

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS
INSTITUTO DE CIENCIAS AMBIENTALES Y ECOLÓGICAS
POSTGRADO EN ECOLOGÍA TROPICAL**

**ASPECTOS DEL CICLADO DE NITRÓGENO EN UN
SISTEMA AGRÍCOLA CON DESCANSOS LARGOS DE LOS
PÁRAMOS VENEZOLANOS**

Zoraida Abreu Araque

Tesis presentada ante la Ilustre Universidad
de Los Andes, como requisito parcial para
optar al título de Magíster Scientiae
en Ecología Tropical.

Tutora: Dra. Lina Sarmiento

Febrero 2004
Mérida – Venezuela

Este trabajo forma parte del proyecto “Fertility management in the Tropical Andes: agroecological bases for a sustainable fallow agriculture (TROPANDES), financiado por la Unión Europea (Proyecto INCO-DC ERBIC 18CT98-0263).

También se recibió financiamiento de:

- CDCHT, Universidad de Los Andes, (proyecto C-1071-01-01EM).
- Postgrados Integrados en Ecología (FONACIT).

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora Lina Sarmiento, por haberme orientado en ese complejo mundo de la Agroecología, donde las respuestas no siempre son sencillas pero dan lugar a interesantes planteamientos, gracias por su paciencia y por su ayuda tanto en el campo como en la discusión.

A los integrantes del jurado: Fernando Delgado y Carlos García Nuñez por sus observaciones y aportes tomados en cuenta para el mejoramiento de este trabajo de tesis.

A la profesora Teresa Schwarzkopf por sus acertados comentarios.

Al Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE) por su valiosa colaboración logística tanto en la fase de elaboración como de presentación de este trabajo.

A Jhonny Márquez, Auxiliadora Olivo, Dimas Acevedo, Daniel Machado y Carlos Díaz por su inestimable colaboración en el campo.

A Zulay Méndez por su colaboración y la asistencia técnica durante los análisis de laboratorio y por haberme brindado su apoyo y amistad.

A Maximina Monasterio coordinadora del proyecto TROPANDES en Venezuela, por su ayuda y apoyo durante la elaboración del informe sobre el efecto de la helada en nuestros ensayos de campo.

Al Laboratorio de Suelos de Ciencias Forestales de la ULA por los análisis de suelo realizados.

Al Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (Montpellier–Francia) principalmente a Pierre Bottner, por los análisis isotópicos realizados.

A mis padres y hermanos por haber mantenido su confianza en mí a través del tiempo, a mi hija Any, por haberme dado algunos momentos libres para trabajar en la tesis.

A Marjorie Machado por su amistad, su apoyo tanto logístico como personal durante la mayor parte de mi estadía en esta ciudad.

Un agradecimiento muy especial a la comunidad de Gavidia, a la familia Torres y a la Sra. Cándida Rosa por auxiliarnos después de las agotadoras jornadas de campo.

A todas aquellas personas que conocí durante este tiempo, las cuales me brindaron su amistad y apoyo sobre todo en los momentos más difíciles, sería muy largo nombrarlas y correría el riesgo de olvidar alguna.

Tabla de Contenido

Resumen	8
Introducción general	10
Capítulo 1: Destino del Nitrógeno agregado por fertilización en un cultivo de papa en los Andes de Venezuela	26
Capítulo 2: Dinámica de la biomasa microbiana en una sucesión secundaria en los páramos venezolanos: enfoques sincrónico y diacrónico	53
Capítulo 3: Dinámica del Carbono y del Nitrógeno potencialmente mineralizables en una sucesión secundaria en los páramos venezolanos: enfoques sincrónico y diacrónico	78
Discusión general y conclusiones	116

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 1. Valores del N-BM en los dos muestreos	54
Figura 2. Cambios netos del N-BM	55
Figura 3. Diagrama de ordenación para el ACP de las 40 parcelas en función de las características físico-químicas	61
Figura 4. Diagrama de ordenación para el ACP de las 40 parcelas en función de los deltas de las características físico-químicas	62

Capítulo 3

Figura 1. Regresión lineal simple entre el N-BM con el Co y No	80
Figura 2. Diagrama de ordenación para el ACP de las 12 parcelas en función de las características físico-químicas y las variables explicativas. Ejes 1 y 2	88
Figura 3. Diagrama de ordenación para el ACP de las 12 parcelas en función de las características físico-químicas y las variables explicativas. Ejes 1 y 3	89
Figura 4. Diagrama de ordenación para el ACP de las 12 parcelas en función de las características físico-químicas y las variables explicativas. Ejes 1 y 4	90
Figura 5. Diagrama de ordenación para el ACP de las 12 parcelas en función de los deltas de las características físico-químicas y las variables explicativas. Ejes 1 y 2	96

Índice de tablas

Capítulo 1

Tabla 1. Propiedades del suelo de las parcelas cultivadas	23
Tabla 2. Biomasa y cantidad de N en los compartimientos de la planta	28
Tabla 3. N proveniente del suelo y del fertilizante en los compartimientos de la planta	29
Tabla 4. Cantidad de N en los compartimientos del suelo	30
Tabla 5. N del suelo y del fertilizante en los compartimientos del suelo	32
Tabla 6. N marcado orgánico no extraíble	33
Tabla 7. Precipitación, N total y del fertilizante en el drenaje	34
Tabla 8. Balance de N	35

Capítulo 2

Tabla 1. Características físico-químicas de las 40 parcelas	54
Tabla 2. Correlaciones entre las características físico-químicas con los 4 ejes de ordenamiento	57
Tabla 3. Deltas de las características físico-químicas	59
Tabla 4. Correlaciones de los deltas con los 4 ejes de ordenamiento	60

Capítulo 3

Tabla 1. Parámetros de la incubación	81
Tabla 2. Correlación entre los parámetros de incubación, variables edáficas y explicativas	83
Tabla 3. Regresiones múltiples de las variables analizadas	84
Tabla 4. Correlación de las variables analizadas con los 4 ejes de ordenamiento	88
Tabla 5. Correlación entre los deltas de las variables analizadas	91
Tabla 6. Regresiones múltiples de los deltas de las variables analizadas	92
Tabla 7. Correlación de los deltas de las variables analizadas con los 4 ejes de ordenamiento	95

RESUMEN

Con el propósito de contribuir al conocimiento sobre la regulación de la fertilidad del suelo y los mecanismos implicados en su recuperación en sistemas agrícolas tradicionales que utilizan descansos largos en la alta montaña tropical, se realizó una evaluación tanto en la fase de cultivo como en la fase de descanso, de algunos aspectos relacionados con la disponibilidad y ciclado de nitrógeno.

Durante la fase de producción se evaluó la distribución del N nativo y el proveniente del fertilizante en un cultivo de papa fertilizado con ^{15}N y en un cultivo control sin fertilizar. El objetivo fue analizar la dinámica del N en un ciclo de cultivo en los diferentes compartimientos del agroecosistema. El 32% del N aplicado no fue detectado al final del ciclo pudiendo atribuirse parte de éste a pérdidas gaseosas (denitrificación+volatilización). Las pérdidas por lixiviación fueron bajas. La fertilización estimuló la biomasa microbiana del suelo observándose inicialmente una fase de inmovilización y luego una mineralización del N aplicado corroborándose el papel de protección del fertilizante en la biomasa microbiana. Se observó que la nitrificación fue incrementándose durante el ciclo de cultivo lo cual probablemente favoreció las pérdidas gaseosas del fertilizante. Se obtuvo una baja eficiencia en el uso del fertilizante por las plantas (23%), la cual puede en parte ser explicada por la alta heterogeneidad entre las plantas debido al tipo de semilla utilizada, al efecto de la helada ocurrida y a las técnicas de aplicación del fertilizante. Por otra parte se observó que pese a la baja recuperación del fertilizante aplicado, este representó el 70% del N absorbido por el cultivo, evidenciándose el poco aporte del N nativo, pese a los altos contenidos de N orgánico de estos suelos.

Durante la fase de descanso se exploraron precisamente algunas fracciones lábiles de la materia orgánica del suelo que pudieran determinar el N disponible para el cultivo: la biomasa microbiana (BM) y el N y C potencialmente mineralizables (No y Co). El objetivo fue analizar si se produce un incremento sucesional de estas variables relacionado con la recuperación de la fertilidad. Para detectar los cambios sucesionales se combinaron dos tipos de análisis: un enfoque sincrónico, en el cual se evaluaron simultáneamente un grupo de parcelas con diferente tiempo de descanso (sustitución del tiempo por espacio) y un enfoque diacrónico a través del seguimiento de las mismas parcelas en el tiempo. Este último permite evitar el efecto de la gran variabilidad espacial entre las parcelas. El intervalo sucesional considerado para el análisis diacrónico fue de 3 años. Se analizaron 36 parcelas con diferentes edades de descanso (entre 1 y 12 años) y 4 parcelas de páramo natural. Los resultados obtenidos confirman una alta heterogeneidad espacial en el análisis sincrónico, que enmascara cualquier tendencia sucesional de los parámetros estudiados. Utilizando el enfoque sincrónico no se observó un aumento sucesional del N-BM, sin embargo se obtuvieron valores significativamente mayores del N-BM en las parcelas de páramo nunca cultivado en comparación con las parcelas en descanso, lo cual muestra la importancia de este compartimiento como indicador de la perturbación

de los ecosistemas y de su posible sensibilidad a intervalos mayores de los evaluados. No se encontraron tendencias sucesionales en ninguno de los parámetros edáficos analizados a excepción del pH y del contenido de Mg, los cuales con el análisis sincrónico mostraron una tendencia a aumentar en la sucesión. El análisis diacrónico tampoco permitió detectar cambios sucesionales en la BM, lo cual indica que ésta variable no es sensible en un intervalo tan corto como el considerado.

Para el análisis de la dinámica sucesional del No y Co se realizaron incubaciones, en condiciones de laboratorio, con muestras de suelos de 9 parcelas con diferentes categorías de descanso: tempranas (1-3 años), intermedias (4-6 años), tardías (más de 6 años) y 3 parcelas de páramo natural. Se incluyeron en el análisis el pastoreo y la biomasa vegetal como factores que pudieran estar influyendo sobre estos parámetros. Los resultados obtenidos muestran que no se produce un aumento sucesional del No y Co. Se corroboró que las tasas de mineralización de la materia orgánica en los suelos de páramos son muy bajas pudiendo ser una de las causas de su baja fertilidad intrínseca. Se observó además un posible efecto positivo del pastoreo sobre el aumento de algunas variables edáficas asociadas con la fertilidad como No, Co, CIC, BM y la saturación de bases.

En general los resultados obtenidos nos indican que los tiempos de descansos utilizados por los productores no permiten una total recuperación de las condiciones del suelo del páramo nunca cultivado ya que no se alcanzan los valores de N-BM encontrados en el páramo natural. Los resultados deben interpretarse dentro del contexto de heterogeneidad observada la cual no fue eliminada con la combinación de los enfoques sincrónico y diacrónico. La biomasa microbiana y el N y C potencialmente mineralizables mostraron no ser sensibles en estas condiciones de gran variabilidad espacial. A esta heterogeneidad se le añade la variabilidad climática y la historia de uso de cada parcela como factores que pudieran estar dificultando la observación de cualquier comportamiento sucesional. Sugerimos en este trabajo algunas recomendaciones para tratar de hacer un manejo más eficiente de los recursos y reducir el impacto sobre los sistemas y agroecosistemas de la zona.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La agricultura con descansos largos se caracteriza porque después de un periodo productivo de uno o varios ciclos de cultivo, el suelo deja de ser utilizado temporalmente. Sarmiento et al. (1993) señalan que cuando los periodos de descanso son más prolongados que la fase de producción se habla de una agricultura con descansos largos. Hervé (1994) define el descanso como un estado temporal del suelo sin cultivos, dentro de una sucesión de cultivos. Esta práctica es común en el trópico de baja altitud, encontrándose en varios lugares de América tropical, India, Medio Oriente y África Occidental sistemas similares a los de los Andes, donde existen parcelas dispersas no cercadas en campos comunales las cuales una vez cosechadas son pastoreadas y se recoge la madera y leña en los descansos.

En las montañas tropicales, la agricultura de descanso es ampliamente utilizada, practicándose principalmente en las punas de Bolivia y Perú y en los páramos de Venezuela y Colombia (Sarmiento y Monasterio 1993). En Perú y Bolivia el área de cultivo sometida a descansos largos con pastoreo es practicado bajo normas comunitarias por un gran número de comunidades andinas. En los altos Andes venezolanos, entre 3000 y 3800 msnm, el sistema de agricultura tradicional se basa en el cultivo de papas y cereales, utilizando descansos prolongados como una estrategia de recuperación de la fertilidad de los suelos. En los periodos de producción se cultiva papa hasta un máximo de 4 años, en algunas ocasiones se sigue con un cultivo de cereal, como trigo o avena, durante un año, el cual es utilizado en la alimentación humana y como forraje para el ganado. Luego las

parcelas entran en un periodo de descanso que puede tener una duración de 5 a más de 30 años, durante el cual ocurre una sucesión secundaria que puede restituir parcialmente la vegetación del páramo

Una de las funciones principales del descanso en los agroecosistemas andinos es la de permitir la recuperación de la fertilidad del suelo después de sucesivos ciclos de producción. Otras funciones del descanso señaladas por Llambí (1997) son: a) el pastoreo, ya que las parcelas en descanso son utilizadas como fuentes de forraje para el ganado vacuno y ovino; b) la eliminación y/o control de plagas de los cultivos ya que permite cortar el ciclo reproductivo de las plagas, en este sentido, Blanco (1994) reporta un control aparente de los nemátodos de la papa en Bolivia; c) proveer de fuente de combustible para los fogones domésticos con el uso de la leña y además abastecer de plantas con usos medicinales; d) controlar la proliferación de malezas; e) permitir la reconstitución del agua almacenada en el suelo en ciertas condiciones edafoclimáticas y con cierto manejo, sobre todo en los sistemas secos de las punas (Brugioni, 1994).

