

Construcción de un balance de nitrógeno en cultivos de papa bajo rotación con largo descanso

Building nitrogen balance in post-fallow potato crops

Dominique Hervé¹, Víctor Mita² & Marie-Madeleine Coûteaux³

¹Institut de Recherche pour le Développement, IRD, LER, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5. Fax: 0467638778, E-mail: herve@mpl.ird.fr

²IRD, Casilla 9214, La Paz, Bolivia. e-mail: victormita@yahoo.es

³Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, CNRS, 1919 route de Mende, 34293 Montpellier Cedex 5, Francia. email: marie-madeleine.couteaux@cefe.cnrs.fr

Resumen

En el Altiplano boliviano, el pequeño productor busca asegurar su cultivo de papa a pesar del clima sin gastar en insumos químicos. Tratamos con un balance de nitrógeno en planta dos preguntas del proyecto TROPANDES: ¿Cómo el cultivo de papa valoriza la ganancia de nitrógeno que resulta del descanso del suelo y qué fracción de este nitrógeno queda para un otro cultivo de papa? Analizamos después de tres a cinco años de descanso, la sucesión papa-papa (papa dulce: *Solanum tuberosum* subsp. *andigena* y papa amarga: *Solanum x Juzepczukii*) en tres sitios del Altiplano central boliviano, durante dos ciclos 1998-2000. Se cultiva como el campesino, fertilizando con estiércol seco de ovino, incorporando al suelo los residuos de cultivo, pero con una prevención de plagas y enfermedades. La biomasa de hojas, tallos, raíces y tubérculos y su contenido en nitrógeno total fueron evaluados en la cosecha y el nitrógeno mineral del suelo, en la siembra y en la cosecha. Quedan establecidas las modalidades del cálculo del balance de nitrógeno en el cultivo de papa. La disponibilidad de nitrógeno a partir del estiércol es significativa solo en el segundo año y a partir de los residuos de papa es muy reducida. Las necesidades de la papa son muy bajas en comparación al stock de nitrógeno en el suelo. La variabilidad inter-anual de los rendimientos es alta y debida mayormente al clima. El balance de nitrógeno en el cultivo y en el suelo fue deficitario al final del primer ciclo y excedentario para todos los tratamientos al final del segundo. Este balance estático deduce de las exportaciones netas del cultivo lo que el suelo debe proveer. Para evaluar la disponibilidad de formas de nitrógeno asimilables por los cultivos, en sus épocas de mayor demanda, convendría realizar un análisis de flujos.

Palabras claves: Descanso, Balance de nitrógeno, Papa, Estiércol ovino, Altiplano boliviano.

Abstract

In the Bolivian Altiplano the small farmer aims to insure his production against climatic risks without costly chemical inputs. We exposed two questions studied in the European project TROPANDES: how to mobilize in the potato crop the soil nitrogen improvement due to fallowing and what fraction of this stock is still available for a second potato crop? The effect of fallowing on potato yields and of potato crop on its next yield are evaluated with a plant and soil nitrogen balance. Potato-potato rotation (with potato *Solanum tuberosum* subsp. *andigena* and bitter potato *Solanum x Juzepczukii*) after 3 to 5 years fallowing, is evaluated in three sites near the Patacamaya experimental station during 1998-99 and 1999-2000. The plots with low initial soil nitrogen were

managed according to the peasant practices, applying ovine dung at potato planting and incorporating crop residues to soil. Treatments against pests and diseases were performed if necessary. Potato leaf, stem, root and tuber biomass, and total nitrogen of each compartment, were measured at harvest time; soil mineral nitrogen was measured at planting and harvesting. The basis for nitrogen balance calculation was defined in potato crops. Nitrogen availability from dung was significant only during the second year. Nitrogen availability from potato residues is very low. Potato needs are very low relatively to the total soil nitrogen. Yield variability is high, mainly due to climate. The crop and soil nitrogen balance was negative at the end of the first potato crop and positive in all treatments at the end of the second potato harvest. This static balance deduces from crop net exportation, the soil N contribution. To analyse the dynamic availability of nitrogen and its synchronisation with the plant requirements, flux analysis is needed.

Key words: Fallow, Nitrogen balance, Potato, Ovine dung, Bolivian high plateau.

Introducción

El descanso del suelo es un periodo no sometido a cultivo, limitado en el tiempo e incluido en un sistema de rotación de cultivos. En los Andes centrales la papa está cultivada en seco luego de un largo descanso (unos diez años), que permite al productor asegurar su producción sin gastar en insumos (Orlove *et al.* 1996). Los ecólogos estudian la evolución de la riqueza y la diversidad de las especies a lo largo de la sucesión secundaria en terrenos en descanso. Aquí estudiamos el componente nitrogenado de la fertilidad del suelo en el cultivo de papa que sigue este prolongado descanso. El agrónomo se pregunta

¿Cómo el cultivo de papa valoriza la ganancia de nitrógeno que resulta del descanso del suelo y qué fracción de este nitrógeno queda para los siguientes cultivos de la rotación? En efecto, queda por explicar ¿por qué en los Andes centrales el suelo descansado no soporta más de tres años sucesivos de cultivo?

En la puna central de Perú y Bolivia (400-600 mm de precipitación anual en el rango altitudinal 3.800-4.000 m), la papa se cultiva en primero después de un largo descanso, seguida por dos años de cultivo de cebada o quinua (Hervé *et al.* 1994). En el páramo ecuatoriano, con mayores precipitaciones (700-800 mm y entre 3.100-3.600 m), la sucesión papa-cebada se practica en suelos volcánicos ácidos de

pendiente pronunciada (Bossio & Cassman 1991, Nieto-Cabrera *et al.* 1997). En el páramo venezolano (1.000 mm), la sucesión original después de roturar el páramo era papa-trigo (De Robert & Monasterio 1993), pero se convirtió en varios años sucesivos de papa después de un descanso de duración variable, según los precios del mercado (Sarmiento *et al.* 1993). La modelización del sistema de cultivo: descanso-papa-cebada es una tarea prioritaria en la ecoregión andina.

Pestalozzi (2000) estudió la recuperación de la fertilidad del suelo durante el descanso en suelos ácidos ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 4.8$) entre 4.000 y 4.360 m (Japo, provincia Tapacari, Cochabamba). En estas condiciones, donde el nitrógeno total del suelo es relativamente alto ($\text{Nt} = 0.2\%$), el autor interpreta las variaciones del rendimiento de papa, cultivada en parcelas de descanso largo (9 a 20 años), con la biomasa incorporada en la labranza y la fertilización en fósforo. Después de nueve años de descanso, la vegetación natural alcanza 20 t ha⁻¹ y las biomásas incorporadas, 10 t ha⁻¹. Las condiciones que encontramos en el Altiplano boliviano (provincia Aroma, La Paz) son cercanas en altitud (3.800-3.900 m), pero con un suelo no ácido ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 6.7$ a 6.9) y un contenido de nitrógeno total muy bajo ($\text{Nt} = 0.063\%$ después de 20 años de descanso). Construimos un balance de nitrógeno en papa, para estudiar el efecto precedente del descanso - ya que la papa

está cultivada sin fertilización salvo estiércol de ovino, después de un descanso de 3-5 años - y el efecto siguiente del cultivo, en que repetimos el cultivo de papa durante dos años. En otros artículos, se interpreta los rendimientos de papa después del descanso (Hervé & Mita 2001) y se relacionan las características del suelo con la biomasa elaborada según la duración del descanso (Ortuño *et al.*, en este número especial).

Se describe en primer lugar la sucesión de cultivos practicada por el agricultor; luego se detalla el método adoptado para construir el balance de nitrógeno. De los aportes en nitrógeno de la semilla de papa y de la mineralización del estiércol y de los residuos de cultivo, se quita el nitrógeno absorbido por el cultivo de papa. Así se determina por diferencia lo que debería provenir del suelo y luego se compara con datos disponibles de nitrógeno en el suelo. De esta forma, se ilustra cómo construir un balance de nitrógeno en cultivos de papa, así como los problemas metodológicos que se presentan y el uso de este balance para comprender el ciclo del nitrógeno en el suelo (Janssen 1999, Haverkort & MacKerron 2000).

