento, L., Acea, M., Barrios, E., Bowen, W., Herrera, R., Llambí, L., Ortúño, N., Sivila, R. y Varela, A., (2001). Un marco conceptual y metodológico para estudios de fertilidad del suelo en los Andes tropicales. Memorias del IV Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable en los Andes: La estrategia para el siglo XXI.
- Sarmiento, L. y Bottner, P., (2002). Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: Indications for fertility restoration. *Appl. Soil Ecol.* **19**, 78-79.
- Sarmiento, L., Monasterio, M. y Montilla, M., (1993). Ecological bases, sustainability, and current trends in traditional agriculture in the Venezuelan high Andes. *Mt. Res. Dev.* **13**, 167-176.
- Sau, F. y Minguez, M.I., (2000). Adaptation of indeterminate faba beans to weather and management under a Mediterranean climate. *Field Crop Res.* **66**, 81-99.
- Scarascia Mugnozza, G.C., Avila, G., Claure, T., Ríos, R., Pierola, L. y Crespo, M., (1987). Investigaciones sobre el mejoramiento genético y cultural de trigo duro, girasol, maíz, frijol, lupino y haba en Bolivia. Instituto Italo-Latinoamericano Fundación Pro-Bolivia, Centro de Investigaciones Fitogenéticas de Pairumani, Roma, Italia.
- Schuster, A. y Schmoll, M., (2010). Biology and biotechnology of Trichoderma. *Appl. Microbiol. Biot.* **87**, 787-799.
- Seneviratne, G., Jayasekara, A.P.D.A., De Silva, M.S.D.L. y Abeysekera, U.P., (2011). Developed microbial biofilms can restore deteriorated conventional agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* **43**, 1059-1062.
- Settimela, P., Chitalu, Z., Jonazi, J., Mambo, A., Hodson, D. y Banziger, M., (2005). Environmental classification of maize-testing sites in the SADC region and its implication for collaborative maize breeding strategies in the subcontinent. *Euphytica* **145**, 123-132.
- Sharma, S.N., (2003). Effect of phosphate-solubilizing bacteria on efficiency of Mussoorie rockphosphate in rice (*Oryza sativa*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system. *Indian J. Agr. Sci.* **73**, 478-481.

Referencias

- Sherwood, S.G., Monar, C. y Suquillo, J., (1999). Wachu rozado: Vestigio del pasado, oportunidad para el futuro. Centro Internacional de la Papa (CIP), Quito, Ecuador.
- Siddique, K.H.M., Regan, K.L., Tennant, D. y Thomson, B.D., (2001). Water use and water use efficiency of cool season grain legumes in low rainfall Mediterranean-type environments. *Eur. J. Agron.* **15**, 267-280.
- Sims, B., Rodríguez, F., Eid, M. y Espinoza, T., (1999). Biophysical aspects of vegetative soil and water conservation practices in the inter-Andean valleys of Bolivia. *Mt. Res. Dev.* **19**, 282-291.
- Sims, B.G. y Rodríguez, F., (2001). Forage production and erosion control as a complement to hillside weed management. International Workshop in Integrated Management for Sustainable Agriculture, Forestry and Fisheries, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.
- Singhai, P.K., Sarma, B.K. y Srivastava, J.S., (2011). Biological management of common scab of potato through *Pseudomonas* species and vermicompost. *Biol. Control* **57**, 150-157.
- Sivila de Cary, R. y Hervé, D., (1994). El estado microbiológico del suelo, indicador de una restauración de la fertilidad. En: Hervé, D. (Ed.), Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes. IBTA - OSTROM, La Paz, Bolivia, pp. 185-197.
- Sivila, R. y Hervé, D., (1999). Análisis de la microbiota en suelos cultivados del altiplano central. Primer Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Boliviana de la Ciencia del Suelo, La Paz, pp. 5-14.
- Sivila, R. y Angulo, W., (2006). Efecto del descanso agrícola sobre la microbiota del suelo (Patarani - Altiplano Central boliviano). *Ecología en Bolivia* **41**, 103-115.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A. y Paustian, K., (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* **241**, 155-176.