El sistema agrícola tradicional permitió inicialmente obtener cosechas sin la utilización de fertilizantes. En la actualidad, aunque se ha incorporado el uso de fertilizantes minerales, los productores de la zona han manifestado una disminución considerable de la fertilidad luego de varios años consecutivos de cultivo (Aranguren y Monasterio, 1997; Llambí y Sarmiento, 1998). Sarmiento (1995), reporta que pese al uso de abundante fertilización química, los rendimientos en parcelas sometidas a cultivos consecutivos disminuyen desde un promedio de 18.3 t ha^{-1} en el primer año a 1.7 t ha^{-1} para el tercer año. Esto nos indica que la disminución de los rendimientos no se detiene con una abundante

fertilización química, la cual por si sola no permite la eliminación de los descansos. El problema de la recuperación de la fertilidad durante el descanso en los agroecosistemas andinos será nuestro principal objeto de estudio.

Varios autores han investigado el problema de la recuperación de la fertilidad en sistemas agrícolas de los Andes, intentando relacionarla con la variación de diferentes parámetros edáficos. Sin embargo los resultados muestran pocas tendencias claras, siendo este un problema que aún dista mucho de estar resuelto. Tal es el caso de un estudio realizado en el páramo de Gavidia por Sarmiento y Monasterio (1993), donde evaluaron, la concentración de los nutrientes más importantes y de la materia orgánica del suelo en parcelas con diferentes edades, los resultados mostraron una disminución de todos los nutrientes evaluados menos el calcio, luego de 12 años de sucesión. Sarmiento et al. (1993) señalan una ligera disminución del nitrógeno total después de 15 años de descanso. Aranguren y Monasterio (1997), realizaron un estudio en parcelas con diferente tiempo de descanso donde los resultados indicaron que no hubo cambios significativos en el contenido de nitrógeno mineral durante la sucesión. El hecho de no haber encontrado un aumento sucesional de los nutrientes evaluados en los trabajos mencionados pudiera deberse a que éstos estaban basados en el análisis de un número muy pequeño de parcelas ubicadas en una pequeña porción del valle de Gavidia.

Llambí y Sarmiento (1998) evaluaron la biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria en Gavidia aumentando el número de parcelas, 36 de las cuales correspondían a diferentes tiempos de descanso y además tomaron en cuenta como referencia 4 parcelas de páramo nunca

cultivado. Los resultados obtenidos no mostraron una tendencia sucesional clara, sin embargo en el páramo natural se obtuvieron los mayores valores de: nitrógeno en la biomasa microbiana, nitrógeno y carbono totales, magnesio, calcio y saturación de bases. El no haber encontrado tendencias sucesionales claras se debió probablemente a una gran variabilidad entre las parcelas (heterogeneidad espacial) que no permitió visualizar claramente estas tendencias.

En estudios realizados en Colombia y Bolivia tampoco se han encontrado tendencias sucesionales claras a nivel de nitrógeno y carbono totales, bases cambiables y fósforo asimilable (Ferwerda, 1987; Jaimes, 2000; Hervé, 1994). El hecho de no haber encontrado tendencias sucesionales claras en la mayoría de los estudios realizados ha llevado a suponer que la recuperación de la fertilidad del suelo no puede ser analizada únicamente en el ámbito de los cambios químicos, sino que deben considerarse además la acumulación a lo largo de la sucesión de elementos minerales en otros compartimientos como la vegetación, la cual es utilizada como abono verde al comenzar el periodo de cultivo, la biomasa microbiana (Montilla 1993, Sarmiento 1995) y otros compartimientos lábiles, dándosele un enfoque ecosistémico al estudio de la recuperación de la fertilidad.

Aranguren y Monasterio (1997), mencionan que los sistemas agrícolas tradicionales son el resultado de la fusión de tradiciones indígenas, herencia española y elementos contemporáneos y agregan que los mismos parecen tener fundamentos ecológicos profundos y exhiben rasgos de estabilidad económica, elasticidad biológica y productividad. Así mismo Montilla (1993), señala el papel vital de estos sistemas agrícolas como un mecanismo de equilibrio entre la

producción y conservación de los sistemas naturales. Este sistema tradicional de manejo agrícola con descansos, pareciera estar sufriendo un rápido proceso de transformación debido a diferentes factores, como el aumento poblacional que lleva al fraccionamiento de las propiedades, la apertura de carreteras que contribuyen a la entrada masiva de fertilizantes químicos, la situación económica y la alta incidencia de plagas, estos factores ejercen una presión en los productores, llevándolos a reducir los periodos de descanso, lo cual podría traer como consecuencia un deterioro de los agroecosistemas y sistemas naturales de la zona que se caracterizan por ser complicados y frágiles (Aranguren y Monasterio, 1997; Llambí y Samiento, 1998).

Debido a la importancia que tienen los sistemas agrícolas con descansos en los Andes y a la necesidad de conocer sus bases agroecológicas para poder optimizar su funcionamiento, se realizó el proyecto " Fertility management in the tropical Andes: Agroecological bases for a sustainable fallow agriculture" (**TROPANDES**), en el cual se enmarca este trabajo de tesis.

El área de estudio abarcada por el proyecto TROPANDES fue los Andes Centrales y del Norte en los ecosistemas llamados páramo (Venezuela), entre 2800 a 4800 msnm con un límite agrícola a 3800 msnm y puna (Bolivia) entre 3400 a 4400 msnm con un límite de cultivo a 4250 msnm. En Venezuela, los estudios específicos se realizaron en el valle Las Piñuelas (Gavidia, Sierra Nevada de Mérida), entre 3350 y 3700 msnm. En Bolivia, el área de estudio se localizó en el altiplano, en la comunidad de Patarani, a 3800 msnm. Este proyecto fue financiado por la Unión Europea, interviniendo investigadores de España, Francia y Holanda junto con investigadores de los países involucrados

Este trabajo de tesis se realizó con el propósito de proseguir la evaluación de la temática de la fertilidad en los sistemas con descansos largos para lo cual se analizaron, durante los periodos complementarios de cultivo y de descanso, algunos aspectos relacionados con la disponibilidad y ciclado de nitrógeno. La realización de este estudio se hizo en dos fases, la primera parte relacionada con el periodo de cultivo y la segunda con el ciclo de descanso. El desarrollo de estas fases se presenta en forma de tres capítulos con formatos de artículos. El primero corresponde a la fase de cultivo y los otros dos corresponden a la fase de descanso

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS:

PRIMERA FASE: Periodo de cultivo

HIPÓTESIS:

1.-La disponibilidad del N durante el cultivo puede ser modulada por la inmovilización de este nutriente en la biomasa microbiana y su mineralización progresiva. Sarmiento (1995) reporta resultados donde se resalta el papel de la biomasa microbiana en la “protección del fertilizante” y en su redistribución a lo largo de las distintas fases del cultivo, modulando la disponibilidad del N para el cultivo.

2.-En un ecosistema no intervenido hay un equilibrio entre las entradas, el consumo y la intensidad de los procesos que intervienen. En un agroecosistema

se altera el equilibrio aumentándose las salidas por lavado, extracción, volatilización, denitrificación. Por esta razón deberíamos esperar que ocurran pérdidas gaseosas y por lavado en el agroecosistema de estudio. Sarmiento (1995) señala que los balances de nutrientes (entradas–salidas) son positivos para todos los elementos agregados por fertilización, pero para el N las pérdidas por vías gaseosas quedaban aún por evaluar. Se plantea la hipótesis de que las pérdidas gaseosas (denitrificación+volatilización) pudieran representar una fracción importante del N aplicado que se pierde en el agroecosistema.

OBJETIVOS

1. Analizar la dinámica del N en un ciclo de cultivo de papa en los páramos venezolanos, evaluando la distribución del fertilizante nitrogenado en los diferentes compartimientos del agroecosistema (suelo, planta, biomasa microbiana), algunos flujos entre compartimientos (absorción, inmovilización) y flujos de salida (lavado, pérdidas gaseosas).
2. Cuantificar la proporción del nitrógeno utilizado por el cultivo que proviene del fertilizante mineral y la que proviene del nitrógeno nativo del suelo.
3. Evaluar la eficiencia de uso por el cultivo de papa del fertilizante agregado.

SEGUNDA PARTE: Periodo de descanso

HIPOTESIS:

1.-El aumento de la fertilidad durante el descanso podría ser explicado por un aumento sucesional de la biomasa microbiana. Esta hipótesis ha sido señalada por Sarmiento (1995) y por Sarmiento y Bottner (2002) basándose en los resultados obtenidos al comparar dos parcelas con diferente tiempo de descanso. Estos autores señalan que la biomasa microbiana del suelo aumenta a lo largo de la sucesión y que está muy ligada a la restauración de la fertilidad. Al aumentar sucesionalmente la biomasa microbiana se incrementaría también su actividad, es decir aumentaría la mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS), lo que causaría un aumento de la disponibilidad de los nutrientes bajo formas minerales de fácil absorción para las plantas. También ocurrirían procesos de inmovilización de los nutrientes en la biomasa microbiana, protegiendo así las formas inorgánicas (principalmente el fertilizante) y disminuyéndose las pérdidas por lavado o por otros procesos. Un aumento en la biomasa microbiana implica también un aumento de la fracción lábil de la materia orgánica de la cual la biomasa microbiana forma parte en su rol de fuente y sumidero de nutrientes. En nuestro trabajo se plantea probar esta hipótesis en un mayor número de parcelas.

2.-La segunda hipótesis plantea que se produce un aumento sucesional del carbono y del nitrógeno potencialmente mineralizables. Esta hipótesis ha sido planteada por Sarmiento y Bottner (2002) en base a los resultados obtenidos del análisis de dos parcelas adyacentes en la misma zona de estudio. Estos autores

encontraron que el N y C potencialmente mineralizables aumentan a lo largo de los descansos. Este aumento sucesional del nitrógeno y carbono potencialmente mineralizables podría ser explicado por una mayor actividad de los microorganismos del suelo lo cual aumentaría la fracción lábil de la materia orgánica del suelo y por ende se incrementaría el flujo de nutrientes.

OBJETIVOS :

1. Analizar el comportamiento de la biomasa microbiana y el C y N mineralizables a lo largo de los periodos de descanso.
2. Identificar las propiedades edáficas relacionadas con la biomasa microbiana y la mineralización del C y N en suelos de páramo.

ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación: El área de estudio está ubicada en el páramo de Gavidia, el cual está dentro de los límites del Parque Nacional Sierra Nevada de la cordillera de Mérida, en el Municipio Rangel del estado Mérida (8° 35'- 8° 45' N, 70° 52'-70° 58' O). Gavidia es un pequeño caserío que se encuentra a 10 kilómetros de la población de Mucuchíes, a lo largo del estrecho valle del río Gavidia, que comienza a 4200 msnm en una fila de riscos y cumbres y termina a 2700 msnm. La actividad agrícola está restringida a la franja altitudinal de los 3000 a 3700 msnm.

Clima: El régimen de precipitación es unimodal, con una precipitación promedio de 1300 mm y una temperatura media anual de 8.5°C. La estación seca se presenta entre diciembre y marzo, durante la cual son frecuentes las heladas

nocturnas y se restringe la actividad agrícola. La estación lluviosa ocurre entre abril a octubre con un pico de lluvias entre junio-julio, con precipitaciones cercanas a 400 mm (Sarmiento, 1995).

Sarmiento (1995), presenta los resultados obtenidos en los años 1991 y 1992 del balance hídrico en una parcela ubicada en un cono de deyección, donde señala a la evapotranspiración como el proceso más importante en la pérdida del agua. También señala valores bajos de escorrentía y de erosión que podrían estar relacionados con los valores altos de la materia orgánica en los suelos. La alta capacidad de retención de humedad de los suelos está ligada con los valores altos de materia orgánica, la cual no cambia en las parcelas cultivadas ni en las parcelas con diferentes edades de descanso, en comparación al páramo (Sarmiento, 2000).

Geología y Suelos

Los suelos se derivan de materiales aluviales y coluviales de till morrenico, ubicados sobre terrazas, conos de deyección, restos de viejas terrazas y zonas de pendientes abruptas. El origen del Valle es glacial con su característica forma en "U" (Mogollón y Comerma, 1994).

Aranguren y Monasterio (1997), analizan un perfil de suelo a 3200 msnm, clasificándolo como un Ustic humitropepts (marrón muy oscuro) correspondiente a un inceptisol, con rocas metamórficas, de origen precámbrico de la facies Sierra Nevada, altos porcentajes de carbono orgánico indicando que es un suelo muy rico en materia orgánica, siendo ésta una limitación ya que la disponibilidad de

nutrientes es baja y tomando en cuenta las bajas temperaturas que imponen limitaciones en los procesos de descomposición.

Llambí y Sarmiento (1998), haciendo un resumen de los resultados obtenidos en la zona por algunos autores señalan que los suelos son típicos de las zonas de páramo andino: ácidos con pH entre 5.6 y 5.7, horizonte A húmico muy rico en materia orgánica, textura franco-arenosa con un aumento de las arenas y disminución de las arcillas con relación a la profundidad, el nitrógeno total es relativamente alto (0.67-0.68% en los primeros 25 cm) y tiende a disminuir con respecto a la profundidad. En términos generales son suelos muy pobres en nutrientes con una marcada disminución de las bases cambiables en el perfil, niveles de saturación de bases inferiores al 10% en los primeros 25 cm, es decir son suelos con baja fertilidad, donde pueden presentarse un estrés nutricional por una moderada a baja capacidad de intercambio catiónico y bases cambiables, bajo grado de alteración de la roca madre y bajas tasas de descomposición de la materia orgánica debido a las bajas temperaturas.