Metodología

Dispositivo de parcelas

Con la finalidad de garantizar una producción de papa frente a los riesgos de helada y de variar el contenido inicial de nitrógeno del suelo, se escogieron tres sitios del Altiplano central boliviano (Fig. 1) en suelos coluviales de textura franco-arenosa muy similar (Tabla 1). Los sitios de Patacamaya (P) después de tres años de descanso y de Patarani (I) después de cinco años de descanso, quedan referenciados con la estación meteorológica de la estación experimental de Patacamaya. Huaraco (H), después de cinco años de descanso, tiene una estación meteorológica propia más al Sur, cuyos datos de temperatura mínima se corrigen para

tomar en cuenta la diferencia de altura entre esta estación y la parcela.

Las parcelas, una en cada sitio, son designadas por la letra P, I o H, seguida de la letra D por papa dulce o A por papa amarga el primer año (1998-1999) y repitiendo esta letra para el segundo año de cultivo (1999-2000) (Tabla 2). La siembra de un segundo año de papa es raras veces practicada en el Altiplano boliviano, debido a mayores riesgos de plagas y enfermedades, pero es necesaria cuando no fue posible labrar las parcelas en descanso en el momento adecuado. Nos preguntamos qué cantidad de nitrógeno sigue disponible en el suelo luego de dos ciclos sucesivos de papa, comparando papa dulce y amarga, respectivamente sensible y resistente a heladas y sequías (Del Castillo 1995, Hijmans *et al.* 2003). La papa dulce (D) corresponde a *Solanum tuberosum* subsp. *andigena* var. *imilla negra* en 1998-99 y var. *gendarme* en 1999-00, mientras que la papa amarga (A) pertenece a *Solanum x juzepczukii* var. *luki* en 1998-99 y var. *moroco luki* en 1999-00 (Ochoa 2001). Las parcelas estudiadas son parcelas cultivadas por los agricultores sin fertilización química, donde se impone una semilla de una sola variedad y de calidad conocida, así como tratamientos fitosanitarios adecuados (Tabla 2). Los ingresos (semilla, estiércol de ovino) y las salidas (papa, biomasa) son controlados, evaluando tres repeticiones por parcela y tres surcos de 20 plantas por repetición.

Condiciones climáticas

Las fechas de las operaciones culturales según los tratamientos (Tabla 2) posicionan a los ciclos de cultivo en relación a las precipitaciones y heladas (Tabla 3). El periodo vegetativo con precipitaciones y sin heladas es más largo en 1998-1999 (en Huaraco y luego en Patacamaya-Patarani) y más corto en 1999-2000. La única parcela en pendiente es la de Huaraco (4%), donde el impacto de las heladas es reducido. En 1998-99, en Patacamaya y Patarani, luego de

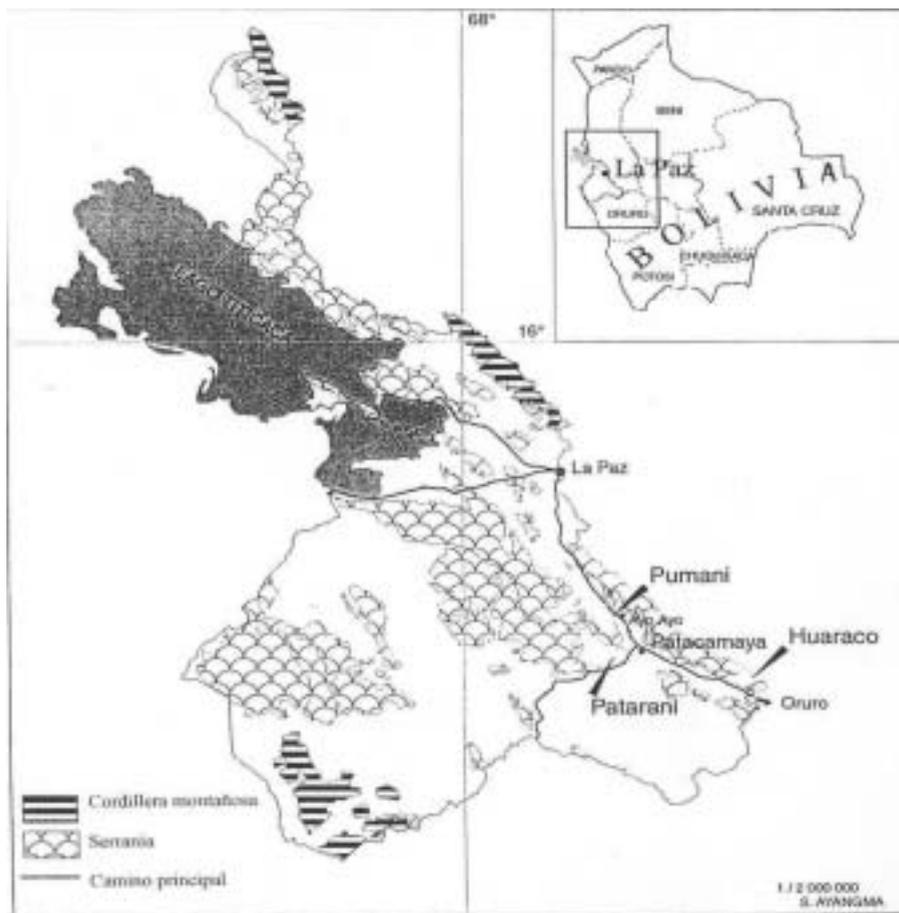


Fig. 1: Localización de las zonas de estudio.

precipitaciones en octubre, se tuvo que esperar el mes de enero para la emergencia y el crecimiento de la papa; el periodo libre de heladas y con precipitaciones duró 114 días (Tabla 3). En Huaraco, las precipitaciones fueron mejor repartidas desde el mes de octubre y más abundantes hasta febrero, totalizando 137 días con precipitaciones y sin heladas. Este alargamiento del ciclo vegetativo contribuye al rendimiento obtenido en papa este año en Huaraco. En 1999-2000, tanto en Patacamaya y Patarani como en Huaraco, las precipitaciones fueron reducidas y la última helada llegó

temprano; la época libre de heladas y con precipitaciones duró 100 días, como consecuencia los rendimientos fueron bajos.

Prácticas de cultivo

Con la labranza se incorpora el material vegetal desarrollado durante el descanso, o mejor dicho lo que queda después de extraer los arbustos para leña, siete meses previamente a la siembra. Este aporte de biomasa al suelo es sobre todo subterráneo. La descomposición de este material se refleja en el nitrógeno del suelo

Tabla 1: Textura del suelo.

Textura	Arena %	Limo %	Arcilla %
Patacamaya			
0-20 cm	64.5	24.0	11.5
20-40 cm	57.9	28.3	13.8
Patarani			
0-20 cm	81.8	4.6	13.6
20-40 cm	61.5	25.1	13.4
Huaraco			
0-20 cm	69.9	19.0	11.1
20-40 cm	72.8	16.1	11.1

Tabla 2: Tratamientos y fechas de ambos ciclos de cultivo de papa. Abreviaciones: I = Patarani, P = Patacamaya, H = Huaraco, D = Papa dulce, A = Papa amarga; DD = dos años de papa dulce, AA = dos años de papa amarga. Símbolos: *Karate 0.5 ml L-1, contra la polilla *Phthorimaea operculella* (dos tratamientos), **Mancoceb 5 gr L-1, contra *Alternaria solani* y *Phytophthora infestans*. Cultivares:

1998-1999 D : *Solanum tuberosum* subsp. *andigena* "imilla negra"
A : *Solanum x juzepczukii* var. *luki*
1999-2000 D : *Solanum tuberosum* subsp. *andigena* "gendarme"
A : *Solanum x juzepczukii* var. *moroco luki*

Ciclo	1998 - 1999			1999 - 2000		
Sitio	Patarani	Patacamaya	Huaraco	Patarani	Patacamaya	Huaraco
Tratamiento	ID/IA	PD/PA	HD/HA	IDD/IAA	PDD/PAA	HDD/HAA
Siembra	24/11/98	11/11/98	12/11/98	05/11/99	05/11/99	24/11/99
Aporque	9/01/99	8/01/99	8/01/99	08/01/00	12/02/00	12/02/00
Insecticida*	9/02, 20/02	9/02, 20/02	13, 20/02	9/01, 9/02	9/01, 9/02	9/01, 9/02
Fungicida**				19/03		19/03
Cosecha	5-6/05/99	24/04/99	15/05/99	30/04/00	29/04/00	30/04/00

medido antes de la siembra. Se aplica el estiércol seco de ovino en chorro continuo a lo largo del surco, entre los tubérculos semilla que son luego tapados con el arado. El aporque, uno a dos meses después de la siembra, y la cosecha de papa son operaciones manuales. Los rastrojos de papa (raíces, tallos, hojas) resultan mezclados con la tierra en la cosecha, pero las

condiciones de descomposición no son óptimas durante la época seca y fría de abril a octubre. El trabajo del arado para la siguiente siembra de papa homogeniza esta mezcla en los 0-20 cm. En algunos años de déficit forrajero, estos rastrojos pueden ser consumidos por vacunos y ovinos durante la etapa entre cultivos. En la segunda siembra de papa, en noviembre, se aporta de nuevo estiércol de ovino.