- Smaling, E.M.A. y Fresco, L.O., (1993). A decision-support model for monitoring nutrient balances under agricultural land-use (NUTMON). *Geoderma* **60**, 235-256.
- Smaling, E.M.A., Stooregel, J.J. y Windmeijer, P.N., (1993). Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales: II. District Scale. *Fert. Res.* **35**, 237-250.
- Smith, R.G., Gross, K.L. y Robertson, G.P., (2008). Effects of crop diversity on agroecosystem function: Crop yield response. *Ecosystems* **11**, 355-366.
- Smukler, S.M., Sánchez-Moreno, S., Fonte, S.J., Ferris, H., Klonsky, K., O'Green, A.T., Scow, K.M., Steenwerth, K.L. y Jackson, L.E., (2010). Biodiversity and multiple ecosystem functions in an organic farmscape. *Agric. Ecosyst. Environ.* **139**, 80-97.
- Snapp, S., Swinton, S.M., Labarta, R., Mutch, D., Black, J.R., Leep, R., Nyiraneza, J. y O'Neil, K., (2005). Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agron. J.* **97**, 322-332.
- Snapp, S.S., Mafongoya, P.L. y Waddington, S., (1998). Organic matter technologies for integrated nutrient management in smallholder cropping systems of southern Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* **71**, 185-200.
- Snapp, S.S. y Silim, S.N., (2002). Farmer preferences and legume intensification for low-nutrient environments. *Plant Soil* **245**, 181-192.
- Snoek, C., Vanderleyden, J. y Beebe, S., (2003). Strategies for genetic improvement of common bean and Rhizobia: Towards efficient interactions. *Plant Breeding Reviews* **23**, 21-72.
- Stadel, C., (1991). Environmental stress and sustainable development in the tropical Andes. *Mt. Res. Dev.* **11**, 213-223.
- Stanish, C., (2007). Agricultural intensification in the Titicaca basin. En: Thurston, T., Fisher, C. (Eds.), *Seeking a Richer Harvest*. Springer, New York, pp. 125-139.
- Swinton, S. y Quiroz, R., (2003). Poverty and the deterioration of natural soil capital in the Peruvian Altiplano. *Environ. Dev. Sustain.* **5**, 477-490.
- Takeda, M. y Knight, J.D., (2006). Enhanced solubilization of rock phosphate by *Penicillium bilaiae* in pH-buffered solution culture. *Can. J. Microbiol.* **52**, 1121-1129.

- Tapia, M., (1994). Rotación de cultivos y su manejo en los Andes del Perú. En: Hervé, D. (Ed.), Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes. IBTA - OSTROM, La Paz, Bolivia, pp. 37-53.
- Tenge, A.J., De Graaff, J. y Hella, J.P., (2004). Social and economic factors affecting the adoption of soil and water conservation in west Usambara highlands, Tanzania. Land Degrad. Dev. **15**, 99-114.
- Terrazas, F., Suárez, G., Gardner, G., Thiele, G., Devaux, A. y Walker, T., (1998). Diagnosing potato productivity in farmers fields in Bolivia. Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú.
- Thamer, S., Schädler, M., Bonte, D. y Ballhorn, D.J., (2011). Dual benefit from a belowground symbiosis: Nitrogen-fixing rhizobia promote growth and defense against a specialist herbivore in a cyanogenic plant. Plant Soil **341**, 209-219.
- Thibeault, J., Seth, A. y García, M., (2010). Changing climate in the Bolivian Altiplano: CMIP3 projections for temperature and precipitation extremes. Journal of Geophysical Research **115**, 1-18.
- Thies, J. y Grossman, J., 2006. The soil habitat and soil ecology. En: Uphoff, N. (Ed.), Biological Approaches to Sustainable Soil Systems. CRC Press, Boca Ratón, pp. 59-78.
- Thies, J. y Rillig, M., 2009. Characteristics of Biochar: Biological Properties. En: Biochar for Environmental Management., (J. Lehmann y S. Joseph, Eds), Earthscan, Londres, Reino Unido, pp. 85-105.