Vegetación

La vegetación natural predominante es el páramo andino, característico de la alta montaña tropical húmeda, perteneciente a la formación "Arbustal-Rosetal" (Monasterio 1980), con una gran abundancia de plantas arrosietadas del género *Espeletia* (*E. schultzii* y *E. floccosa*), arbustos de los géneros *Hypericum*, *Baccharis*, *Acaena*, *Stevia* y una gran variedad de gramíneas adaptadas a las condiciones de estrés hídrico y térmico de estos ambientes (Aranguren y Monasterio, 1997). La impresión visual del Valle de Gavidia es de un mosaico donde se interdigitan zonas de páramo con áreas en diferentes etapas

sucesionales y con parcelas cultivadas. En cuanto a la vegetación sucesional, Montilla (1993) analizando parcelas con diferente tiempo de descanso (1, 6 y 12 años) señala que después de un año de descanso la vegetación está dominada por *Rumex acetosella*, en la parcela correspondiente a seis años de descanso, se encontró que aparece otro tipo de vegetación dominada por *Senecio formosus* y *Trisetum irazuense*, en la parcela con doce años de descanso se observó una dominancia de especies características de la vegetación natural, como *Espeletia schultzii* y arbustos de los géneros *Baccharis* e *Hypericum*, características de etapas sucesionales tardías. Con respecto a la dinámica sucesional de la vegetación, Sarmiento *et al.* (2003) señalan que en los estadios tempranos de la sucesión domina fuertemente *Rumex acetosella*, en los estadios intermedios abunda *Lupinus meridanus* y en los estadios avanzados los arbustos y leñosas características del páramo.

Características del Sistema de Agricultura

El sistema de uso de la tierra en Gavidia se caracteriza por un periodo de explotación donde se siembra papa (*Solanum tuberosum*) y que puede extenderse a un lapso de tiempo de cuatro años. En algunos casos luego de la papa se cultiva un cereal como trigo o avena durante un año, este último utilizado como forraje para el ganado. Luego las parcelas entran en un periodo de descanso que puede variar de tres a 20 años, tiempo en el cual ocurre la sucesión secundaria. Generalmente las parcelas en descanso son utilizadas con fines de pastoreo y su intensidad depende de la cercanía de las parcelas a la vivienda del productor (Aranguren y Monasterio, 1997).

El sistema agrícola de la zona se basa en la comercialización de la papa, las variedades de este cultivo que se siembran son de ciclo largo que van desde cinco a ocho meses. Las técnicas agrícolas utilizadas consisten en un “arado de rompedura” que incorpora la vegetación sucesional al suelo como abono verde, esta labor se hace con arados de bueyes, cuatro a cinco meses antes de la siembra (época seca). Luego se realiza un “arado de siembra” y se siembra. Otras labores que se efectúan en el cultivo son el aporque y la fertilización con abonos químicos (utilizados desde hace unos 20 años por la mayoría de los productores). La cosecha se inicia en agosto y se puede prolongar hasta diciembre, en ésta se utiliza en algunas ocasiones el arado para aflojar la tierra y se extraen las papas manualmente. La mano de obra es principalmente familiar o de trabajo comunitario (Aranguren y Monasterio 1997), cada unidad familiar maneja una finca de tamaño muy variable, el número de parcelas destinadas al descanso y a la siembra va a depender de los precios de la papa en los mercados y de la intensidad de las plagas.

La heterogeneidad espacial

Una característica de los ambientes montañosos que puede ser considerada como uno de los principales problemas metodológicos al momento de analizar los cambios en el suelo a lo largo de la sucesión secundaria es la alta heterogeneidad espacial. Scheu (1990) señala que la heterogeneidad espacial en el ambiente puede introducir diferencias entre las parcelas debido a otros factores además del tiempo de descanso. Llambí y Sarmiento (1998), señalan que esta heterogeneidad

entre las parcelas se debe principalmente a que están ubicadas en sitios que varían ampliamente con respecto a:

- Las pendientes y la posición en la ladera.
- La geomorfología y microtopografía.
- La estructura original de la vegetación.
- La exposición solar dependiendo de la ubicación de las parcelas en las dos laderas del valle.
- La intensidad de pastoreo.
- El manejo durante el cultivo (fertilización, densidad de siembra, etc).
- La historia agrícola, principalmente en el número de ciclos cultivo-descanso por los cuales ha pasado cada parcela.

Como lo señalan estos autores, la heterogeneidad espacial dificulta el análisis de las tendencias sucesionales utilizando enfoques sincrónicos. Schmitz et al. (1989), al estudiar una sucesión en un pastizal mediterráneo, reportan resultados similares, donde las características asociadas a las variaciones topográficas tienen mayor importancia en determinar la abundancia y composición de la comunidad microbiana que el tiempo de descanso ya que los procesos estudiados se relacionan estrechamente con la dinámica geomorfológica de las laderas.

Llambí y Sarmiento (1998), señalan que para entender la dinámica sucesional de la recuperación es fundamental evaluar como ésta es modulada por la heterogeneidad de condiciones que caracteriza a estos ambientes y recomiendan complementar el análisis sincrónico con un seguimiento de parcelas de año en año (análisis diacrónico) para disminuir el posible efecto de dicha variabilidad.

Tomando en cuenta las recomendaciones mencionadas anteriormente por Llambí y Sarmiento (1998), en esta tesis nos planteamos complementar el análisis sincrónico con un análisis diacrónico realizado mediante un doble muestreo de las parcelas con tres años de intervalo, con el fin de eliminar el efecto de la heterogeneidad espacial y poder visualizar tendencias sucesionales, excluyendo el efecto de los factores enumerados anteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

- Aranguren, A. y M. Monasterio. 1997. Aspectos de la Dinámica del nitrógeno de parcelas con diferentes tiempos de descanso en el Páramo de Gavidia (Andes Venezolanos). En: Liberman, M. y C. Baied. (Eds). Desarrollo sostenible de ecosistema de montañas: Manejo de Áreas Frágiles en los Andes. UNU-PL-880. pp 171-179.
- Blanco, O. 1994. Efecto del descanso del suelo sobre el número y viabilidad de quistes de *Globodera* spp. de la papa. En Hervé, D. Genin, D. Y G. Riviere. (Eds). Dinámica del descanso de la tierra en los Andes. IBTA-ORSTOM. La Paz pp. 171-175.
- Brugioni, I. 1994. Intereses y límites de la aplicación de técnicas de *dry-farming* para el manejo del descanso en el altiplano boliviano. En: Hervé, D. Genin, D y G, Riviere. (Eds). Dinámica del descanso de la tierra en los Andes. IBTA-ORSTOM. La Paz pp. 141-155.
- Ferwerda, W. 1987. The influence of potato cultivation on the natural bunchgrass paramo in the colombian Cordillera Oriental. Internar report no. 220. Hugo de Vries Laboratory. University of Amsterdam. 83 pp.
- Hervé, D. 1994. Desarrollo sostenible en los Andes Altos: los sistemas de cultivo con descanso largo pastoreado. En: Hervé, D. Genin, D. y G. Riviere. (Eds). Dinámica del descanso de la tierra en los Andes. IBTA-ORSTOM. La Paz pp. 15-36.
- Jaimes, V. 2000. Estudio ecológico de una sucesión secundaria y mecanismos de recuperación de la fertilidad en un ecosistema de páramo. Tesis de Maestría. Postgrado de Ecología Tropical. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Llambí, L. D. 1997. Recuperación de la fertilidad en una Sucesión en el Páramo: Biomasa Microbiana y Ciclaje de Nitrógeno. Tesis de Licenciatura. Universidad Simón Bolívar. 116 pp.

- Llambí, L. D. y L. Sarmiento. 1998. Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria de los páramos venezolanos. *Ecotrópicos* 11(1): 1-14.
- Mogollón y Comerma, 1994. Suelos de Venezuela. Producido por la gerencia Corporativa de asuntos publicos de PALMAVEN, filial de PDVSA. Editorial EXLIBRIS, C.A.
- Monasterio, M. 1980. Las formaciones vegetales de los páramos de Venezuela. En: Monasterio, M. (Eds). *Estudios ecológicos en los Páramos Andinos*. pp. 93-159. Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela.
- Montilla, M. 1993. Procesos ecológicos en el manejo del suelo. Seminario Internacional de Agricultura Tropical. Centro de Investigaciones Ecológicas de los Andes Tropicales (CIELAT). Mérida. Venezuela.
- Sarmiento, L. 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Tesis de Doctorado. Universidad de Paris XI. 237 p.
- Sarmiento, L. y Monasterio, M. 1993. Elementos para la interpretación ecológica de un sistema agrícola campesino de los páramos venezolanos. En: Rabey, M. (Ed.). *El uso tradicional de los recursos en montañas: tradición y transformación*. UNESCO-ORCYT. Montevideo, Uruguay.
- Sarmiento, L. Monasterio, M. y Montilla, M. 1993. Ecological bases, sustainability, and current trends in traditional agriculture in the Venezuelan high Andes. *Mountain Research and Development* 13 (2):167-176.
- Sarmiento, L. 2000. Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. *Mountain Research and Development* 20 (3):246-253.
- 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. *Applied Soil Ecology* 19(1): 79-89.
- Sarmiento, L. Llambí, L.D. Escalona, A. y J. Márquez. 2003. Vegetation patterns, regeneration rates and divergence in an old-field succession of the high tropical Andes. *Plant Ecology* 166:63-74.
- Scheu, S. 1990. Changes in microbial nutrient status during secondary succession and its modifications by earthworms. *Oecología* 84: 381-358.
- Schmitz, M. Yuste, P. Bermudez, F. y F. Pineda. 1989. Microorganisms of carbon and nitrogen cycles: variation during succession in a Mediterranean pasture. *Reviews in Ecology and Biology of Soils* 26 (4): 371-389.

CAPITULO 1

DESTINO DEL NITRÓGENO AGREGADO POR FERTILIZACIÓN EN UN CULTIVO DE PAPA EN LOS ANDES DE VENEZUELA*

RESUMEN

Se evaluó la distribución del N nativo y proveniente del fertilizante en un cultivo de papa fertilizado con $^{15}\text{NH}_4$ (288 kg ha^{-1}) y en un cultivo control sin fertilizar en los páramos venezolanos. Se realizaron dos muestreos, a los 91 y 189 días después de la siembra. En el primer muestreo el 16% del N del fertilizante agregado se encontraba en la biomasa del cultivo, 76% en el suelo, 3% había salido del sistema por lavado y 5% no fue detectado. En el segundo muestreo 23% del N aplicado se encontraba en la biomasa del cultivo, 39% en el suelo, 6% se había perdido por lavado y el 32% faltante no fue detectado. El N del fertilizante representó 69% del N total absorbido por el cultivo, indicando una baja disponibilidad de N nativo, a pesar de la gran cantidad de N orgánico presente en el suelo. El 10% del fertilizante marcado fue inmovilizado por la biomasa microbiana durante el primer muestreo, disminuyendo a 7% durante el segundo muestreo. En el primer muestreo predominó el NH_4 en el pool de N mineral mientras que en el segundo fue más abundante el NO_3 , evidenciándose una fuerte nitrificación que pudo haber favorecido las pérdidas del fertilizante por denitrificación, lo cual puede explicar, al menos parcialmente, el N del fertilizante que no fue detectado.

Palabras claves: eficiencia de uso del nitrógeno (NUE), nitrógeno derivado del fertilizante (NDF), biomasa microbiana, nitrógeno mineral, lavado, pérdidas gaseosas, páramo.

*Este capítulo será publicado posteriormente como artículo con los siguientes autores: Zoraida Abreu¹, Lina Sarmiento¹ y Pierre Botner². 1 Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela. 2 Centre d' Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, CNRS, 1919 Route de Mende, 34293 Montpellier Cedex 05, France.

INTRODUCCION

La papa constituye actualmente el principal rubro agrícola de los valles altos andinos venezolanos (Ministerio de Producción y Comercio, 1999). Para su cultivo se utilizan cantidades crecientes de fertilizantes y otros insumos, como parte del proceso de intensificación agrícola que durante las últimas décadas ha ocurrido en la región (Velásquez, 2001). El uso de fertilizantes nitrogenados implica una importante inversión económica para los productores andinos, sin embargo la eficiencia de uso del N del fertilizante por el cultivo (NUE) es aparentemente muy baja. Sarmiento (1995) en un estudio realizado en los páramos venezolanos obtiene, con una fertilización nitrogenada promedio de 288 kg ha^{-1} , una NUE del cultivo de papa inferior al 16%. En la literatura se señalan eficiencias de recuperación de N por los cultivos entre 10 y 80%, dependiendo del tipo de fertilizante, del tiempo de aplicación, del tipo de suelo y de las condiciones climáticas, considerándose aceptable valores superiores al 50% (van Keulen y Wolf, 1986), valor muy por encima del mencionado anteriormente para el cultivo de papa en la zona del páramo venezolano. El N aplicado que no es absorbido por el cultivo puede permanecer en el suelo o perderse por lavado, denitrificación o volatilización, desconociéndose la importancia de cada proceso en el caso de los Andes venezolanos. Una baja NUE no sólo va en detrimento de los costos de producción del cultivo sino que las pérdidas de N por drenaje o por vía gaseosa pueden constituir un problema grave para el ambiente y la salud humana.

Para entender las causas de la baja NUE del cultivo de papa y el destino del N no absorbido es necesario cuantificar los diferentes procesos del balance del N. Este tipo de estudio puede también contribuir al mejoramiento de las prácticas agrícolas

en aras de lograr una optimización en el uso de los fertilizantes. A pesar del interés económico y ambiental de esta temática, existen muy pocos trabajos sobre el ciclado de N en cultivos de papa bajo condiciones de alta montaña tropical, particularmente con variedades locales y menos comerciales.