Tabla 3: Precipitaciones mensuales y época húmeda libre de heladas durante los ciclos de cultivo (1998-1999 y 1999-2000).

Meses del ciclo de cultivo	11 desde siembra	12	01	02	03	04	Total 11 - 04 (mm)
1998-1999							
Patacamaya Patarani							
Lluvia (mm)	0	4.1	67.2	67.3	162.5	32.8	334
1 ^{era} lluvia		21/12	114 días				
Heladas	19/11					14/04	
Huaraco							
Lluvia (mm)	52.2	16.5	88.8	96.9	126.1	17.6	398
1 ^{era} lluvia	18/11						
Heladas	27/11			137 días		14/04	
1999-2000							
Patacamaya Patarani							
Lluvia (mm)	1.0	26.2	148.6	61.5	78.8	0	316
1 ^{era} lluvia		23/12	100 días				
Heladas		18/12				2/04	
Huaraco							
Lluvia (mm)	0	36.4	116.9	71.9	38.6	2.2	266
1 ^{era} lluvia		9/12					
Heladas		18/12		101 días		30/03	

Etapas del cálculo del balance de nitrógeno

Construimos un balance de nitrógeno en el cultivo de papa en tres etapas; las ecuaciones respectivas se enumeran con los números en corchetes.

Balance de N en el cultivo de papa

El balance de nitrógeno en cultivo de papa se mide por la diferencia entre ingresos (nitrógeno de la semilla de papa y nitrógeno liberado por los abonos orgánicos) y salidas (nitrógeno de los órganos de la papa), según las siguientes ecuaciones:

$$N \text{ papa absorbido} = N \text{ tubérculos} + N \text{ tallos} + N \text{ hojas} + N \text{ raíces} \quad [1]$$

$$N \text{ balance papa} = N \text{ tubérculo semilla} + (N_g + N_r) - N \text{ papa absorbido} \quad [2]$$

Donde, para N tubérculo semilla, se estima que la totalidad del nitrógeno de la papa semilla ha sido liberada en el suelo hasta la cosecha.

N_g = N liberado por el estiércol durante el ciclo del cultivo de papa. El nitrógeno liberado proviene del estiércol aportado en el cultivo precedente a la papa (si es el caso) y del estiércol aportado en la siembra el mismo año.

N_r = N liberado por los residuos de la primera cosecha de papa (hojas, tallos, raíces) durante el segundo año de cultivo de papa.

Se utilizaron evaluaciones realizadas en Patacamaya de las tasas de mineralización del estiércol ovino y de los residuos de cosecha de papa.

Balance de N en el suelo

La diferencia de nitrógeno mineral del suelo entre siembra y cosecha, que llamamos N balance suelo, mide el nitrógeno mineral potencial para el cultivo:

$$N \text{ balance suelo} = (N_i \text{ 0-20 cm} - N_f \text{ 0-20 cm}) + (N_i \text{ 20-40 cm} - N_f \text{ 20-40 cm}) \text{ [3]}$$

Donde, N_i = Nitrógeno inicial medido en la siembra, N_f = Nitrógeno final medido en la cosecha.

Analizamos muestras de suelo en dos profundidades: 0-20 cm para incluir la capa removida con el arado de palo (15-20 cm) y 20-40 cm para incluir el enraizamiento máximo observado en la papa (25-35 cm). En 1998-1999 se tuvo que aproximar el nitrógeno mineral del suelo solo con el análisis disponible de nitrato y en 1999-2000 con nitrato más amonio (determinación realizada por el Laboratorio de Calidad Ambiental-Instituto de Ecología, en La Paz). El nitrógeno mineral del suelo depende de varios procesos, aporte en las precipitaciones, mineralización, pérdida por lixiviación y extracción por el cultivo, pero es probable que la comparación del nitrógeno total, entre la siembra y la cosecha del cultivo, no hubiera dado diferencia significativa.

Balance de N en suelo y papa

El N balance suelo-papa resulta del balance entre los ingresos al suelo y las salidas netas del cultivo:

$$N \text{ balance suelo-papa} = (N \text{ balance papa [2]} + N \text{ balance suelo [3]}) \text{ [4]}$$

Si este balance es negativo, es que otro aporte del suelo y de origen orgánico ha

compensado este déficit. Si este balance es positivo, significa que constituye un aporte mineral al suelo, eventualmente disponible para el cultivo siguiente.

Resultados

Datos de biomasa

Algunos ajustes fueron necesarios para superar la falta de datos sobre biomasa fraccionada de los órganos de la papa; están señalados con una numeración entre paréntesis en el texto y en las tablas 4, 5 y 8. En 1998-99, la proporción de hojas sobre tallos en la biomasa aérea fue evaluada sobre nueve plantas en Huaraco: 3.57 para papa dulce (coeficiente de variación CV = 23%) y 3.15 para papa amarga (CV = 35%). Se utilizaron estas tasas para calcular las biomásas de hojas y tallos en función de la biomasa aérea en otros sitios y años, anotando (1) en las tablas 4 y 8.

El trabajo para evaluar la biomasa de raíz es muy pesado. Dizes (1992) nota en un ensayo de papa llevado a cabo en Belén, en el Altiplano norte boliviano, que el peso de raíces no sigue al peso de los tubérculos. Entonces se evaluó este peso en base a la biomasa aérea. La proporción de biomasa de raíz sobre biomasa aérea fue medida en la cosecha 1999 para cada tratamiento: 0.62 (ID), 0.61 (IA), 1.36 (PD), 1.21 (PA), 0.38 (HD), 0.42 (HA) (Tabla 4) y extrapolada en la cosecha 2000, indicando (2) en la tabla 8. En un mismo sitio, esta tasa varía muy poco entre papa dulce y amarga. Sus valores más altos en Patacamaya se deben a una biomasa radicular favorecida por una remoción del suelo más profunda con arado de discos y una producción de biomasa aérea muy baja.

Se conoce el peso fresco de tubérculo-semilla por unidad de superficie. La papa amarga tiene más materia seca que la papa dulce. Se asume para cada cultivar el mismo valor de la humedad del tubérculo que el promedio de lo cosechado en los tres sitios: Patarani, Patacamaya y

Tabla 4: Ingresos y salidas de biomasa en un primer ciclo de papa dulce y papa amarga (1998 – 1999). Abreviaciones: I = Patarani, P = Patacamaya, H = Huaraco, D = papa dulce, A = papa amarga. (1) La MS de tallos y hojas se deduce de la biomasa aérea por cálculo en base a la proporción hojas/tallos medida en Huaraco.

Tratamientos	ID	PD	HD	IA	PA	HA
Ingresos (MS kg ha-1)						
Estiércol	1290	2152	2118	1087	1984	1923
Tubérculo						
Semilla	1001	285	305	1086	249	282
Salidas (MS kg ha-1)						
Tubérculos	1494	1368	9892	1394	1783	7892
Tallos	(1) 55.6	(1) 65.4	159.5	(1) 62.4	(1) 80.3	161.7
Hojas	(1) 198.4	(1) 233.6	569.5	(1) 196.6	(1) 252.8	509.3
Raíces	157.5	407	274.8	156.7	402.8	281.5
Profundidad raíz (cm)	23.7	35.3	35	23.3	30.1	33.6

Tabla 5: Contenido en nitrógeno de ingresos y salidas de biomasa (1998-1999). Leyenda: (a) CHN (Laboratorio de Calidad Ambiental, Instituto de Ecología, Bolivia); (b) Nirs, datos corregidos sin agua ni ceniza, CHN (Carbo – Erba), CEFÉ-CNRS, Francia; (1) Para Patarani (ID), se tomó el promedio entre los datos de Patacamaya (PD) y Huaraco (HD); (2) El mismo contenido en nitrógeno esta adoptado por los tres sitios; (3) El contenido en nitrógeno de raíz, medido en Patacamaya (PD), se aplicó a Patarani (ID).