- Tisdall, J.M. y Oades, J.M., (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. Soil Sci. **62**, 141-163.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P.A., Shepherd, K.D. y Giller, K.E., (2005). Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya - II. Within-farm variability in resource allocation, nutrient flows and soil fertility status. Agric. Ecosyst. Environ. **110**, 166-184.
- Tonneijck, F., Jansen, B., Niero, K.G.J., Verstraten, J.M., Sevink, J. y De Lange, L., (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. Eur. J. Soil Sci. **61**, 392-405.
- Tonneijck, F. y Jongmans, G., (2008). The influence of bioturbation on the vertical distribution of soil organic matter in volcanic ash soils: A case study in northern Ecuador. Eur. J. Soil Sci. **59**, 1063-1075.
- Tourneux, C., Devaux, A., Camacho, M.R., Mamani, P. y Ledent, J.F., (2003a). Effect of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (II): Water relations, physiological parameters. Agronomie **23**, 181-190.
- Tourneux, C., Devaux, A., Camacho, M.R., Mamani, P. y Ledent, J.F., (2003b). Effects of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (I): Morphological parameters, growth and yield. Agronomie **23**, 169-179.
- Urgiles, N., Loján, P., Aguirre, N., Blaschke, H., Günter, S., Stimm, B., y Kottke, I., (2009). Application of mycorrhizal roots improves growth of tropical tree seedlings in the nursery: a step towards reforestation with native species in the Andes of Ecuador. New Forest. **38**, 229-239.
- Valdivia, C. y Quiroz, R., (2003). Coping and adapting to increased climate variability in the Andes. Annual meeting, presentation at the American Agricultural Economics Association.
- Valdivia, C., Seth, A., Gilles, J., García, M., Jiménez, E., Cusicanqui, J., Navia, F. y Yuca, E., (2010). Adapting to climate change in Andean ecosystems: Landscapes, capitals, and perceptions shaping rural livelihood strategies and linking knowledge systems. Ann. Assoc. Am. Geogr. **100**, 818-834.
- Valente, J.F. y Oliver, R., (1993). Fertisuelos: Evaluación de la fertilidad de los suelos del altiplano, valle central y los llanos de Bolivia. FAO, Roma, Italia.
- van de Kop, P., (1996). Regional scale nutrient balances for agro-ecosystems in Ecuador. Department of Agronomy. Wageningen Agricultural University, Wageningen, Países Bajos. 43 pp.

Referencias

- van Groenigen, K.J., Six, J., Hungate, B.A., de Graaff, M., van Breemen, N. y van kessel, C., (2006). Elemental interactions limit soil carbon storage. *P. Natl. Acad. Sci.-USA.* **103**, 6571-6574.
- Vanek, S., (2010). Legume-phosphorus synergies in mountain agroecosystems: field nutrient balances, soil fertility gradients, and effects on legume attributes and nutrient cycling in the Bolivian Andes. Cornell University.
- Vanlauwe, B., Tittonell, P. y Mukalama, J., (2006). Within-farm soil fertility gradients affect response of maize to fertiliser application in western Kenya. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **76**, 171-182.
- Vanlauwe, B., Wendt, J. y Diels, J., (2001). Combined application of organic matter and fertilizer. En: Tian, G. (Ed.), *Sustaining Soil Fertility in West-Africa*. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 247-279.
- Vargas, C.A., (2009). Sistema de innovación agropecuaria y forestal. *Revista de Agricultura (Cochabamba, Bolivia)* **45**, 2-9.
- Velásquez, E., Lavelle, P. y Andrade, M., (2007). GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biol. Biochem.* **39**, 3066-3080.
- Verma, M., Brar, S.K., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y. y Valero, J.R., (2007). Antagonistic fungi, Trichoderma spp.: panoply of biological control. *Biochem. Eng. J.* **37**, 1-20.
- Vinale, F., Krishnapillai, S., Ghisalberti, E.L., Marra, R., Woo, S.L. y Lorito, M., (2008). Trichoderma-plant-pathogen interactions. *Soil Biol. Biochem.* **40**, 1-10.