Para el estudio de la dinámica del N en un agroecosistema deben analizarse los flujos de entrada y salida, así como las transferencias entre los diferentes compartimientos que ocurren por mineralización del N orgánico, inmovilización en la biomasa microbiana, humificación, nitrificación, lixiviación, denitrificación, volatilización, deposición y fijación biológica. En este trabajo nos planteamos analizar la dinámica del N en un ciclo de cultivo de papa en los páramos venezolanos, evaluando la distribución del fertilizante nitrogenado en los diferentes compartimientos del agroecosistema (suelo, planta, biomasa microbiana), algunos flujos entre compartimientos (absorción, inmovilización) y flujos de salida (lavado, pérdidas gaseosas). Con esta finalidad se utilizó un fertilizante marcado con ^{15}N , el cual nos permite distinguir el N proveniente del fertilizante del N nativo del suelo. Los objetivos fueron determinar el grado de recuperación del fertilizante nitrogenado por el cultivo, analizar dónde se encuentra el N no utilizado y qué fracción del mismo se ha perdido y por qué vía.

METODOLOGÍA

Área de Estudio

El estudio se realizó en el Páramo de Gavidia localizado entre 8° 35'- 8° 45' de latitud N y 70° 52'-70° 58' de longitud O dentro del parque Nacional Sierra Nevada, en la cordillera de Mérida, a 10 kilómetros de la población de Mucuchíes y a una altitud de 3300 m. El régimen de precipitación es unimodal, con un promedio de 1300 mm y una temperatura media anual de 8.5°C. Durante la estación seca, entre diciembre y marzo, son frecuentes las heladas nocturnas, restringiéndose la actividad agrícola.

El sistema agrícola se caracteriza por la alternancia de periodos de cultivo de 1 a 4 años, en los cuales se cultivan papas y cereales, con periodos de descanso que pueden durar más de 10 años. El ciclo de cultivo se inicia con un arado de rompedura, cinco meses antes de la siembra, que incorporara la vegetación de la parcela como abono verde, luego se realiza la siembra, durante la cual se ara nuevamente y se coloca la semilla y el fertilizante mineral. Estas labores son realizadas con el tradicional arado de bueyes. Las variedades de papa que se cultivan son de ciclo largo, de cinco a ocho meses, y en su mayoría pertenecen a la subespecie *andigenum*.

Diseño experimental

Se cultivaron con papa dos parcelas adyacentes, una control y otra fertilizada. Ambas parcelas presentaban condiciones similares de topografía, pendiente, exposición y tipo de suelo y habían pasado por un descanso previo de 7 años. En

la tabla 1 se resumen algunas características del suelo, entre las que cabe destacar el alto contenido de arena, los valores altos de C y N y los pH ácidos.

Tabla 1. Propiedades del suelo de las parcelas cultivadas.

Prof. (cm)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	pH	C (%)	N (%)	Pedregosidad (% v/v)
0-30	55.0	13.7	31.3	4.53	9.95	0.61	23
30-50	60.5	10.0	29.5	4.77	8.05	0.42	45
50-70	73.0	6.5	20.5	4.82	3.54	0.17	70

Datos tomados de Sarmiento (1995)

La semilla de papa utilizada fue adquirida en la zona y es conocida como “papa roja”, la cual recibió un tratamiento artesanal realizado por los mismos productores. La preparación de la parcela, corte e incorporación de la vegetación al suelo, se realizó el 26 de noviembre de 1999 y la siembra se efectuó el 7 de abril de 2000. El área de cada parcela fue de 19 m², con 5 surcos simples de 4.75 m de largo, espaciados a 0.90 m. La distancia entre plantas fue de 0.25 m, lo que equivale a una densidad de siembra de 44.444 plantas ha⁻¹. En cada surco se sembraron 17 plantas, para un total de 85 plantas. Se planificaron 4 muestreos durante el ciclo de cultivo pero sólo se realizaron 2, debido a que después del primer muestreo, realizado 91 días después de la siembra, ocurrió una helada excepcional que afectó las plantas, pudiéndose realizar únicamente un segundo muestreo al momento de la cosecha (189 días después de la siembra). Esta helada ocurrió el 10 de julio de 2000 y afectó severamente a los cultivos de papa, no sólo en el área de estudio sino en toda la región.

La dosis de fertilizante utilizada fue la promedio para la zona (Sarmiento, 1995) equivalente a 288 kg de N ha⁻¹ (6.48 g N planta⁻¹), 288 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (2.83 g P planta⁻¹) y 144 kg de K₂O ha⁻¹ (2.68 g K planta⁻¹). Se agregaron 2.31 g N planta⁻¹ en forma de ¹⁵NH₄Cl, con un enriquecimiento isotópico de 13% y para complementar la dosis de N se utilizó fosfato diamónico y sulfato de amonio a razón de 15.4 y 8.6 g planta⁻¹ respectivamente. El K se agregó en forma de sulfato de potasio a razón de 6.48 g planta⁻¹. Para realizar una aplicación homogénea del fertilizante la dosis correspondiente a cada planta fue mezclada con 2 kg de suelo en el momento de la siembra y distribuida alrededor de la semilla con la ayuda de un marco de 20 x 20 cm. El enriquecimiento isotópico después de mezclar el ¹⁵NH₄Cl con los otros fertilizantes nitrogenados fue de 4.2 %.

El primer y último surco de ambas parcelas fueron dejados como borde, muestreándose solamente los tres surcos interiores. En los surcos de muestreo se dejaron también plantas de borde, no muestreando nunca una planta que no estuviera rodeada por otras plantas por todos sus lados. En cada uno de los muestreos se recogió la parte aérea, los tubérculos y las raíces, hasta 30 cm de profundidad, de nueve plantas por parcela para determinación de biomasa y análisis de N total y ¹⁵N. Además se colectó todo el suelo a tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) usando un marco de 90 x 25 cm para delimitar el área de suelo a muestrear, que es el área que según la densidad de siembra utilizada corresponde a cada individuo. El suelo de cada capa fue tamizado a 4 mm, pesado y homogeneizado en el campo para finalmente tomar una muestra de aproximadamente 1 kg que fue utilizada para analizar N y ¹⁵N mineral (NH₄ y NO₃), N y ¹⁵N de la biomasa microbiana y ¹⁵N total en cada capa.

Para evaluar las pérdidas de N por lavado, se instalaron 8 lisímetros cerrados en el borde inferior de la parcela fertilizada. Los lisímetros fueron construidos con cilindros metálicos hechos con lámina galvanizada con una superficie de 0,225 m² (calculada en función de la densidad de siembra) y una altura de 35 cm y fueron llenados respetando la densidad aparente del suelo y las proporciones suelo-piedra de cada capa, determinadas en la parcela en un muestreo previo. En cada lisímetro se sembró una planta, la cual recibió la misma dosis de fertilizante que las plantas de la parcela. Una vez iniciado el drenaje se midió semanalmente el volumen de agua y se tomó una muestra de 500 ml de cada lisímetro, las cuales fueron congeladas a -15°C. Con el agua colectada semanalmente se realizó una muestra compuesta mensual, la cual fue analizada para N total y ¹⁵N.

Análisis químicos

Las determinaciones de N total en los distintos compartimientos vegetales se realizaron por triplicado, utilizando el método de Kjeldahl. El N de la biomasa microbiana se determinó utilizando el método de fumigación-extracción (Brookes et al., 1985). El suelo fue tamizado a 4 mm y tres réplicas de suelo fresco, equivalente a 40 g de suelo seco, fueron fumigadas por 18 h con cloroformo libre de alcohol. Después de remover el cloroformo, los suelos fumigados y tres controles de suelo no fumigado fueron extraídos con K₂SO₄ 1N (proporción suelo:solución 1:5). El N total de los controles y de los fumigados fue determinado por digestión y destilación, utilizando el método de Kjeldahl. El N de la biomasa microbiana fue calculado como la diferencia entre fumigados y controles dividida por un factor de 0.54 (Joergensen y Mueller, 1996). Este método también permite

calcular el nitrógeno extraíble, que es el N total medido en los extractos controles. El nitrógeno mineral (NH_4^+ y NO_3^-) se determinó usando tres réplicas de suelo tamizado a 4 mm equivalente a 40 g de suelo seco, los cuales fueron extraídos con 150 ml de K_2SO_4 1N. Para la determinación del NH_4^+ el extracto fue destilado agregando MgO y para el NO_3^- agregando una mezcla de aleación Dewarda y MgO (Keeney y Nelson, 1982). El N orgánico extraíble fue calculado como el N extraíble menos el N mineral.

Una vez titulados los extractos del nitrógeno mineral (Nm) y microbiano (N-BM) el pH de la muestra fue ajustado entre 3 y 4 agregándole H_2SO_4 1N para evitar pérdidas de N y luego las muestras fueron evaporadas hasta obtener los cristales de sulfato de amonio, que se analizaron por espectrometría de masas para obtener el valor de abundancia isotópica. Las muestras de suelo y planta fueron molidas muy finamente utilizando un molino de bolas y analizadas para N total y ^{15}N utilizando un analizador CHN y espectrometría de masas.

Para el análisis de N en el agua de drenaje se utilizó el método de Kjeldahl, utilizándose 300 ml de la muestra. Las muestras fueron previamente concentradas por evaporación en estufa y luego digeridas, la abundancia isotópica se determinó de manera similar a la mencionada anteriormente.

Procesamiento de los datos y análisis estadísticos

Con el valor de la abundancia isotópica (A) se calculó el exceso isotópico ($E = A - 0.3663$, Guiraud, 1984). La proporción de N proveniente del fertilizante en cada compartimiento (NDF) fue determinada como el cociente entre el exceso isotópico de la muestra y el del fertilizante (Tran y Giroux, 1991). La eficiencia en el uso del fertilizante (NUE) fue calculada como el cociente entre el N del cultivo en el

momento de la cosecha y el N aplicado por fertilización. Las diferencias entre los dos tratamientos se evaluaron mediante un test de comparación de medias (test de t).

RESULTADOS

Biomasa y Nitrógeno en las plantas

La biomasa del cultivo fue mayor en el tratamiento fertilizado que en el control en los dos muestreos y para todos los compartimientos analizados (tabla 2). En el primer muestreo las diferencias fueron significativas sólo para la biomasa aérea, mientras que en el segundo muestreo las diferencias fueron significativas para todos los compartimientos. En el primer muestreo la biomasa aérea representó el mayor porcentaje de la biomasa total, mientras que en el segundo muestreo la mayor proporción de biomasa corresponde a los tubérculos. En la parcela fertilizada la producción en peso fresco de los tubérculos fue 10 veces mayor en comparación a la parcela control, 14.5 t ha^{-1} y 1.2 t ha^{-1} respectivamente.

Es importante observar la gran desviación estándar de los valores de biomasa en ambas parcelas, que refleja una significativa variabilidad entre individuos en estos cultivos realizados utilizando semillas artesanales, con coeficientes de variación que alcanzan valores mayores al 100%.

La concentración de N en la biomasa del cultivo fue en ambos muestreos significativamente mayor en el tratamiento fertilizado para todos los compartimientos de la planta, encontrándose las mayores concentraciones en la parte aérea, seguida por las raíces y los tubérculos (tabla 2). La variabilidad de

este parámetro fue mucho menor que la de la biomasa, con coeficientes de variación que no superan el 25%.

El nitrógeno proveniente del fertilizante (%NDF) fue 75% y 71% para el primer y segundo muestreo respectivamente (tabla 3). En el primer muestreo la biomasa aérea presentó un %NDF ligeramente mayor que los otros compartimientos, mientras que en el segundo muestreo las diferencias no fueron importantes.

La fertilización promovió la absorción de N nativo del suelo, la cual fue considerablemente mayor en la parcela fertilizada (2.89 g m^{-2}) comparada con la control (0.89 g m^{-2}).

Tabla 3. Nitrógeno proveniente del suelo (nativo) y del fertilizante (NDF) en los distintos compartimientos de la planta en la parcela fertilizada. Promedios \pm desviación estándar (n=9)

		N nativo (gN m^{-2})	NDF (gN m^{-2})	%NDF
91 días	Biomasa aérea	1.05 ± 0.93	3.53 ± 3.99	77.0
	Raíces	0.12 ± 0.08	0.29 ± 0.27	71.4
	Tubérculos	0.31 ± 0.40	0.65 ± 1.03	67.6
	Total	1.48 ± 0.49	4.47 ± 1.78	75.1
189 días	Biomasa aérea	1.04 ± 0.33	2.74 ± 0.95	72.6
	Raíces	0.07 ± 0.06	0.22 ± 0.17	74.7
	Tubérculos	1.78 ± 0.97	3.99 ± 2.29	69.2
	Total	2.89 ± 0.86	6.94 ± 1.92	70.5

Tabla 2: Biomasa, concentración de N y cantidad de N en los diferentes compartimientos de la planta para las dos fechas de muestreo. Promedio \pm desviación estándar (n=9). Se indican los porcentajes del total por compartimiento y el valor de p para la comparación entre tratamientos (test de t).