Tratamientos	ID	PD	HD	IA	PA	HA
Ingresos (% MS)						
Estiércol (a)	1.3	1.4	1.5	1.3	1.4	1.5
Tubérculo semilla	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
Salidas (% MS) (b)						
Tubérculos	0.67	0.65	0.82	0.82	0.65	1.04
Tallos	(1) 0.64	0.61	0.67	(2) 0.71	(2) 0.71	(2) 0.71
Hojas	(1) 1.65	1.63	1.68	1.29	1.34	1.24
Raíces	(3) 0.81	0.81	1.10	0.47	0.59	1.18

Huaraco con 73% para papa dulce y 71% para papa amarga en el ciclo 1998-99, 69% para papa dulce y 58% para papa amarga en el ciclo 1999-2000. No se toma en cuenta en el cálculo el peso de tubérculo-semilla que pudo sobrar hasta la cosecha, por ser muy variado. En la cosecha 1999, los tubérculo-semillas que quedaban en algunas plantas pesaban entre 1-55 gramos de materia fresca.

Datos de nitrógeno

Los valores de nitrógeno total del estiércol entre 1.3-1.8 % de materia seca (Tablas 5 y 9) son coherentes con los análisis de estiércol de ovino hechos en Huaraco por Ruíz & Bustamante (1988): materia orgánica = 63.3%, nitrógeno total = 1.28%, materia seca = 32% y con los valores promedios que el programa FAO-SNAG (1995) indica para el estiércol de ovino en Bolivia: pH = 7.5; N = 1.35%, C/N = 25.2.

Los contenidos en nitrógeno total de los órganos de papa (Tablas 5 y 9) son muy bajos en comparación con las referencias en papa dulce, sean generales o específicas de cultivares andinos (Tabla 12). Los contenidos en nitrógeno del tubérculo y de las hojas se acercan a los valores mínimos citados en la tabla 12, con 0.8% MS y 1.5% MS, respectivamente; el nitrógeno de las raíces es más variable y más cercano a la composición de los tallos que de las hojas.

Para el nitrógeno del suelo, se estima a partir de los datos de 1999-2000 (Tabla 10 a, b) la proporción de nitrato (Nt) sobre el nitrógeno mineral (Nm) en 55.5% (promedio entre 26-76%) y se aplica al contenido en nitratos del suelo en 1998-99 para evaluar el nitrógeno mineral (Tabla 7). Morales (1994) encontró en lugares semi-naturales de Huaraco un porcentaje de nitrato sobre el nitrógeno total del suelo que fluctúa alrededor de 50%, entre 20-80%, pudiendo alcanzar hasta 100% en suelo cultivado.

Balance de nitrógeno

El balance de nitrógeno consiste en comparar los ingresos y salidas en el sistema suelo durante el ciclo de cultivo de papa y estimar las cantidades en stock. Este balance estático, basado principalmente en la biomasa vegetal y secundariamente en los datos de suelo disponibles, permite formular preguntas iniciales sobre las fuentes de nitrógeno movilizadas en el suelo.

Balance de N en el cultivo de papa

Con los ingresos y salidas de biomasa en cada tratamiento (Tablas 4 y 8) y su contenido en nitrógeno (Tablas 5 y 9), se realizó un balance de nitrógeno en suelo y plantas de papa en cada ciclo de cultivo (Tablas 7 y 11). La papa amarga tenía más tallos y menos hojas que la papa dulce. Obviamente, las salidas de N por tubérculos son las más altas. Coûteaux *et al.* (2003) han evaluado las tasas de descomposición de deyecciones ovinas y de residuos de cultivo de papa durante dos años con la técnica de *litter-bags*. Las bolsas de descomposición enterradas con estiércol o con residuos vegetales en un cultivo de papa son desenterradas antes de cada operación cultural y luego enterradas de nuevo. No se toma entonces en cuenta el efecto que podrían tener las operaciones culturales sobre la dinámica de mineralización de la materia orgánica. En base a las fechas de extracción de las bolsitas de descomposición, se han extrapolado las tasas de liberación de nitrógeno en función del nitrógeno inicial. El estiércol ovino ha liberado a los seis meses (177 días) 35.4% del nitrógeno inicial en papa dulce y 32.2% en papa amarga y a los 18 meses (535 días) 62.4% del nitrógeno inicial en papa dulce y 45.7% en papa amarga, respectivamente. Se recalca una diferencia significativa entre papa dulce y papa amarga en el aprovechamiento del estiércol, sobre todo durante el segundo año que ha sido más seco. No se ha liberado más nitrógeno a los 24 meses

Tabla 6: Balance de nitrógeno del suelo entre la siembra y la cosecha (1998-1999). Abreviaciones: Nm* = nitrógeno mineral del suelo, estimado en base a nitrato, según el coeficiente medido de Nt/Nm.

Nitrógeno del suelo	Nitrato siembra (mg kg ⁻¹)	Nitrato cosecha (mg kg ⁻¹)	Balance nitrato (mg kg ⁻¹)	Balance Nm* (mg kg ⁻¹)	Densidad aparente (g/cm ³)	Balance Nm (kg/ha)
Patarani						
				ID		
0-20 cm	1.05	0.84	0.21	0.42	1.51	1.27
20-40 cm	1.05	1.69	- 0.64	- 1.28		- 3.86
Patacamaya						
				PD		
0-20 cm	2.03	-	-		1.49	
20-40 cm	1.05	-	-			
Huaraco						
				HD		
0-20 cm	9.24	1.04	8.2	16.4	1.53	50.18
20-40 cm	1.33	1.19	0.14	0.28		0.86
Huaraco						
				HA		
0-20 cm	9.24	0.3	8.94	12.77	1.4	35.76
20-40 cm	1.33	0.88	0.45	0.75		2.1

o sea que solo queda el efecto físico de esta materia orgánica estable para un tercer año de cultivo.

Los residuos del cultivo de papa, medidos en 1999, se distinguen por su composición en nitrógeno entre las hojas y los tallos con las raíces. Después de 12 meses de incorporar estos residuos al suelo, que incluyen seis meses del periodo inter-cultivo entre cosecha y siembra así como los seis meses del cultivo siguiente de papa, ha sido liberado 72.4% del nitrógeno inicial de las hojas de papa dulce y 69.3% de la papa amarga; 53.2% de los tallos y raíces de papa dulce y 75.4% de los de papa amarga. Para el segundo año, estos porcentajes se aplican solo al saldo del nitrógeno inicial, no liberado durante el primer cultivo de papa. Las hojas se descomponen más rápidamente que los tallos y raíces (Tabla 11). Las hojas de papa amarga se mineralizan menos que las de la papa dulce y sucede lo inverso para tallos y raíces. Se sabe que la papa amarga acumula glicoalcaloides en sus tubérculos, pero no se

sabe si se forman en sus hojas antes de la tuberización y si pueden tener influencia sobre una menor descomposición de estos tejidos que en la papa dulce.

Por otro lado, no se toma en cuenta el trabajo del arado en la siembra ulterior, que vuelve a mezclar estos residuos con el suelo y debería activar su descomposición. Se puede considerar entonces que estas cifras corresponden a una estimación mínima del nitrógeno liberado. Si se considera un cultivo ulterior al segundo año de papa - a los 18 meses - los tallos y raíces de papa liberan 58% del nitrógeno inicial en papa dulce y 54% en papa amarga. Solamente un poco más de la mitad resulta asimilable y el saldo de materia seca tiene entonces solo un efecto físico en el suelo.

Balance de N en el suelo

Las tablas 6 y 10 (a, b) indican los valores de nitrato en 1998-99 y de nitrato y amonio en 1999-2000. Se observan tres rangos de variación

Tabla 7: Balance de nitrógeno en papa (1998-1999). Abreviaciones: N = nitrógeno total, Ng = nitrógeno liberado por el estiércol incorporado en la siembra durante los 6 meses del cultivo; N balance papa = (N tubérculo semilla + Ng) – N papa absorbido; Nm balance suelo = variación del nitrógeno mineral entre siembra y cosecha, sumando 0-20 cm y 20-40 cm; N balance suelo-papa = Nm balance suelo + N balance papa.