- Vitousek, P.M., Naylor, R., Crews, T., David, M.B., Drinkwater, L.E., Holland, E., Johnes, P.J., Katzenberger, J., Martinelli, L.A., Matson, P.A., Nziguheba, G., Ojima, D., Palm, C.A., Robertson, G.P., Sánchez, P.A., Townsend, A.R. y Zhang, F.S., (2009). Nutrient imbalances in agricultural development. *Science* **324**, 1519-1520.
- Vos, J.y Oyarzún, P.J., (1987). Photosynthesis and stomatal conductance of potato leaves - effect of leaf age, irradiance, and leaf water potential. *Photosynthesis Research* **11**, 253264
- Vos, J. y Oyarzún, P.J., (1988). Water relations of potato leaves. II. Pressurevolume analysis and inferences about the constancy of the apoplastic fraction. *Annals of Botany* **62**, 449-454.
- Wall, P., (1999). Experiences with crop residue cover and direct seeding in the Bolivian highlands. *Mt. Res. Dev.* **19**, 313-317.
- Wang, K.H., Sipes, B.S. y Schmitt, D.P., (2002). *Crotalaria* as a covercrop for nematode management: review. *Nematrópica* **32**, 35-57.
- Warnock, D.D., Lehmann, J., Kuyper, T.W. y Rillig, M.C., (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant Soil* **300**, 9-20.
- Weil, R., Islam, K.R., Stine, M.A., Gruver, J.B. y Samson-Liebig, S.E., (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *Am. J. Altern. Agric.* **18**, 3-17.
- Wheeler, T.R., Keatinger, H., Ellis, R.H. y Summerfield, R.J., (1999). Selecting legume cover crops for hillside environments in Bolivia. *Mt. Res. Dev.* **19**, 318-324.
- Wiegers, E.S., Hijnmans, R.J., Hervé, D. y Fresco, L.O., (1999). Land use intensification and disintensification in the Upper Canete valley, Peru. *Hum. Ecol.* **27**, 319-357.
- Winklerprins, A., (1999). Local soil knowledge: a tool for sustainable land management. *Soc. Natur. Resour.* **12**, 151-161.
- Winters, P., Espinosa, P. y Crissman, P., (1998). Manejo de los Recursos en los Andes Ecuatorianos: Revisión de Literatura y Evaluación del Proyecto Manejo del Uso Sostenible de Tierras Andinas (PROMUSTA) de CARE. Centro Internacional de la Papa, Quito, Ecuador.
- Woomer, P. y Swift, M.J., (1994). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley, Chichester, Reino Unido.
- Wu, L., Vomocil, J.A. y Childs, S.W., (1990). Pore-size, particle-size, aggregate size, and water-retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54**, 952-956.
- Young, A., (1997). *Agroforestry for Soil Management*. CAB International, Oxon, Reino Unido.

- ZebARTH, B.J., TARN, T.R., DE JONG, H. y MURPHY, A., (2008). Nitrogen use efficiency characteristics of andigena and diploid potato selections. *Am. J. Potato. Res.* **85**, 210-218.
- ZEHETNER, F. y MILLER, W.P., (2006). Soil variations along a climatic gradient in an Andean agro-ecosystem. *Geoderma* **137**, 126-134.
- ZHU, J.M., KAEPPLER, S.M. y LYNCH, J.P., (2005). Topsoil foraging and phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays*). *Funct. Plant Biol.* **32**, 749-762.
- ZIMMERER, K., (1993). Soil erosion and labor shortages in the Andes with special reference to Bolivia, 1953-91: Implications for "conservation-with-development". *World Dev.* **21**, 1659-1675.
- ZIMMERER, K.S., (2011). The landscape technology of spate irrigation amid development changes: Assembling the links to resources, livelihoods, and agrobiodiversity-food in the Bolivian Andes. *Glob. Environ. Chang.* in press.
- ZURITA, G.L., (1997). Composición taxonómica y abundancia poblacional de lombrices en sistemas de monocultivo y rotación de cultivos en Suka Kollus. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