		-----Biomasa (g m ⁻²)-----					-----Nitrógeno (%)-----			-----Nitrógeno (g m ⁻²)-----				
		Parcela control	%	Parcela fertilizada	%	p	Parcela control	Parcela fertilizada	p	Parcela control	%N	Parcela fertilizada	%N	p
91 días	Biomasa aérea	16.9 \pm 8.4	49.3	84.5 \pm 94.9	57.3	0.00	2.9 \pm 0.2	5.9 \pm 0.8	0.00	0.49 \pm 0.26	67.8	4.56 \pm 4.90	77.0	0.02
	Raíces	9.7 \pm 4.3	28.4	14.5 \pm 13.2	9.8	0.32	1.5 \pm 0.2	3.5 \pm 1.2	0.00	0.14 \pm 0.06	19.7	0.41 \pm 0.34	6.8	0.04
	Tubérculos	7.6 \pm 6.4	22.3	48.5 \pm 78.9	32.9	0.14	1.3 \pm 0.2	2.3 \pm 0.5	0.00	0.09 \pm 0.07	12.5	0.96 \pm 1.43	16.2	0.09
	Total	34.2 \pm 17.1	100	147.4 \pm 177.9	100	0.08				0.72 \pm 0.36	100	5.94 \pm 6.44	100	0.03
189 días	Biomasa aérea	14.3 \pm 10.2	33.9	81.2 \pm 27.9	21.2	0.00	3.6 \pm 0.4	4.8 \pm 0.7	0.00	0.49 \pm 0.36	55.9	3.77 \pm 1.25	38.4	0.00
	Raíces	4.7 \pm 2.6	11.2	11.7 \pm 8.0	3.0	0.03	1.5 \pm 0.3	2.4 \pm 0.5	0.00	0.07 \pm 0.03	7.5	0.29 \pm 0.23	2.9	0.01
	Tubérculos	23.2 \pm 19.9	54.9	290.8 \pm 149.2	75.8	0.00	1.4 \pm 0.2	1.9 \pm 0.3	0.00	0.33 \pm 0.28	36.6	5.77 \pm 3.24	58.7	0.00
	Total	42.2 \pm 30.2	100	383.7 \pm 169.8	100	0.00				0.89 \pm 0.61	100	9.83 \pm 3.91	100	0.00

Nitrógeno del suelo

El N de la biomasa microbiana del suelo (N-BM), aumenta con la fertilización, siendo 30% mayor en el tratamiento fertilizado que en el control durante el primer muestreo, si se considera el conjunto del perfil. Sin embargo la diferencia fue sólo significativa para la profundidad 20-30 cm (tabla 4). Para el conjunto del perfil (0-30 cm) la diferencia fue significativa a $p=0.06$. En el segundo muestreo no hubo diferencias significativas entre parcelas, observándose una disminución del N-BM con respecto al primer muestreo, principalmente en la capa 0-10 cm.

Tabla 4. Cantidad de N (g m^{-2}) en distintos compartimientos del suelo y en las distintas profundidades para la parcela control y fertilizada. N-BM: N en la Biomasa microbiana, Nm: N mineral total, N Org. Ex.: N orgánico extraíble. Promedio \pm desviación estándar ($n=9$). El valor de p indica la significancia de las diferencias entre tratamientos según un test de t .

	91 días				189 días		
	Prof (cm)	Parcela control	Parcela fertilizada	p	Parcela control	Parcela fertilizada	p
N-BM	0-10	2.41 \pm 0.96	3.47 \pm 2.44	0.25	1.24 \pm 0.35	1.59 \pm 0.90	0.31
	10-20	2.65 \pm 0.24	2.99 \pm 0.55	0.11	2.63 \pm 1.24	3.15 \pm 1.33	0.43
	20-30	1.39 \pm 0.61	2.17 \pm 0.69	0.03	1.79 \pm 0.41	2.25 \pm 0.67	0.11
	0-30	6.45 \pm 1.16	8.64 \pm 2.97	0.06	5.66 \pm 1.82	6.99 \pm 1.48	0.14
Nm	0-10	0.39 \pm 0.08	12.89 \pm 2.26	0.00	0.39 \pm 0.09	3.46 \pm 2.58	0.00
	10-20	0.49 \pm 0.16	3.32 \pm 2.28	0.02	0.68 \pm 0.40	4.15 \pm 2.14	0.00
	20-30	0.58 \pm 0.45	1.50 \pm 1.08	0.04	0.47 \pm 0.16	3.04 \pm 0.88	0.00
	0-30	1.47 \pm 0.33	17.71 \pm 4.54	0.00	1.54 \pm 0.63	10.66 \pm 5.02	0.00
NH ₄	0-10	0.06 \pm 0.02	12.34 \pm 2.13	0.00	0.03 \pm 0.02	2.53 \pm 2.44	0.01
	10-20	0.08 \pm 0.04	2.48 \pm 2.04	0.00	0.06 \pm 0.04	1.58 \pm 1.48	0.01
	20-30	0.09 \pm 0.06	0.69 \pm 0.68	0.02	0.03 \pm 0.02	0.27 \pm 0.02	0.00
	0-30	0.24 \pm 0.06	15.51 \pm 4.13	0.00	0.13 \pm 0.04	4.29 \pm 3.58	0.00
NO ₃	0-10	0.32 \pm 0.06	0.55 \pm 0.29	0.04	0.36 \pm 0.08	0.93 \pm 0.25	0.00
	10-20	0.42 \pm 0.13	0.84 \pm 0.47	0.02	0.62 \pm 0.37	2.57 \pm 0.72	0.00
	20-30	0.49 \pm 0.41	0.81 \pm 0.42	0.15	0.44 \pm 0.17	2.86 \pm 0.73	0.00
	0-30	1.23 \pm 0.30	2.20 \pm 0.99	0.01	1.41 \pm 0.61	6.37 \pm 1.49	0.00
N Org. Ext.	0-10	0.64 \pm 0.10	0.81 \pm 0.62	0.42	0.40 \pm 0.15	0.37 \pm 0.20	0.76
	10-20	0.69 \pm 0.17	0.44 \pm 0.19	0.02	1.05 \pm 0.32	3.12 \pm 4.21	0.16
	20-30	1.47 \pm 1.23	0.52 \pm 0.46	0.07	0.75 \pm 0.12	2.07 \pm 0.99	0.00
	0-30	2.79 \pm 1.44	1.78 \pm 0.81	0.11	2.19 \pm 0.56	5.57 \pm 5.06	0.07

El %NDF de la biomasa microbiana representó, en el conjunto del perfil, un 26 y 30% del N microbiano total en el primer y segundo muestreo respectivamente (tabla 5). Además se observa una disminución del %NDF de la BM con la profundidad, sobre todo en el primer muestreo, en el cual pasa de 46% en la capa de 0-10 a 12% en la capa de 20-30 cm. En el segundo muestreo tanto el N-BM como el ^{15}N -BM disminuyen, pero este descenso fue más marcado en el caso del ^{15}N -BM.

En cuanto al N mineral total la parcela fertilizada presentó aproximadamente 10 veces más que la parcela control, con diferencias significativas entre las capas y entre los dos muestreos (tabla 4). En el tratamiento fertilizado se observa una apreciable disminución en la cantidad del Nm entre el primer y segundo muestreo. Mientras que en el tratamiento control los valores difieren muy poco entre los dos muestreos. En el primer muestreo el 83% del Nm proviene del fertilizante, pasando a 58% durante el segundo muestreo (tabla 5). También se observa una clara disminución del %NDF del compartimento mineral con la profundidad. La cantidad de Nm nativo fue dos veces mayor en la parcela fertilizada que en la control durante el primer muestreo y tres veces mayor en el segundo, sugiriendo una estimulación de la mineralización por la fertilización.

Durante el primer muestreo la forma inorgánica predominante en la parcela fertilizada fue NH_4 , que representó el 87% del N mineral total, debido posiblemente al tipo de fertilizante aplicado. La mayor parte del NH_4 se encontró en la primera capa del suelo, lo que se relaciona con la forma localizada en que se aplicó el fertilizante. Para el segundo muestreo tenemos una marcada disminución de los valores del NH_4 , principalmente en el tratamiento fertilizado y en la primera capa y

un aumento en los valores de NO_3 principalmente en el tratamiento fertilizado. Los valores de NO_3 en los dos muestreos fueron mayores en el tratamiento fertilizado en comparación al control. En la tabla 5 se observa que en el segundo muestreo la cantidad de NO_3 nativo es mayor que la proveniente del fertilizante. El NO_3 es el único compartimiento que muestra un incremento de un muestreo a otro, probablemente favorecido por procesos de nitrificación.

Los valores de N orgánico extraíble (tabla 4) en el primer muestreo no difieren mucho entre sí en los dos tratamientos. En el segundo muestreo se observa un incremento en el N orgánico extraíble en el tratamiento fertilizado, específicamente en las capas 10-20 y 20-30 cm pero solo con diferencias significativas en la última capa.

En la tabla 6 se presentan los resultados del N marcado total del suelo para los dos muestreos, el cual disminuye apreciablemente de una fecha a otra, debido a la absorción por el cultivo y las pérdidas por diversas vías. La diferencia entre la cantidad total de N proveniente del fertilizante y la suma de los compartimientos mineral, microbiano y extraíble, equivale al N orgánico no extraíble formado a partir del fertilizante. Se observa que este N orgánico no extraíble aumenta en el segundo muestreo en comparación al primero evidenciándose procesos de humificación.

Tabla 5. N nativo del suelo y del fertilizante (g m^{-2}) en distintos compartimientos en la parcela fertilizada en las distintas profundidades en los dos muestreos realizados. Promedio \pm desviación estándar (n=9).

	Prof.	91 días			189 días		
		N nativo	NDF	%NDF	N nativo	NDF	%NDF
N-BM	0-10	1.87 \pm 0.52	1.59 \pm 1.94	46.0	1.15 \pm 0.57	0.43 \pm 0.42	27.8
	10-20	2.57 \pm 0.45	0.43 \pm 0.17	14.4	2.21 \pm 1.19	0.94 \pm 0.93	30.2
	20-30	1.92 \pm 0.60	0.25 \pm 0.15	11.6	2.02 \pm 0.65	0.24 \pm 0.48	10.5
	0-30	6.36 \pm 1.26	2.28 \pm 2.02	26.4	5.38 \pm 1.57	1.61 \pm 0.87	29.9
Nm	0-10	1.26 \pm 0.41	11.64 \pm 2.03	90.3	0.81 \pm 0.30	2.65 \pm 2.27	76.6
	10-20	1.16 \pm 0.53	2.16 \pm 1.79	65.2	1.63 \pm 0.61	2.52 \pm 1.53	60.7
	20-30	0.68 \pm 0.38	0.83 \pm 0.77	54.9	2.06 \pm 0.55	0.98 \pm 0.33	32.3
	0-30	3.09 \pm 1.17	14.62 \pm 3.63	82.6	4.50 \pm 1.33	6.15 \pm 3.71	57.7
NH ₄	0-10	1.08 \pm 0.36	11.26 \pm 1.89	91.3	0.44 \pm 0.12	2.09 \pm 2.12	82.8
	10-20	0.73 \pm 0.42	1.74 \pm 1.65	70.4	0.46 \pm 0.31	1.12 \pm 0.69	70.9
	20-30	0.24 \pm 0.17	0.45 \pm 0.55	65.6	0.21 \pm 0.03	0.06 \pm 0.01	22.3
	0-30	2.05 \pm 0.86	13.46 \pm 3.35	86.8	1.11 \pm 0.81	3.27 \pm 2.82	74.7
NO ₃	0-10	0.18 \pm 0.12	0.38 \pm 0.23	67.9	0.37 \pm 0.12	0.57 \pm 0.18	60.6
	10-20	0.42 \pm 0.24	0.42 \pm 0.26	49.5	1.17 \pm 0.22	1.40 \pm 0.51	54.4
	20-30	0.44 \pm 0.24	0.37 \pm 0.23	45.9	1.92 \pm 0.43	0.94 \pm 0.30	32.9
	0-30	1.04 \pm 0.52	1.17 \pm 0.52	52.9	3.46 \pm 0.59	2.91 \pm 0.90	45.7
N.Org Ext.	0-10	0.66 \pm 0.45	0.15 \pm 0.25	18.5	0.34 \pm 0.79	0.03 \pm 1.13	8.1
	10-20	0.40 \pm 0.52	0.04 \pm 0.09	9.09	2.24 \pm 3.31	0.88 \pm 3.24	28.2
	20-30	0.46 \pm 0.24	0.06 \pm 0.16	11.5	0.98 \pm 1.78	1.09 \pm 1.05	52.7
	0-30	1.52 \pm 0.54	0.25 \pm 0.18	14.0	3.56 \pm 1.99	2.01 \pm 2.58	36.1

Tabla 6. N marcado total del suelo, suma del N marcado de los compartimientos mineral, microbiano y extraíble y N marcado orgánico no extraíble, en la parcela fertilizada en los dos muestreos realizados.

	N marcado total del suelo (g m^{-2})	N marcado (Nm+NBM+Norg.ext) (g m^{-2})	N marcado orgánico no Ex. (g m^{-2})
91 días	21.41 \pm 7.15	19.82 \pm 10.12	1.58 \pm 6.65
189 días	11.30 \pm 4.28	8.36 \pm 5.39	2.94 \pm 2.18

Nitrógeno lixiviado

El drenaje se inició en mayo, aproximadamente dos meses después del comienzo de las lluvias y alcanzó un valor máximo mensual de 99.1 mm en julio (tabla 7). El menor valor de agua drenada, 7.3 mm, correspondió a noviembre, que es el final del periodo de lluvias. El drenaje acumulado para el año 2000 representó un 27% de la precipitación.

El N lixiviado alcanzó el máximo valor en junio, coincidiendo con el mes de máxima precipitación. El N total perdido por lixiviación fue de 5.28 g m⁻², del cual el 38.5% provino del fertilizante. Se observa también un incremento en el N lixiviado proveniente del fertilizante a medida que transcurre el tiempo.