Tratamientos	ID	PD	HD	IA	PA	HA
Salidas (kg ha⁻¹)						
N tubérculos	10	8.89	81.11	11.43	11.59	82.08
N tallos	0.36	0.4	1.07	0.44	0.57	1.15
N hojas	3.27	3.81	9.57	2.54	3.39	6.32
N raíces	1.28	3.3	3.02	0.74	2.38	3.32
N papa absorbido	14.92	16.4	94.77	15.15	17.93	92.87
Ingresos (kg ha⁻¹)						
Ntubérculo Semilla	7.01	2	2.14	8.69	1.99	2.26
N estiércol	16.77	30.13	31.77	14.13	27.78	28.85
Ng liberado	5.94	10.67	11.25	4.55	8.95	9.29
Balance (kg ha⁻¹)						
N balance papa	- 1.97	- 3.73	- 81.38	- 1.89	- 6.99	- 81.32
Nm balance suelo	0-40 cm	- 2.59	-	51.04	-	- 37.86
N balance suelo-papa	- 4.56	-	-30.34	-	-	-43.46

Tabla 8: Ingresos y salidas de biomasa en un segundo ciclo de papa dulce y amarga (1999-2000). Leyenda: (1) La proporción de tallo/hoja se deduce de Huaraco (cosecha 1999); (2) La biomasa de raíz se deduce de la biomasa aérea usando los ratios medidos en 1999.

Tratamientos	IDD	PDD	HDD	IAA	PAA
Ingresos (MS kg ha⁻¹)					
Estiércol	3465	3952	2807	3341	4254
Tubérculo semilla	633	834	887	443	526
Salidas (MS kg ha⁻¹)					
Tubérculos	3562	688	1949	2307	657
Tallos (1)	135.2	30.4	100	102.3	33.6
Hojas (1)	482.8	108.6	357	322.7	105.8
Raíces (2)	383.2	189	173.7	254.8	168.7

Tabla 9: Contenido en nitrógeno de ingresos y salidas de biomasa (1999-2000). Leyenda: (a) CHN (LCA, IE, Bolivia), (b) Nirs, adoptado por el cálculo del total extraído (CEFE-CNRS, Francia).

Tratamientos	IDD	PDD	HDD	IAA	PAA
Ingresos (% N)					
Estiércol (a)	1.82	1.82	1.87	1.82	1.82
Tub. Semilla	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
Salidas (% N)					
Tubérculo (a)	0.64	2.28	1.37	0.67	1.05
Tallos (b)	0.5	1.04	0.81	0.66	0.98
Hojas (b)	1.59	2.24	2.06	1.47	1.61
Raíces (b)	0.95	1.33	1.26	0.9	1.1

Tabla 10: a) Balance de nitrógeno del suelo entre la siembra y la cosecha (1999-2000). Abreviaciones: Ni = Nitrógeno inicial (siembra), Nf = Nitrógeno final (cosecha), Nt = Nitrato, Nm = Nitrógeno mineral (nitrato + amonio). b) Las densidades aparentes están dadas para el cambio de mg kg⁻¹ a kg ha⁻¹.

a)

Nitrógeno (mg kg ⁻¹)	Ni Siembra	Nf Cosecha	Ni - Nf Balance	Ni Cosecha	Nf Balance	Ni - Nf
Patarani						
0-20 cm	IDD	IAA				
	Nt	4.9	2.51	2.39	5.9	4.56
	Nm	9.4	3.28	6.12	7.4	5.86
20-40 cm	Nt	1.8	0.79	1.01	4.9	3.32
	Nm	2.6	1.58	1.02	6.9	4.33
Patacamaya						
0-20 cm	PDD	PAA				
	Nt	3.8	2.06	0.74	3.2	0.94
	Nm	6.5	7.87	- 1.37	5	- 0.46
20-40 cm	Nt	6.6	5.23	1.37	2.3	- 0.13
	Nm	12.7	12.88	- 0.18	3.4	- 2.96
Huaraco						
0-20 cm	HDD	-	-	-	-	-
	Nt	4.3	1.62	2.68	-	-
	Nm	6.95	2.38	4.57	-	-
20-40 cm	Nt	2	1.82	0.18	-	-
	Nm	4.55	2.69	1.86	-	-

b)

Densidad aparente	IDD	IAA	PDD	PAA	HDD
0-20 cm	1.4	1.3	1.44	1.52	1.53
20-40 cm	1.37	1.39	1.53	1.38	1.53

del stock de nitrógeno mineral del suelo (0-20 cm), entre el momento de la siembra y de la cosecha; los tratamientos se clasifican en el mismo orden para la variación del stock de nitrógeno y para el rendimiento de tubérculo de papa:

- positiva o negativa inferior a 3 mg kg⁻¹ en Patarani (ID) y Patacamaya (PDD y PAA);
- positiva superior a 4 mg kg⁻¹ (0-20 cm) en Patarani (IDD, IAA) y Huaraco (HDD);
- positiva superior a 8 mg kg⁻¹ (0-20 cm), en Huaraco (HD, HA).

A cabo del inter-cultivo seco, entre mayo y noviembre, el contenido en nitrógeno al inicio del segundo ciclo (Tabla 10) logra en el horizonte 0-20 cm un valor muy superior al nitrógeno final del primer ciclo (Tabla 6). No se puede explicar esta situación por la mineralización de los residuos de cosecha antes de la siembra del segundo año, ni por lo que queda del estiércol aportado al inicio del primer ciclo. Las condiciones secas y frías del intercultivo no parecen óptimas para esta descomposición, pero la humedad del suelo no disminuye en profundidad durante este periodo (Vacher *et al.* 1994). Puede seguir entonces activo el componente microbiano del suelo y no se descarta la posibilidad de una liberación de nitrógeno a partir de este componente microbiano.

Balance de N en el sistema suelo-papa

Los cuadros 7 y 11 presentan el balance de nitrógeno final en papa y suelo. Cifras inferiores a 5 kg ha⁻¹ se consideran del mismo orden que los errores de evaluación. Se concluye que la reserva del suelo no ha sido movilizada en Patarani. Es el caso del tratamiento ID en 1998-1999 (Tabla 7) y supuestamente de los otros tratamientos de Patarani y Patacamaya que obtuvieron balances muy similares de nitrógeno en el cultivo (IA, PD, PA). En Huaraco donde el balance final de nitrógeno es negativo en 1999,

las cantidades de 35 kg ha⁻¹ (HD) y 32 kg ha⁻¹ (HA) fueron entonces movilizadas a partir del suelo durante los seis meses de cultivo de papa, resultando en un rendimiento de aproximadamente 10 T/ha de MS de papa (Figura 2). En 1999-2000, el balance de nitrógeno da un saldo positivo en todos los tratamientos entre 21 y 34 kg ha⁻¹, que corresponde a un nivel bajo de exportación por la papa (0.7 a 3.5 T/ha para 100 días de ciclo vegetativo con precipitaciones y sin heladas).

Discusión

Discutimos en primer lugar sobre los otros ingresos y salidas que no fueron incluidos en el balance. No se ha incluido el aporte de nitrógeno por las aguas de lluvia, por el bajo nivel de las precipitaciones y la ausencia de referencias correspondientes al Altiplano boliviano. Existen muchas controversias sobre las cantidades de N depositadas de esta manera en los suelos. Los valores indicados en clima templado fluctúan entre 0.74 y 21 kg N ha⁻¹ año⁻¹ (Fassbender 1986), con una medición de 15 kg N ha⁻¹ año⁻¹ reportada por Wolf & van Keulen (1989), que se podría considerar como un promedio. Estas cantidades serían más altas en climas tropicales (6.5-72 kg N ha⁻¹ año⁻¹, Fassbender op. cit.). En el Altiplano boliviano, las descargas eléctricas pueden ser intensas, pero la cantidad de lluvia es mucho más baja; no se descarta que el aporte por aguas de lluvia sea significativo sobre el balance de nitrógeno del suelo.

No se tiene tampoco evaluaciones de la lixiviación del nitrógeno en el Altiplano de Bolivia. En Alemania, Mengel & Kirkby (2000) encontraron pérdidas de 0-27 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en un suelo franco arenoso con 16% de arcilla. En España, Ortuzar *et al.* (2003) han medido el nitrato y amonio lixiviados en el cultivo de trigo, con una pluviometría de 779 mm de diciembre a junio. Observaron variaciones del contenido de nitratos y de amonio en lixiviados con 18.8 kg ha⁻¹ de nitrógeno lixiviado en el

Tabla 11: Balance de nitrógeno en papa (1999-2000). Abreviaciones: N estiércol 1998 = N del estiércol incorporado en 1998 - N liberado durante los seis meses de cultivo. Se trata entonces del saldo del estiércol aplicado en 1998. Ng 1998 = N liberado por el saldo del estiércol 1998 durante seis meses entre cosecha y siembra y seis meses de cultivo en 1998-1999; N estiércol 1999 = N del estiércol incorporado en 1999; Ng 1999 = N liberado por el estiércol en 1999 durante seis meses de cultivo; Nr = N liberado por los residuos de cultivo de papa durante seis meses entre cosecha y siembra y seis meses de cultivo; Norg = Ng + Nr = total del nitrógeno liberado por estiércol y los residuos de cultivo. N balance papa = (N tubérculo semilla + Norg) - N papa absorbido; N balance suelo-papa = Nm balance suelo + N balance papa.

Tratamientos	IDD	PDD	HDD	IAA	PAA
Salidas (kg ha⁻¹)					
N tubérculos	22.8	15.69	26.7	15.46	6.9
N tallos	0.68	0.32	0.81	0.67	0.33
N hojas	7.68	2.43	7.35	4.74	1.7
N raíces	3.63	2.51	2.19	2.29	1.86
N papa absorbido	34.79	20.95	37.05	23.16	10.79
Ingresos (kg ha⁻¹)					
N tub.semilla	4.43	5.84	6.21	3.54	4.21
Nestiércol 1998	10.83	19.46	20.52	9.58	18.83
Ng 1998	6.76	12.14	12.8	4.38	8.61
N estiércol 1999	63.06	71.93	52.49	60.81	77.42
Ng 1999	22.32	25.46	18.58	19.58	24.93
N residuos hojas	3.28	3.79	9.57	0.8	1.07
Nr hojas	2.37	2.74	6.93	0.55	0.74
N tallos+raíces	1.64	3.7	4.1	2.12	4.18
Nr tallos+ raíces	0.87	1.97	2.18	1.6	3.15
N org	32.32	42.31	40.49	26.11	37.43
Balance (kg ha⁻¹)					
N balance papa	1.96	27.2	9.65	6.49	30.85
Nm balance suelo 0-40 cm	19.93	- 4.5	19.67	27.28	- 9.57
N balance suelo-papa	21.89	22.7	29.32	33.77	21.28

Tabla 12: Referencias sobre el nitrógeno total en órganos de papa dulce (% MS). Fuentes: (1) Rowe & Secor (1993: p. 37), (2) Haverkort & MacKerron (2000: p. 38), (3) Ezeta & McCollum (1972): *Solanum andigena*, cv. Renacimiento, con fertilización 160N-160P-160K, Mantaro, Perú, (4) Carmen del Castillo (1995): cultivar mejorado Alpha y cultivar nativo Runa, Patacamaya, Bolivia.

Cultivares		Tubérculos	Hojas	Tallos	Raíces
General	(1)	0.85 – 2.2	1.5 – 4		
	(2)	1.59 (135 días)	2.23 (120 días)	1.3 (120 días)	
Renacimiento Alpha	(3)	0.89 (195 días)	2.84 (172 días)	0.81 (172 días)	0.95 (172 días)
	(4)	1.4 (deficit hídrico)	2.88 (deficit hídrico)		
Alpha Runa	(4)	1.7	3.13		
	(4)	2.05 (deficit hídrico)	2.7 (deficit hídrico)		
Runa	(4)	2.2	2.6		

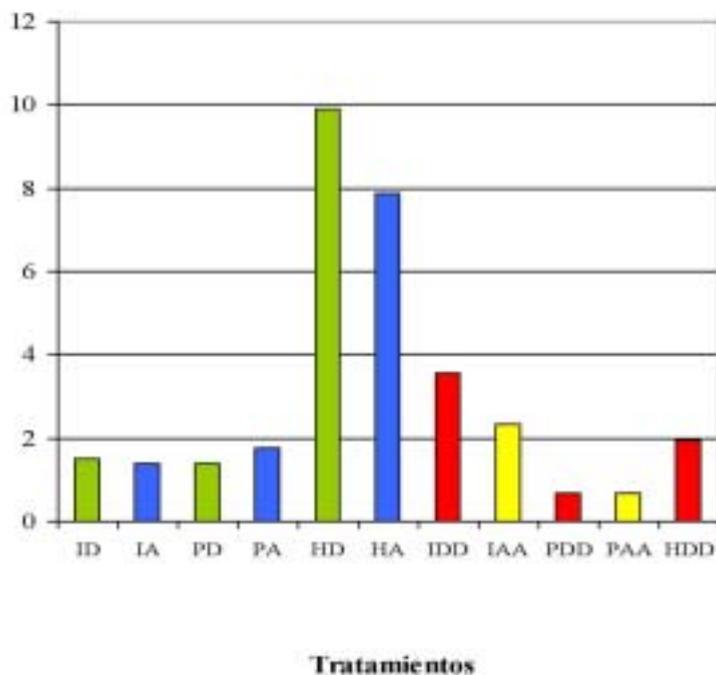


Fig. 2: Rendimientos de papa según cultivar, sitio y año.

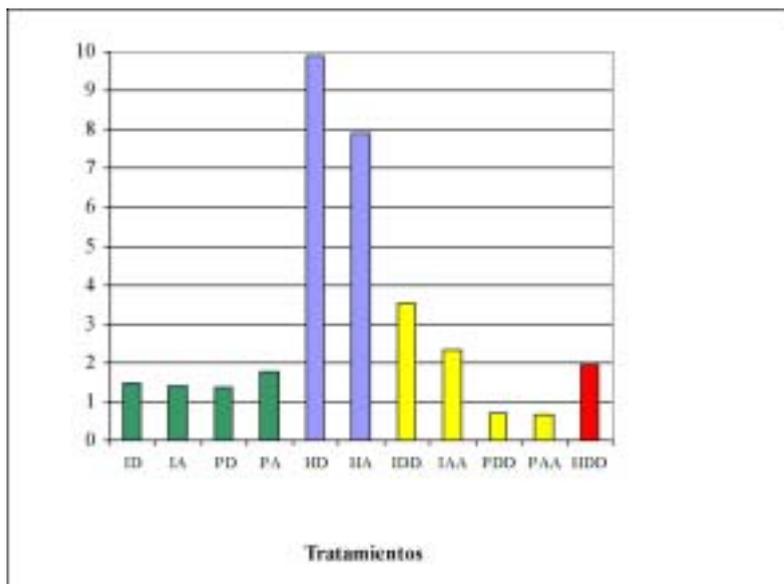


Fig. 3: Rendimientos de papa según el año climático (mm, precipitaciones y dsh, días sin helada).

tratamiento sin fertilizante. Salm (1983) señala que el riesgo de pérdida de nitrógeno mineral por lixiviación es bajo en el Altiplano semiárido, porque la mineralización neta en las mejores condiciones climáticas de la primavera es inmediatamente aprovechada en el crecimiento de las plantas y en aportes a los microorganismos.

Analizamos en segundo lugar las respuestas del cultivo de papa. Hervé & Mita (en prensa) compararon los rendimientos de papa dulce y amarga para ambas campañas agrícolas 1998-99 y 1999-00. El rendimiento en papa aparece condicionado por (1) la duración del ciclo útil de cultivo y (2) la cantidad de nitrógeno mineral inicial y la cantidad liberada en el suelo (Figura 2). En 1998-99, los aportes de estiércol son comparables entre Patacamaya y Huaraco. Los rendimientos en Huaraco superan los de tubérculos (factor 4 a 7) y de biomasa aérea (factor 2) de Patacamaya, por un mayor contenido inicial de nitrógeno en el suelo, un mes de noviembre lluvioso y un ciclo vegetativo

prolongado de un mes sin heladas (Tabla 3). La absorción de nitrógeno que le corresponde no ha sido compensada por la mineralización lenta del estiércol (no se nota el primer año un efecto marcado del estiércol de ovino), ni por el nitrógeno mineral presente en el suelo (Tabla 6). Dizes (1992) no nota tampoco un efecto claro de bostas de vacuno, aplicadas en el primer año de cultivo de papa. En base a una estimación del nitrógeno mineral, se obtiene en Huaraco un déficit de nitrógeno de aproximadamente 35 kg ha⁻¹ en papa dulce y 32 kg ha⁻¹ en papa amarga (Tabla 7), que deberá ser compensado por la mineralización del nitrógeno orgánico del suelo. Dos fuentes son posibles: la biomasa vegetal incorporada en la labranza o el componente microbiológico del suelo alimentado por ella. Otras investigaciones permitirán confirmar cuales fueron estas fuentes. En este sentido, Coûteaux *et al.* (en este número) han evaluado en los terrenos en descanso la biomasa, necromasa y velocidad de mineralización de las principales especies

representativas de los grupos funcionales.