Tabla 7. Precipitación, drenaje y contenidos de N total y de N del fertilizante en el agua drenada obtenidos en la parcela fertilizada. Promedios \pm desviación estándar (n=8).

mes	Prec. (mm)	Agua Drenada (mm)	N total (g/m ²)	N fertilizante (g/m ²)	(%NDF)	N total acum. (g m ⁻²)	N fert. Acum. (gm ⁻²)
mayo	195.0	30.4 \pm 3.8	0.02 \pm 0.01	0.003 \pm 0.001	18	0.02	0.00
junio	385.0	72.4 \pm 9.8	1.44 \pm 0.67	0.35 \pm 0.29	24	1.46	0.35
julio	329.9	99.1 \pm 4.8	1.26 \pm 0.76	0.58 \pm 0.38	46	2.72	0.93
agosto	196.0	43.6 \pm 11.0	0.41 \pm 0.27	0.24 \pm 0.25	58	3.13	1.17
septiembre	219.0	73.5 \pm 1.5	0.93 \pm 0.64	0.40 \pm 0.29	43	4.06	1.57
octubre	126.0	81.9 \pm 9.7	1.11 \pm 0.87	0.41 \pm 0.37	36	5.17	1.98
noviembre	44.0	7.3 \pm 4.3	0.11 \pm 0.07	0.06 \pm 0.05	53	5.28	2.04

Balance de Nitrógeno

La tabla 8 presenta los balances de N para ambos muestreos. En el primer muestreo el 91.9% del fertilizante aun se encontraba en el agroecosistema, 76% en el suelo, 15.6% en la biomasa del cultivo, 3.2% se había perdido por drenaje y el 5% restante no fue detectado en ninguno de los compartimientos analizados y puede haberse perdido por otras vías (volatilización o denitrificación) o su

ausencia puede deberse a errores experimentales en las diferentes estimaciones. Del N que aún se encontraba en el suelo 61% estaba todavía en forma mineral, 10% en la biomasa microbiana y 6% como N orgánico no extraíble. En el segundo muestreo sólo se encontraba en el agroecosistema el 61.9% del N agregado, 22.6% en la biomasa del cultivo y 39.3% en el suelo, el N restante se había perdido por drenaje (6%) o no fue detectado en los compartimientos analizados y pudo haberse en parte perdido por vías gaseosas (32%). Del N que se encontraba en el suelo 19% estaba en forma mineral, principalmente como NO_3 , 7% en la biomasa microbiana y 13.2% en forma orgánica.

Tabla 8. Balance de N en la parcela fertilizada. Los valores son el porcentaje del fertilizante agregado (28.8 g N m^{-2}) recuperado en los distintos compartimientos del agroecosistema, perdido por lavado o por otras vías en los dos muestreos.

		91 días	189 días
Planta	Biomasa aérea	12.3 ± 13.9	10.3 ± 3.2
	Raíces	1.0 ± 0.9	0.5 ± 0.2
	Tubérculos	2.3 ± 3.7	11.8 ± 5.7
	Total planta	15.6 ± 17.9	22.6 ± 4.3
Suelo	NH_4	56.7 ± 24.9	8.8 ± 8.4
	NO_3	4.4 ± 1.7	10.3 ± 3.8
	N biomasa microbiana	9.7 ± 10.7	7.0 ± 3.2
	N Org. Ex.	0.0	3.0 ± 8.2
	N Org. no Ex.	5.5 ± 23.1	10.2 ± 7.5
	Total suelo	76.3 ± 28.2	39.3 ± 6.7
Lavado		3.2 ± 2.3	6.3 ± 3.9
Otras pérdidas ¹		4.9 ± 3.7	31.8 ± 10.2

¹ Se incluye todo el nitrógeno no perdido por lavado ni encontrado en ninguno de los compartimientos analizados.

DISCUSIÓN

Más del 70% del nitrógeno absorbido por el cultivo de papa (%NDF) en las condiciones de nuestro estudio proviene del fertilizante. Tran and Giroux (1991), indican valores de %NDF de 53 a 69% para el cultivo de papa en clima templado y los consideran altos para una dosis de 140 kg N ha⁻¹. Robert *et al.* (1991), encuentran que entre 42 y 54% del N de los tubérculos en la cosecha provienen del fertilizante en un cultivar Russet Burbank. Halitligil *et al.* (2002), encuentran un valor promedio de 59.9% para cultivos de papa fertilizados con 400 kg N ha⁻¹. El valor de %NDF obtenido en este estudio está en el límite superior de lo reportado en la literatura para el cultivo de papa, lo que indica que la disponibilidad del N nativo en suelos de páramo es muy baja, a pesar de la gran cantidad de materia orgánica que contienen y en consecuencia el cultivo depende en su mayor parte del N del fertilizante. La disponibilidad del N nativo parece mantenerse baja durante todo el cultivo, ya que no se detectaron diferencias significativas en el %NDF en la biomasa del cultivo entre los dos muestreos. Esta baja disponibilidad de N nativo se observa también en el caso de la parcela sin fertilizar, donde la producción fue muy baja y la concentración de N en la planta fue mucho menor que en la parcela fertilizada. En este sentido Halitligil *et al.* (2002) encuentran en suelos arenosos en Turquía un incremento de la producción por un factor 2 entre parcelas sin fertilizar y fertilizadas con 400 kg N ha⁻¹ mientras que en nuestro caso la producción aumentó por un factor de 10, a pesar de una fertilización más baja. Una explicación a la baja fertilidad intrínseca de los suelos estudiados son las bajas tasas de mineralización de la materia orgánica del suelo, según ha sido

reportado por Sarmiento y Bottner (2002), Coûteaux *et al.* (2002) y Abreu y Sarmiento (2004, cap. 3 de esta tesis).

El fertilizante no sólo constituye una fuente de N para el cultivo, sino que además estimula la absorción de N nativo, debido probablemente a que una mayor biomasa radical permite una exploración más exhaustiva del suelo, aunque también pareciera estimularse la mineralización de la materia orgánica por la aplicación del fertilizante, tal vez por la estimulación de la biomasa microbiana del suelo. Esto explicaría las cantidades significativamente mayores de N mineral nativo en la parcela fertilizada.

La NUE al momento de la cosecha fue del 23%, aunque la eficiencia puede haber sido algo mayor, ya que como señalan Tran y Giroux (1991) la NUE se puede subestimar en la cosecha final, debido a pérdidas de N por caída de las hojas, pluviolavado foliar de compuestos solubles de las hojas senescentes y descomposición de las raíces. El haber podido realizar sólo dos muestreos durante todo el ciclo de cultivo no nos permite visualizar con claridad en qué momento se obtiene un valor máximo de N total absorbido. El valor de 23% puede considerarse bajo si se compara con el rango entre 61 a 67% obtenidos en papa por Roberts *et al.* (1991), con el valor de 42% obtenido por Halitligil *et al.* (2002) con una fertilización de 400 kg N ha⁻¹ o con el valor de 61% obtenido por MacDonald *et al.* (1997) con una fertilización muy similar a la nuestra. Esta baja NUE pudiera relacionarse con la ocurrencia de la helada, la cual causó mortalidad de una parte de la biomasa aérea y redujo la demanda de N por el cultivo. Sin embargo, es superior al valor de 16% indicado por Sarmiento (1995) para la misma zona, lo que sugiere que la helada no fue el factor principal en disminuir la

NUE. La producción obtenida en la parcela fertilizada, 14.5 t ha^{-1} es inferior al promedio de 18 t ha^{-1} para parcelas con descansos mayores a 5 años (Sarmiento, 1995) y refleja el efecto deletéreo de la helada. El haber realizado una sola aplicación de fertilizante, como es habitual en la zona, también puede incidir negativamente sobre la NUE, recomendándose en ese sentido el fraccionamiento de las aplicaciones (Westermann *et al.*, 1988; Errebhi *et al.*, 1998; Waddell *et al.*, 1999).

El NO_3 marcado aumentó considerablemente entre el primer y segundo muestreo, indicando la ocurrencia de nitrificación, la cual a su vez puede favorecer las pérdidas por denitrificación. Hay que mencionar la gran cantidad de nitrógeno mineral residual, tanto marcado como no marcado, en la parcela fertilizada, que representó 19% del NDF. Este valor puede ser comparado con un 6% obtenido por MacDonald *et al.*, (1997) con una fertilización similar a la nuestra. Otros autores reportan valores entre 54 y 60% para dosis de 400 y 1000 kg N ha^{-1} (Unlü *et al.*, 1999).

La aplicación del fertilizante estimuló la inmovilización de N en la biomasa microbiana en comparación con la parcela control durante la primera fase de desarrollo del cultivo. En la bibliografía se reporta también un aumento inicial del NDF en la BM (inmovilización) y luego una liberación (mineralización) del mismo (Carter y Rennie, 1984; Paul y Juma, 1981; Amato y Ladd, 1980; Ladd *et al.*, 1981). Esto coincide con nuestros resultados donde se evidencia una disminución del N de la biomasa microbiana entre los dos muestreos realizados, pudiéndose indicar el papel protector de los microorganismos sobre el fertilizante. En la biomasa microbiana se encontró el 7% del N aplicado, Lindberg *et al.*, (1989)

reportaron valores entre 1.4-1.7% en un experimento usando lisímetros con cebada y una gramínea. Rutherford y Juma (1989) señalan valores de recuperación del NDF en el pool microbiano entre 4-18% indicándolos como valores importantes que muestran la trascendencia de la biomasa microbiana como fuente y sumidero de N.

Llama la atención las bajas pérdidas de N por lavado, las cuales representaron únicamente un 6% del fertilizante aplicado, a pesar del importante volumen de agua drenado. A medida que transcurre el ciclo del cultivo se incrementó el porcentaje de N proveniente del fertilizante en el agua de drenaje debido, probablemente, a los procesos de nitrificación del NH_4 , los cuales favorecen las pérdidas de N por lavado. Para papa Errebhi *et al.*, (1998) reportan valores de NO_3 lixiviados con el cultivar Russet Burbank con una dosis de 270 kg N ha^{-1} , de 100 a 200 kg N ha^{-1} y de 71 a 96 Kg N ha^{-1} en el primer y segundo año de muestreo respectivamente, atribuyéndose las grandes pérdidas del primer año de muestreo a fuertes lluvias al inicio del ciclo de cultivo sumado al riego. En otros trabajos se reportan valores de NO_3 lixiviados en papa entre 78 a 220 kg N ha^{-1} (Meisinger, 1976; Saffigna *et al.*, 1977; Hill, 1986). Unlü *et al.*, (1999) señalan valores de N perdido por lixiviación del 20 y 28% para una dosis de 400 y $1000 \text{ kg N ha}^{-1}$ respectivamente, en un suelo arenoso con la variedad granola. Estos valores son mucho más altos que los obtenidos en nuestro trabajo, aunque debemos considerar que la dosis de N utilizada es menor. Creemos necesario proseguir con estas evaluaciones del N lavado para tener más información, ya que se considera la lixiviación como una de las principales vías de pérdidas de N en los agroecosistemas.

Otro aspecto observado fue la progresiva transformación del N del fertilizante a formas orgánicas solubles e insolubles. Si se considera el N de la BM como parte del N orgánico del suelo, tenemos que aproximadamente 20% del N del fertilizante se encontraba en esta forma al final del experimento, la cual puede ser mineralizada y utilizada posteriormente por las plantas. Este valor se compara bien con el 15% obtenido por MacDonald *et al.*, (1997).

En el primer muestreo fue recuperado el 95% del N aplicado, ya sea en los diferentes compartimientos del agroecosistema o en el agua de drenaje. Esta cifra indica que los métodos utilizados para la estimación de los diferentes compartimientos dieron buenos resultados. El 5% restante puede haberse perdido por vía gaseosa o bien encontrarse todavía en el sistema pero no ser detectado debido a errores de estimación. En el segundo muestreo la fracción no recuperada aumento a 32%, lo que representa 9.2 g m^{-2} . Se ha reportado que entre 5 a 40% del N marcado no se recupera en el agroecosistema (Dowdell *et al.*, 1984; Hauck, 1973; Power, 1981; Pilbeam *et al.*, 2002) atribuyéndose a las pérdidas por lavado y denitrificación. Específicamente para papa, Maidl *et al.*, (2002) reportan valores entre 7.8 y 45.2% incluyendo todos los tipos de pérdidas y MacDonald *et al.*, (1997) reportan un valor de 18% que puede ser comparado con el 38% obtenido en este trabajo si se incluye el lavado. Sin embargo creemos que el valor obtenido es muy alto para ser atribuido sólo a pérdidas por vía gaseosa, a pesar de las concentraciones importantes de NO_3 al momento de la cosecha. En la bibliografía se señalan tasas de denitrificación potencial, en condiciones libres de O_2 y con abundante NO_3 , de $1 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Koops *et al.*, 1996) pero pérdidas reales medidas en parcelas agrícolas del orden de $1 \text{ a } 2.5 \text{ g ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El Intergovernmental Panel

on Climate Change asume un valor de 1.25% del N adicionado a los cultivos (IPCC, 1997), porcentaje que no podría explicar las pérdidas de 32% encontradas en este trabajo. Por su parte Ruser *et al.*, (2001) miden en un cultivo de papa pérdidas por denitrificación del 5% del fertilizante aplicado. También pudieron ocurrir pérdidas por volatilización del amonio, en este sentido Orozco (1999) señala que las salidas del N por esta vía son apreciables cuando se utilizan grandes cantidades de fertilizantes amoniacales y cuando las aplicaciones se hacen superficialmente, por lo que no debemos descartar que parte del N aplicado se haya perdido por esta vía, sin embargo las pérdidas promedio reportadas en la literatura por volatilización están en el orden de 3% del N aplicado (Kroeze *et al.*, 2003). Otras posibles explicaciones para el N no detectado son las pérdidas por volatilización de amonio a partir de los tejidos senescentes o en descomposición. En este sentido Mannheim *et al.*, (1997) señalan que pueden perderse cantidades importantes de N por volatilización durante la descomposición de las hojas. Este tipo de pérdida puede haber ocurrido durante la descomposición de las hojas de papa afectadas por la helada. Algunas fuentes de error que también pueden contribuir a explicar el N no detectado son la absorción de N por la malezas presentes en la parcela, la cual no fue cuantificada, aunque no se presentó un desarrollo muy importante de las mismas, o los errores de estimación que se pudieron tener en las distintas etapas del muestreo, principalmente al homogeneizar el suelo para tomar las muestras, y además en la realización del aporque, donde pese a los cuidados tenidos pudo haberse mezclado suelo de las plantas vecinas y perderse algo del N aplicado. Tomando en cuenta estas posibilidades las pérdidas gaseosas pudieran ser menores, aunque consideramos

necesario realizar nuevas evaluaciones, ya que éste es un aspecto importante del balance de N.