Se toma en cuenta el intercultivo de seis meses en los cálculos de liberación de nitrógeno por el estiércol del año anterior y de los residuos de papa incorporados en la cosecha, con la misma tasa de liberación que durante la fase de cultivo. Como se volvió a aportar estiércol en la segunda siembra de papa, se cuenta con un aporte orgánico total mayor que en el primer año. El balance de nitrógeno después de la cosecha de papa en 2000 deja un aporte al suelo en todos los sitios (Tabla 11). Se recalca en Huaraco un aporte al suelo de 29 kg ha⁻¹ en papa dulce, que no compensa totalmente el déficit del año anterior (35 kg ha⁻¹). Cabe notar que el balance de nitrógeno sería reducido a 11 kg ha⁻¹ al cabo del segundo año si no se hubiera aportado este año también estiércol a la siembra. En los tratamientos IDD, PDD y PAA el balance sería nulo a ligeramente negativo en el caso de no aplicar estiércol en el segundo año. Se puede considerar este aporte como una fertilización de seguridad, sobre todo si la rotación es de tres años de cultivo.

Una evaluación de los dos años sucesivos de cultivo fue solamente posible para la papa dulce. El saldo acumulado de nitrógeno es positivo en Patarani (+ 18 kg ha⁻¹), donde el rendimiento en papa fue bajo los dos años y ligeramente negativo en Huaraco (- 6 kg ha⁻¹), donde el rendimiento fue mucho más alto. El saldo promedio de todos los tratamientos (26 kg ha⁻¹) posibilita que se cultive en un tercer año, pero con un cultivo muy poco exigente en nitrógeno.

Se discute a continuación el posible uso del nitrógeno total, en vez del contenido más variable de nitrógeno mineral del suelo. La única medición de la tasa de mineralización neta anual en el Altiplano central boliviano proviene de Salm (1983), quien muestra entre enero 1981 y mayo 1982 que esta tasa varía según la zona topográfica y la humedad y profundidad del suelo. En el tholar con gramíneas de la planicie de Huaraco, la mineralización varía entre 2% (25-30 cm) y 5% (0-5 cm) del N total. En las colinas con vegetación

arbustiva, fluctúa alrededor del 1% del N total hasta 15 cm de profundidad. En áreas de cultivo de la planicie, varía entre 3-4% del N total (papa con estiércol de ovino en 1980-1981 y quinua en 1981-1982). Adoptaremos la tasa de 1% del N total para nuestra parcela de Huaraco y 2% para la planicie de Patacamaya y Patarani.

Disponemos de mediciones del nitrógeno total en parcelas de Patarani estudiadas para microbiología (Carballas 1999), en función de la duración del descanso: $N_t = 0.055$ (%) después de tres años, $N_t = 0.0515$ (%) promedio de dos parcelas de cinco años de descanso. Consideramos una densidad aparente promedio de 1.5 g cm⁻³ para 0-40 cm y aplicamos la tasa de mineralización anual más baja (1%) a los seis meses de cultivo y / o a los seis meses de descanso correspondiente al periodo intercultivo. En la parcela de cinco años de descanso de Huaraco, se obtuvo 30.9 kg ha⁻¹, un monto un poco inferior al déficit promedio estimado a 34 kg ha⁻¹ en 1999 (Tabla 7). La incertidumbre del nitrógeno total de referencia y de la tasa de mineralización adoptada no nos permite un análisis más preciso. Estas cantidades confirmarían la hipótesis que la mayor fuente de nitrógeno proviene de la mineralización del nitrógeno orgánico. Para validar estas estimaciones en base a los datos obtenidos por Salm en Huaraco (1981-1982), habría sido interesante determinar las tasas de mineralización en las parcelas estudiadas, enterrando bolsitas con suelo y midiendo el nitrógeno mineral producido.

Conclusiones

Al productor le interesa el terreno en descanso, en primer lugar como fuente de forraje para el pastoreo de ovinos y vacunos; en segundo lugar como precedente del cultivo de papa y en tercer lugar como fuente de leña. Dentro de las diferentes funciones del descanso, está la reconstitución de un estado del suelo apto para la producción en un contexto de uso bajo a nulo de insumos químicos.

Quedan establecidas las modalidades del cálculo del balance de nitrógeno en el cultivo de papa y el peso respectivo de las biomásas, aérea y subterránea. El aporte de nitrógeno por el estiércol es significativo solo a partir del segundo año. El aporte en nitrógeno de los residuos del cultivo de papa es muy reducido. No cambiarían mucho los términos del balance si se exportan estos residuos de cultivo para la alimentación de ovinos, como suelen hacer los agricultores durante los años de déficit forrajero. El seguimiento de parcelas campesinas ha demostrado la gran variación de aportes de estiércol ovino en el cultivo de papa (hasta de 1-4). Las limitaciones climáticas explican en parte por qué los mayores aportes de estiércol no se traducen siempre en aumento de rendimiento. Falta también analizar el efecto de las prácticas agrícolas sobre la tasa de mineralización final del estiércol ovino en el suelo y entender con más precisión lo que ocurre durante el periodo del inter-cultivo, seco y frío.

Limitaciones en la profundidad de enraizamiento pueden reducir el nitrógeno total disponible. Hemos trabajado en 0-40 cm para respetar la profundidad máxima de enraizamiento observada en Huaraco, pero muchos suelos del Altiplano central tienen la mayor parte de sus raíces en el horizonte arado a 15-20 cm de profundidad.

En el Altiplano boliviano, Vacher & García (1992) y Vacher *et al.* (1995, 1998), han comparado la resistencia a sequías y heladas de papa dulce y amarga, pero se tiene poca referencia sobre su capacidad respectiva en extraer nitrógeno del suelo (Hervé & Mita 2001). Se sabe que la respuesta a los niveles de fertilización de las especies nativas expresada en peso de tubérculos por hectárea es inferior a la de genotipos mejorados de papa. La mayor profundidad del sistema radicular de papas amargas comparado con papas dulces, tendría consecuencias sobre la alimentación hídrica, el potasio y el fósforo, pero no sobre una mejor captación del nitrógeno mineralizado a partir del estiércol.

Se planteó la hipótesis de un aporte de nitrógeno movilizable en el suelo a cabo del primer año de papa y de un saldo negativo a cabo del segundo año de papa. El resultado obtenido es el inverso, pero por otras razones: un ciclo vegetativo más largo en el primer año y una mayor mineralización de estiércol y residuos en el segundo. No se puede contar con un modelo explicativo sencillo basado sobre el agotamiento de un stock de nitrógeno constituido en el suelo durante el descanso. En este caso, intervienen las condiciones climáticas y la lenta mineralización de la materia orgánica en el suelo, que generan resultados al cabo del segundo año. Además, conviene recalcar que el stock de nitrógeno en el suelo es muy elevado, pero en gran parte no movilizado. La cantidad de nitrógeno mineral movilizada por la vegetación es una mínima parte de este stock de nitrógeno en el suelo y, como tal, es difícilmente detectable y entonces comparable. Por lo tanto, convendría pasar de balances estáticos a análisis de flujos. La mineralización es un flujo continuo. Nuestro balance estático está calculado en base a la cosecha de papa, considerando los montos mineralizados durante seis meses de cultivo. No da cuenta entonces de las posibilidades de sincronización entre la liberación de nitrógeno y los periodos de mayor extracción por los cultivos.