Este trabajo ha corroborado que la eficiencia de utilización del fertilizante aplicado en estos agroecosistemas es muy baja, por lo que resulta importante realizar un manejo agronómico que permita aumentar esta eficiencia, lo cual pudiera lograrse con algunas prácticas como fraccionar las aplicaciones del fertilizante, tomando en cuenta que son plantas de ciclo largo, utilizar semilla certificada, o en su defecto darle un mejor manejo a las semillas artesanales que los mismos agricultores de la zona utilizan. Consideramos que logrando un uso apropiado de los fertilizantes se contribuiría a la sustentabilidad de los sistemas de producción de papa en la zona andina venezolana.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto TROPANDES (Unión Europea, programa INCO-DC, contrato número ERBIC18CT98-0263). Agradecemos el financiamiento otorgado por CDCHT (proyecto C-1071-01-01EM) y Postgrados Integrados en Ecología (FONACIT). Queremos agradecer muy especialmente la colaboración de Zulay Méndez en los análisis químicos y la participación en el trabajo de campo de Nelson Márquez, Auxiliadora Olivo, Daniel Machado, Carlos Díaz y Dimas Acevedo. Así mismo dejamos constancia de nuestro agradecimiento a Maximina Monasterio, coordinadora del proyecto TROPANDES en Venezuela y finalmente un agradecimiento especial a la comunidad de Gavidia.

BIBLIOGRAFIA

- Abreu, Z y L. Sarmiento. 2004. Dinámica del carbono y del nitrógeno potencialmente mineralizables en una sucesión secundaria en los páramos de Venezuela. Capítulo 3. Tesis de Maestría.
- Amato, M. y J.N. Ladd. 1980. Studies of nitrogen immobilization and mineralization in calcareous soils. V. Formation and distribution of isotope-labelled biomass during decomposition of ¹⁴C-and ¹⁵N-labelled plant material. *Soil Biology and Biochemistry* 12:405-411.

- Brookes, P.C. Landman, A. Pruden, G. y D.S. Jenkinson. 1985. Chloroform fumigation and release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen of soil. *Soil Biology and Biochemistry* 17 (6): 837-842.
- Carter, M.R. y D.A. Rennie. 1984. Nitrogen transformations under zero and shallow tillage. *Soil Science Society American Journal* 48:1077-1081.
- Coûteaux, M.M., Sarmiento, L., Bottner, P., Acevedo, D y J.M. Thiery. 2002. Decomposition of standard plant material along an altitudinal transect (65-3968 m) in the tropical Andes. *Soil Biology and Biochemistry* 34(1): 69-78.
- Dowdell, R. J. Webster, C. P. Hill, D. y E. R. Mercer. 1984. A lysimeter study of the fate of fertilizer nitrogen in spring barley crops grown on a shallow soil overlying chalk: crop uptake and leaching losses. *Journal Soil Science* 35:169-181.
- Errebhi, M. Rosen, C.J. Gupta, S.C. y D.E. Birong. 1998. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. *Agronomy Journal* 90:10-15.
- Guiraud, G. 1984. Contribution du marquage isotopique a l' evaluation des transferts d' azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante. Docteur es Sciences Thèse. Université Pierre et-Marie Curie. Paris. 335 p.
- Halitligil, M.B., Akin, A. y A. Ylbeyi. 2002. Nitrogen balance of nitrogen-15 applied ammoniumsulphate to irrigate potatoes in sandy textured soils. *Biology and Fertility of Soils* 35: 369-378.
- Hauck, R.D. 1973. Nitrogen tracers in nitrogen cycles studies-Past use and future needs. *Journal Environment Quality* 2:317-327.
- Hill, A. R. 1986. Nitrate and chloride distribution and balance and continuous potato cropping. *Agriculture Ecosystems and Environment* 15: 267-280.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1997. Greenhouse gas emissions from agricultural soil. In: *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual*. Meteorological office. Dracknell U.K.
- Joergensen, R.G. y T. Mueller. 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the k_{EN} value. *Soil Biology and Biochemistry* 28:33-37.
- Keeney, D.R. y D.W. Nelson. 1982. Nitrogen-inorganic forms. In: Page, A.L. Miller, R.H. y D.R. Keeney (Eds). *Method of soil analysis. Part 2*. 2nd Edition. *Agronomy* 9:635-698.
- Kroeze, C. Aerts, R. van-Breemen, N. van-Dam, D. van-der-Hoek, K. Hofschreuder, P. Hoosbeek, M. de-Klein, J. Kros, H. van-Oene, H. Oenema, O. Tietema, A. van-der-Veerden, R. y W. de-Vries. 2003. Uncertainties in the fate of nitrogen: I: An overview of sources of uncertainty illustrated with a Dutch case study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66: 43-69.
- Koops, J., Oenema, O. y M.L. Van Beusichem. 1996. Denitrification in the top and sub soil of grassland on peat soils. *Plant and Soil* 184: 1-10.

- Ladd, J.N. Oades, J.M. y M. Amato. 1981. Microbial biomass formed from ^{14}C , ^{15}N -labelled plant material decomposing in soils in the field. *Soil Biology and Biochemistry* 13:119-126.
- Lindberg, T. Bonde, T. A. Bergstrom, L. Pettersson, R. Rosswall, T. y J. Schnürer. 1989. Distribution of ^{15}N in the soil-plant system during a four-year field lysimeter study with barley (*Hordeum distichum* L.) and perennial meadow fescue (*Festuca pratensis* Huds.). *Plant and Soil* 119:25-37.
- Maidl, F., Brunner, H. y E. Stickel. 2002. Potato uptake and recovery of nitrogen ^{15}N -enriched ammonium nitrate. *Geoderma* 105: 167-177.
- Mannheim, T., Braschkat, J. y H. Marsschner. 1997. Ammonia emissions from senescing plants and during decomposition of crop residues. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 160: 125-132.
- MacDonald, A., Poulton, P., Powlson, D., y D. Jenkinson. 1997. Effects of season, soil type and cropping on recoveries, residues and losses of ^{15}N -labelled fertilizer applied to arable crops in spring. *Journal of Agricultural Science* 129:125-154.
- Meisinger, J.J. 1976. The climatic water budget in environmental analysis. Lexington Books, Lexington, MA.
- Ministerio de Producción y Comercio. 1999. Potencialidades agrícolas del estado Mérida. Venezuela. Informe Técnico.
- Orozco, F. H. 1999. Biología del Nitrógeno, conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Cap. 2:39-103 pp.
- Paul, E.A. y N.G. Juma. 1981. Mineralization and immobilization of soil nitrogen by microorganisms. *In Terrestrial Nitrogen Cycles. Processes, ecosystems strategies and management impacts*. Eds. F.E. Clark and T. Rosswall. *Ecology bulletin*. (Stockholm). 33:179-195.
- Pilbeam, C. J. Gregory, P. J. Tripathi, B.P. y R. C. Munankarmy. 2002. Fate of nitrogen- ^{15}N -labelled fertilizer applied to maize-millet cropping systems in the mid-hills of Nepal. *Biology and Fertility of Soils* 35:27-34.
- Power, J. F. 1981. Nitrogen in the cultivated ecosystem. *In Terrestrial Nitrogen Cycles. Processes, ecosystems strategies and management impacts*. Eds. F.E. Clark and T. Rosswall. *Ecology bulletin*. (Stockholm). 33:529-546.
- Roberts, S. Cheng, H. H. y F. O. Farrow. 1991. Potato uptake and recovery of Nitrogen- ^{15}N -enriched ammonium nitrate from periodic applications. *Agronomy Journal* 83:378-381.
- Ruser, R. Flessa, H. Schilling, R. Beese, F. y J.C. Munch. 2001. Effect of crop-specific field management and N fertilization on N_2O emissions from fine-loamy soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 59: 177-191.
- Rutherford, P. M. y Juma, N. G. 1989. Shoot, root, soil and microbial nitrogen dynamics in two contrasting soils cropped to barley (*Hordeum vulgare* L.). *Biology and Fertility of Soils* 8:134-143.
- Saffigna, P.G. Keeney, D.R. y C.B. Tanner. 1977. Nitrogen, chloride, and water balance with irrigated Russet Burbank potatoes in a sandy soil. *Agronomy Journal* 69: 251-257.

- Sarmiento, L. 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Tesis de Doctorado. Universidad de Paris XI. 237 p.
- 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. *Applied Soil Ecology* 19(1):79-89.
- Tran, T.S. y M. Giroux. 1991. Effects of N rates and harvest dates on the efficiency of ¹⁵N-labelled fertilizer on early harvested potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Canadian Journal of Soil Science* 71:519-532.
- Ünlü, K. Özenirler, G. y C. Yurteri. 1999. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in central Turkey. *European Journal of Soil Science* 50: 609-620.
- Van Keulen, H y J. Wolf. 1986. Modelling of agricultural production: weather, soils, crops, Pudoc. Wageningen. P 479.
- Velásquez, N. 2001. El sistema socio-ambiental andino venezolano y la modernización de la agricultura. 1930-1995. Tesis de doctorado. Postgrado de Ecología Tropical. Facultad de ciencias. Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela.
- Waddell, J.T. Gupta, S.C. Moncrief, J.F. Rosen, C.J y D.D. Steele. 1999. Irrigation and Nitrogen management effects on potato yield, tuber quality, and nitrogen uptake. *Agronomy Journal* 91: 991-997.
- Westerman, D.T. Kleinkopft, G.E. y L.K. Porter. 1988. Nitrogen fertilizer efficiencies on potatoes. *America Potato Journal* 65:377-386.

CAPITULO 2

DINÁMICA DE LA BIOMASA MICROBIANA EN UNA SUCESIÓN SECUNDARIA EN LOS PÁRAMOS VENEZOLANOS: ENFOQUES SINCRÓNICO Y DIACRÓNICO*

RESUMEN

La dinámica sucesional de la biomasa microbiana del suelo fue analizada en un sistema agrícola con descansos largos en los Andes Venezolanos, con la hipótesis de que puede ser sensible a los cambios que ocurren en el suelo durante la sucesión y utilizarse como un indicador de la recuperación de la fertilidad. Se analizaron, siguiendo un enfoque sincrónico, 36 parcelas con diferentes edades de descanso (entre 1 y 12 años) y cuatro páramos nunca antes cultivados. El estudio se complementó con un análisis diacrónico de las mismas parcelas, las cuales fueron muestreadas dos veces, con tres años de intervalo. En cada parcela y para ambos muestreos se determinaron distintas propiedades físico-químicas del suelo (textura, C, N, pH, bases cambiables, CIC) además del N de la biomasa microbiana (N-BM). No se encontraron tendencias sucesionales en ninguno de estos parámetros a excepción del pH y Mg, los cuales con el análisis sincrónico mostraron una tendencia a aumentar en la sucesión. Tampoco se observaron cambios sucesionales significativos del N-BM. Las parcelas de páramo nunca cultivado presentaron valores de N-BM significativamente mayores que las parcelas en sucesión. Se concluye que ninguno de los parámetros analizados es un indicador sensible a la escala de tiempo de los periodos de descanso. La falta de sensibilidad del N-BM es atribuible tanto a la ausencia de respuesta a los cambios ocurridos en la sucesión como a la alta heterogeneidad espacial en el área de estudio, la cual enmascara cualquier posible tendencia sucesional. La diferencia con respecto al páramo nunca antes cultivado refleja que el N-BM si es sensible a intervalos de tiempo mayores, o a perturbaciones severas como la puesta en cultivo del ecosistema natural pero no puede ser utilizado como un indicador de cambios a corto plazo en estas sucesiones secundarias.

Palabras claves: análisis sincrónico, análisis diacrónico, nitrógeno, páramo, Andes, fertilidad, heterogeneidad.

*Este capítulo será publicado posteriormente como artículo con los siguientes autores: Zoraida Abreu, Lina Sarmiento y Luis Daniel Llambí. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela.

INTRODUCCION

En sistemas agrícolas con descansos largos la sucesión ecológica provee diversos servicios ambientales a los agricultores, tales como el control de plagas, enfermedades y malezas y la restauración de la fertilidad del suelo. En los páramo de Venezuela y Colombia se practica este tipo de agricultura, caracterizada por cortos periodos de cultivo de papas y cereales (1 a 4 años) que se intercalan con periodos de descanso de 5 a más de 10 años (Sarmiento *et al.*, 1993; Jaimes, 2000; Sarmiento *et al.*, 2003). Con el objetivo de comprender mejor como se produce la restauración de la fertilidad del suelo y encontrar variables indicadoras que permitan una mejor gestión de los descansos, diversos autores han monitoreado los cambios sucesionales en la concentración de nutrientes disponibles, materia orgánica, pH u otras propiedades físico-químicas del suelo en estos sistemas agrícolas de los páramos (Ferwerda, 1987; Aranguren y Monasterio, 1997; Llambí y Sarmiento, 1998; Jaimes, 2000; Abadín *et al.*, 2002). Sin embargo, ninguno de los autores ha encontrado, al comparar cronosecuencias de parcelas, tendencias sucesionales claras en las propiedades analizadas. La falta de respuesta de las propiedades del suelo al tiempo sucesional puede ser atribuida a dos factores: 1) la poca sensibilidad de los parámetros estudiados a la escala de tiempo de la sucesión secundaria y 2) la alta heterogeneidad de los ambientes de montaña, que limita el alcance de los métodos sincrónicos para el estudio de la sucesión. El primer factor puede ser ilustrado con los resultados de Llambí y Sarmiento (1998) y Abadín *et al.*, (2002) quienes no encuentran variaciones significativas en el C y N totales del suelo al comparar parcelas con diferente tiempo de descanso. La falta de respuesta del C y N totales del suelo al