La interpretación de las diferencias en el stock de nitrógeno mineral entre la cosecha y siembra siguiente es delicada porque (1) la fracción mineral del nitrógeno del suelo es muy variable y (2) durante el ciclo, el nitrógeno orgánico se ha podido mineralizar y reorganizar en las plantas sin aparecer en este balance. Se confirma entonces el interés (1) de evaluar los flujos de nitrógeno en forma dinámica y (2) de construir este balance a la escala de la sucesión completa, incluyendo el último año de cebada, lo que permitiría controlar el efecto del saldo de nitrógeno estimado al final del segundo cultivo.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el programa europeo Tropandes titulado "Fertility management in the tropical Andean mountains: agroecological bases for a sustainable fallow agriculture" (INCO-DC IC18CT98-0263), liderizado por la Prof. Tarsy Carballas de la Universidad Santiago de Compostela (España). Agradecemos los propietarios de las parcelas estudiadas en Patarani y Huaraco por su paciencia y comprensión y a Claudio Rosales (Instituto de Ecología, La Paz, Bolivia) por sus contactos y apoyo.

Referencias

- Bossio, D.A. & K.G. Cassman. 1991. Traditional rainfed barley production in the Andean highlands of Ecuador: soil nutrient limitations and other constraints. *Mountain Research and Development* 11 (2): 115-126.
- Carballas, T. 1999. First individual annual report 1/10/98 - 30/09/99, Tropandes European Project (ERBIC18CT98-0263), Partner 1, 11 p.
- Coûteaux M.-M., D. Hervé & V. Mita. 2004. Dynamique du carbone et de l'azote des résidus de pomme de terre et de fumier ovin dans une culture de pomme de terre en rotation sur deux ans de l'altiplano bolivien. VI^{ème} journées de l'Ecologie Fonctionnelle, 10-12/03/04, Rennes (Poster). [El resumen está publicado en la versión electrónica accesible en el siguiente sitio internet <http://jef2004.univ-rennes1.fr/resumes.asp?extract=1>]
- Del Castillo, C. 1995. Comportamiento hídrico y fotosíntesis de variedades de papa amarga y dulce en el altiplano central. Tesis de licenciatura de Ingeniería Agronómica, Facultad Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 165 p.
- De Robert, P. & M. Monasterio. 1993. Prácticas agrícolas campesinas en el Páramo de Apure, Sierra Nevada de Mérida, Venezuela. Pp.37-54 En: Rabey, M. (ed.). *El Uso de Recursos Naturales en Montañas: Tradición y Transformación*. UNESCO-Orcyt, Montevideo.
- Dizes, J. 1992. Fertilisation minérale et fertilisation organique en conditions d'irrigation minimum. Rapport miméo IRD, La Paz, 11 p.
- Ezeta, F.N. & R.E. McCollum. 1972. Dry-matter production, and nutrient uptake and removal by *Solanum andigena* in the Peruvian Andes. *America Potato Journal* 49 (4): 151-163.
- FAO-SNAG. 1995. Fertisuelos. Soil management and plant nutrition in farming systems. Fertisuelos project - GCPF / BOL / 018 / NET, Field document N° 16, La Paz, 103 p.
- Fassbender, H.W. 1986. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA, San José. 398 p.
- Haverkort, A.J. & D.K.L. MacKerron (eds.). 2000. Management of nitrogen and water in potato production. Wageningen Press, Wageningen, 353 p.
- Hervé, D., D. Genin & G. Rivière (eds.). 1994. Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes. Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria-Orstom, La Paz. 356 p.
- Hervé, D. & V. Mita. 2001. Comparación de rendimiento y respuesta al nitrógeno del suelo de variedades de papa amarga y dulce en el altiplano central boliviano. Resúmenes del X Congreso Cultivos Andinos, 4-7/07/01, Jujuy, Argentina, Fundandes-Cip-Condesan-FAO-IDRC-CFI.
- Hijmans, R.J., B. Condori, R. Carrillo & M.J. Kropff. 2003. A quantitative and constraint-specific method to assess the potential impact of new agricultural technology: the case of frost resistant

- potato for the Altiplano (Peru and Bolivia). *Agricultural Systems* 76(3):895-911.
- Janssen, B.H. 1999. Basics of budgets, buffers and balances of nutrients in relation to sustainability of agroecosystems. Pp. 27-56. En: Smaling, E.M.A., O. Oenema & L.O. Fresco (eds.). *Nutrient Desequilibria in Agroecosystems. Concept and Case Studies*. CABI Publishing, Wallingford.
- Mengel, K. & E. Kirby. 2000. Principios de nutrición vegetal. Trad. R. Melgar & M. Ruiz Gallud. Traducción al español de la 4ta. edición (1987). Ed. International Potash Institute, Basel. 692 p.
- Morales, C. (ed.) 1994. Huaraco, comunidad de la puna. Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés. Artes Gráficas Latina, La Paz, Bolivia. 261 p.
- Nieto-Cabrera, C., C. Francis, C. Caicedo, P. Gutierrez & M. Rivera. 1997. Response of four Andean crops to rotation and fertilization. *Mountain Research and Development* 17: 273-282.
- Ochoa, C.M. 2001. Las papas de Sudamérica: Bolivia. IFEA-CIP, Lima. 535 p.
- Orlove B., R. Godoy & P. Morlon. 1996. Sistemas de barbecho sectorial. Pp. 86-117. En: Morlon, P. (Ed.). *Comprender la Agricultura Campesina en los Andes Centrales Perú - Bolivia*. Institut Français d'Etudes Andines – Centro de Estudios Regionales Andinos Bartolomé de Las Casas, Lima.
- Ortuzar, M.A., A. Aizpurua, A. Castellón, A. Alonso & J.M. Estavillo. 2003. Evolución del contenido de nitrato y amonio en lixiviados bajo diferentes formas de fertilización nitrogenada en trigo. Pp. 45-49. En: Álvarez-Benedí, J. & P. Marinero (eds.). *Actas de las VI Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI*, Valladolid.
- Pestalozzi, H. 2000. Sectoral fallow systems and management of soil fertility: the rationality of indigenous knowledge in the high Andes of Bolivia. *Mountain Research and Development* 20 (3):64-71.
- Rowe, R.C. & G.A. Secor. 1993. Managing potato health from emergence to harvest. Pp. 35-40. En: Rowe, R.C. (ed.). *Potato Health Management*. The American Phytopathological Society Press, St. Paul, Minnesota.
- Ruiz, M. C. & Z. Bustamante. 1988. Descomposición de la materia orgánica bajo condiciones controladas. *Ecología en Bolivia* 11: 47-64.
- Salm, H. 1983. La mineralización de nitrógeno en suelos del altiplano central de Bolivia. *Ecología en Bolivia* 4: 59-72.
- Sarmiento, L., M. Monasterio & M. Montilla. 1993. Ecological bases, sustainability and current trends in traditional agriculture in the Venezuelan high Andes. *Mountain Research and Development* 13 (2): 167-176.
- Vacher, J.-J. & M. García. 1992. Uso consuntivo y comportamiento hídrico de la papa amarga (*Solanum juzepczukii*) y de la papa dulce (*Solanum tuberosum* spp. *andigena*) en el altiplano boliviano. Pp. 69-76. En: Rea, J. & J. J. Vacher (eds.). *La Papa Amarga*. I Mesa redonda: Perú - Bolivia, La Paz, 7-8 Mayo 1991, ORSTOM, La Paz.
- Vacher, J.-J., I. Brugioni & Th. Fellman. 1994. Evolución del balance hídrico invernal en diferentes parcelas de descanso en el Altiplano boliviano. Pp. 127-139. En: Hervé, D., D. Genin & G. Rivière (eds.). *Dinámica del Descanso en los Andes*. IBTA-ORSTOM, La Paz.
- Vacher, J.-J., C. del Castillo & J. Dizes. 1995. Comportamiento hídrico de diferentes especies de papa frente a la sequía en el Altiplano central boliviano. Pp. 180-198. En: *Memorias de la Primera Reunión Internacional de Recursos Genéticos de*

- Papa, Raíces y Tubérculos Andinos, 7-10 de febrero 1994, IBTA-PROINPA, Convenio IBTA-CIP-COTESU, Cochabamba.
- Vacher, J.-J., C. del Castillo, J. Dizes & R. Bosseno. 1998. Une pratique paysanne face aux risques de sécheresse sur l'altiplano bolivien. L'utilisation d'une diversité de *Solanum*. Pp. 55-74. En :
- Biarnès, A. (ed.). La Conduite du Champ Cultivé. Points de vue d'Agronomes. ORSTOM, Col. Colloques et Séminaires, Paris.
- Wolf, J. & H. van Keulen. 1989. Modelling long-term crop response to fertilizer and soil nitrogen. I. Model description and application. Plant and Soil 120: 11-22.