comparar parcelas con diferente tiempo de descanso puede explicarse por el gran contenido de materia orgánica de los suelos de páramo, que enmascara pequeñas variaciones que pudieran ocurrir en los 5 a 10 años que dura la sucesión. En este sentido es necesario utilizar indicadores más sensibles, cuyo tiempo de respuesta esté acorde con la duración de los periodos de descanso. El segundo factor, la heterogeneidad espacial entre las cronosecuencias de parcelas, enmascara las posibles tendencias sucesionales, al introducir otros factores de variabilidad diferentes al tiempo. El problema de la heterogeneidad espacial es particularmente importante en ambientes de montaña, donde encontrar series de parcelas en condiciones ambientales similares es prácticamente imposible debido a las variaciones continuas de pendiente, altitud, exposición, pedregosidad, geomorfología, topografía e historia de uso. La biomasa microbiana del suelo (BM) ha sido propuesta por varios autores como un indicador temprano y sensible de los cambios en el suelo, ya que presenta una respuesta mucho más rápida que el conjunto de la materia orgánica (Powlson *et al.*, 1987; Turco *et al.*, 1994; Carter, 2002). Por esta razón su estudio permite detectar cambios edáficos que no pueden ser visualizados analizando otros compartimientos cuyo tamaño y tasas de recambio son mayores. Por otra parte, si la tasa de recambio es muy alta también puede ser difícil detectar cambios sucesionales. Este es el caso del nitrógeno mineral, el cual no se acumula durante la sucesión en los suelos de páramo sino que a medida que se produce es absorbido por las plantas, lavado, volatilizado, inmovilizado o transformado nuevamente por los microorganismos (Aranguren y Monasterio, 1997), siendo un indicador muy poco sensible. En un páramo en Venezuela, Sarmiento y Bottner (2002), compararon dos parcelas adyacentes y

similares en sus condiciones ambientales pero con diferente tiempo de descanso (1 y 16 años) encontrando que en la parcela con más descanso la biomasa microbiana alcanzaba valores significativamente mayores. Así mismo, Sarmiento (1995), encuentra que la biomasa microbiana del suelo puede jugar un rol importante en la recuperación de la fertilidad en el páramo por su doble rol como 1) fuente de N para el cultivo y 2) en la protección del fertilizante, al inmovilizarlo y prevenir pérdidas por lavado en momentos de bajos requerimientos del cultivo. En este trabajo nos proponemos analizar si la biomasa microbiana del suelo aumenta a lo largo de los periodos de descanso y en consecuencia pudiera tener un rol en la recuperación de la fertilidad en suelos de páramo, tal como lo plantean Sarmiento y Bottner (2002). Se intenta generalizar a la escala de todo un valle agrícola los resultados encontrados por estos autores en dos parcelas. Para realizar esta generalización nos planteamos analizar un número mayor de parcelas con diferente tiempo de descanso mediante la utilización de un enfoque sincrónico, donde se sustituye el tiempo por el espacio, es decir se comparan en un mismo momento parcelas que han pasado por diferentes periodos de descanso. Como se mencionó anteriormente, este tipo de enfoque tiene muchas limitaciones en ambientes heterogéneos, donde la diferencia entre las parcelas no es únicamente causada por el tiempo sucesional. Conscientes de esta limitación, el análisis sincrónico fue complementado por un análisis diacrónico, en el cual las mismas parcelas se siguieron a lo largo del tiempo. Se introducen entonces dos nuevos enfoques en el estudio de los mecanismos de restauración de la fertilidad del suelo en sistemas agrícolas con descansos largos en ambientes de páramo: 1) la utilización de una variable más sensible a los cambios en la escala de tiempo

utilizada, como es la biomasa microbiana del suelo y 2) el uso de un análisis diacrónico, en el que los cambios sucesionales son analizados en las mismas parcelas a lo largo del tiempo, para minimizar el efecto de la heterogeneidad espacial. Así mismo se analizan, utilizando datos de un conjunto amplio de parcelas, los factores edáficos que influyen sobre el tamaño del compartimiento microbiano.

METODOLOGIA

El estudio se realizó en el Páramo de Gavidia localizado entre 8° 35'- 8° 45' de latitud N y 70° 52'-70° 58' de longitud O dentro del parque Nacional Sierra Nevada, en la cordillera de Mérida, a 10 kilómetros de la población de Mucuchíes y a una altitud de 3300 m. El régimen de precipitación en el área es unimodal, con un promedio de 1300 mm y una temperatura media anual de 8.5°C. Los muestreos se realizaron en un pequeño valle glacial donde el paisaje está conformado por un mosaico de zonas de páramo nunca cultivado, áreas en diferentes etapas sucesionales y parcelas cultivadas. La actividad agrícola se desarrolla entre 3300 y 3800 m sobre laderas o sobre pequeños abanicos fluviales y valles colgantes. Los suelos son inceptisoles, muy ricos en materia orgánica, con pH ácido, textura franco arenosa y alta pedregosidad. El sistema agrícola se caracteriza por la alternancia de periodos de cultivo de 1 a 4 años, durante los cuales se cultivan papas y cereales, con periodos de descanso que pueden durar más de 10 años. El ciclo de cultivo se inicia con un arado de rompedura, cinco meses antes de la siembra, para incorporar la vegetación como abono verde, luego se realiza la siembra, durante la cual se ara nuevamente y se coloca la semilla y el fertilizante

mineral, para estas labores se usan bueyes. Las variedades de papa que se cultivan son de ciclo largo que van desde cinco a ocho meses. Durante el descanso las parcelas son utilizadas, fundamentalmente, para pastoreo.

Selección de las parcelas y método de muestreo

Se escogieron 36 parcelas con edades comprendidas entre 1 a 9 años de descanso (4 repeticiones por año) y 4 parcelas de páramo nunca cultivado. El tiempo de descanso de las parcelas se determinó con exactitud a partir de la base de datos histórica elaborada por Smith (1995). El tamaño de las parcelas varió entre 344 y 14000 m², con un promedio de 2874 m². Para reducir el efecto de factores diferentes al tiempo de descanso, se seleccionaron parcelas lejanas a las viviendas, ya que las parcelas más cercanas se encuentran sujetas a mayor presión de pastoreo, asimismo se escogieron parcelas con pendientes mayores a 35° para reducir el rango de este parámetro que puede influenciar las características del suelo y del balance hídrico. Las 40 parcelas seleccionadas fueron muestreadas dos veces, la primera en julio de 1996 y la segunda en julio de 1999, realizando en cada caso el muestreo de todas las parcelas en el menor tiempo posible (2 a 3 días). En el segundo muestreo, 16 de las 36 parcelas que estaban en descanso en 1996 fueron cultivadas, mientras que el resto continuaba en sucesión. De las parcelas que fueron cultivadas, 4 estaban todavía en periodo de producción y el resto había iniciado un nuevo ciclo de sucesión. La época de muestreo corresponde al pico de lluvias en la región, cuando la biomasa microbiana es máxima (Sarmiento, 1995). Para realizar el muestreo de suelo se excluyó un borde de 2 m alrededor de cada parcela y se seleccionaron

aleatoriamente 10 puntos de muestreo. En cada punto se extrajo con una pala un monolito de suelo de 20 cm de profundidad y un área aproximada de 10 cm de diámetro. El suelo de los 10 puntos se mezcló para obtener una muestra compuesta por parcela de entre 4 y 6 Kg de suelo. Las muestras de suelo fueron almacenadas a 4 °C por un tiempo no mayor de 15 días antes de realizar los análisis de biomasa microbiana.

Análisis de la biomasa microbiana

El N de la biomasa microbiana se determinó utilizando el método de fumigación-extracción (Brookes et al. 1985). El suelo fue tamizado a 4 mm y tres réplicas de suelo fresco, equivalente a 40 g de suelo seco, fueron fumigados por 18 h con cloroformo libre de alcohol. Después de remover el cloroformo, los suelos fumigados y tres controles de suelo no fumigado fueron extraídos con K_2SO_4 1N (proporción suelo:solución 1:5). El N total de los controles y de los fumigados fue determinado por digestión y destilación, utilizando el método de Kjeldahl. El N de la biomasa microbiana fue calculado como la diferencia entre fumigados y controles dividida por un factor de 0.45.

Análisis físico-químico del suelo

Los suelos fueron secados al aire, tamizados a 2 mm y analizados para las siguientes propiedades físico-químicas: textura (método del hidrómetro de Boyuocos), pH (en una suspensión suelo-agua en proporción 2:1), nitrógeno total (método Kjeldahl), carbono orgánico (método de Walkley-Black), bases cambiables (método de Pranshnikov), Capacidad de Intercambio Catiónico (extracción con NH_4O 1M a pH 7). Estos mismos parámetros fueron determinados en las muestras de suelo de ambos muestreos.

Estadística y procesamiento de la información

Para los análisis estadísticos las parcelas fueron agrupadas en cinco categorías: cultivadas, tempranas (1 a 3 años), intermedias (4 a 6 años), tardías (mayor de 6 años) y páramo natural. Se utilizó el Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía, para la comparación de cada una de las variables de estudio en las distintas categorías de descanso. En los casos en que los datos no cumplieron los supuestos del ANOVA, se realizaron transformaciones logarítmicas y de raíz cuadrada, para probar nuevamente los supuestos y finalmente, si estos no se cumplían, se utilizó la prueba no paramétrica de comparación de medias de Kruskal-Wallis. Para estudiar la correlaciones entre las diferentes variables se realizaron regresiones simple y múltiples. Los valores de biomasa microbiana entre los dos años de muestreo se compararon utilizando un test de t pareado para las parcelas de cada una de las categorías de descanso consideradas. Para analizar en forma integrada qué variables influyen sobre la biomasa microbiana se utilizó un análisis de Componentes Principales (ACP), ordenando las parcelas en función del conjunto de propiedades físico-química medidas incluyendo el N-BM. También se determinaron los cambios ocurridos entre los dos años de muestreo de las diferentes variables edáficas (deltas); con la finalidad de evaluar los cambios sucesionales que pudieran presentar los parámetros considerados y las posibles relaciones existentes entre las variaciones de los mismos. Los deltas fueron evaluados igualmente utilizando un ANOVA o en su defecto la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Se realizó además un ACP utilizando los deltas de

todos los parámetros como variables. Los programas utilizados para el análisis de los datos fueron STATISTICA versión 4.0 y CANOCO para Windows versión 4.02.

RESULTADOS

En la tabla 1 se presentan los promedios por grupo de edad de las variables físico-químicas evaluadas en 1999. Este análisis sincrónico muestra que no hay diferencias significativas entre las distintas categorías de edad para ninguna de las variables a excepción del pH y del Mg. El pH presenta una tendencia a aumentar a lo largo de la sucesión pero con diferencias significativas únicamente entre las parcelas cultivadas y tempranas con el resto del grupo de parcelas. El contenido de Mg presentó diferencias significativas a partir de las parcelas con descansos mayores a 3 años, evidenciándose un aumento sucesional de esta variable.

Biomasa microbiana

En la figura 1 se muestran los valores promedio de N-BM para las diferentes categorías de descanso en ambos muestreos, encontrándose que el análisis sincrónico no revela diferencias significativas entre las parcelas en las diferentes etapas del ciclo cultivo-descanso, pero sí entre estas y el páramo nunca antes cultivado, donde el N-BM alcanza valores de aproximadamente el doble. Las variaciones en los valores de N-BM entre las réplicas analíticas de la misma parcela resultaron relativamente bajas (coeficiente de variación promedio de 3.2% entre réplicas con un máximo de 5.6% y un mínimo de 1.0%), por lo que la gran variabilidad observada en cada categoría de descanso es debida fundamentalmente a variaciones entre las parcelas.

Tabla 1. Valores promedios \pm desviación estándar de las características físico-químicas en las distintas categorías de descanso. ns=no significativo. KW=Kruskal-Wallis para comparación de medias. PV= páramo virgen. *Mg transformación logarítmica.

	Cultivadas	Tempranas	Intermedias	Tardías	PV	ANOVA ($\alpha \leq 0.05$)
Arena (%)	60.00 \pm 3.65	55.50 \pm 3.73	60.55 \pm 6.39	57.56 \pm 5.08	59.50 \pm 5.97	ns
Limo (%)	29.50 \pm 6.19	36.75 \pm 4.99	33.82 \pm 7.28	32.67 \pm 4.92	30.50 \pm 3.00	ns
Arcilla (%)	10.50 \pm 2.01	7.75 \pm 1.16	5.64 \pm 1.21	9.78 \pm 1.34	10.00 \pm 2.01	ns
pH	4.43 \pm 0.27 a	4.27 \pm 0.21 a	4.59 \pm 0.33 ab	4.72 \pm 0.28 b	4.91 \pm 0.10 b	(p=0.00)
Ct (%)	8.00 \pm 2.00	9.15 \pm 2.37	10.07 \pm 3.18	9.79 \pm 3.87	11.88 \pm 2.72	ns
Nt (%)	0.42 \pm 0.09	0.50 \pm 0.12	0.49 \pm 0.13	0.47 \pm 0.14	0.56 \pm 0.14	ns
C/N	19.04 \pm 0.88	19.07 \pm 6.62	20.99 \pm 5.84	22.47 \pm 11.02	21.79 \pm 3.47	ns (KW)
CIC(meq/100g)	24.06 \pm 5.44	22.83 \pm 4.36	20.66 \pm 5.44	19.61 \pm 6.19	23.68 \pm 5.71	ns
Ca(meq/100g)	4.23 \pm 0.68	2.76 \pm 2.61	3.70 \pm 1.66	4.58 \pm 2.07	5.63 \pm 1.41	ns
Mg(meq/100g)	0.47 \pm 0.19 a	0.31 \pm 0.32 a	0.50 \pm 0.32 b	0.61 \pm 0.36 c	1.71 \pm 0.50 d	(p=0.02)
Na(meq/100g)	0.003 \pm 0.005	0.002 \pm 0.004	0	0.001 \pm 0.003	0.003 \pm 0.005	ns (KW)
K(meq/100g)	1.15 \pm 0.94	1.03 \pm 0.75	0.88 \pm 0.80	0.98 \pm 0.60	1.43 \pm 1.66	ns (KW)
Sat.bases (%)	26.54 \pm 13.54	17.97 \pm 13.48	25.69 \pm 10.99	35.68 \pm 19.32	38.15 \pm 7.00	ns
	n=4	n=12	n=11	n=9	n=4	

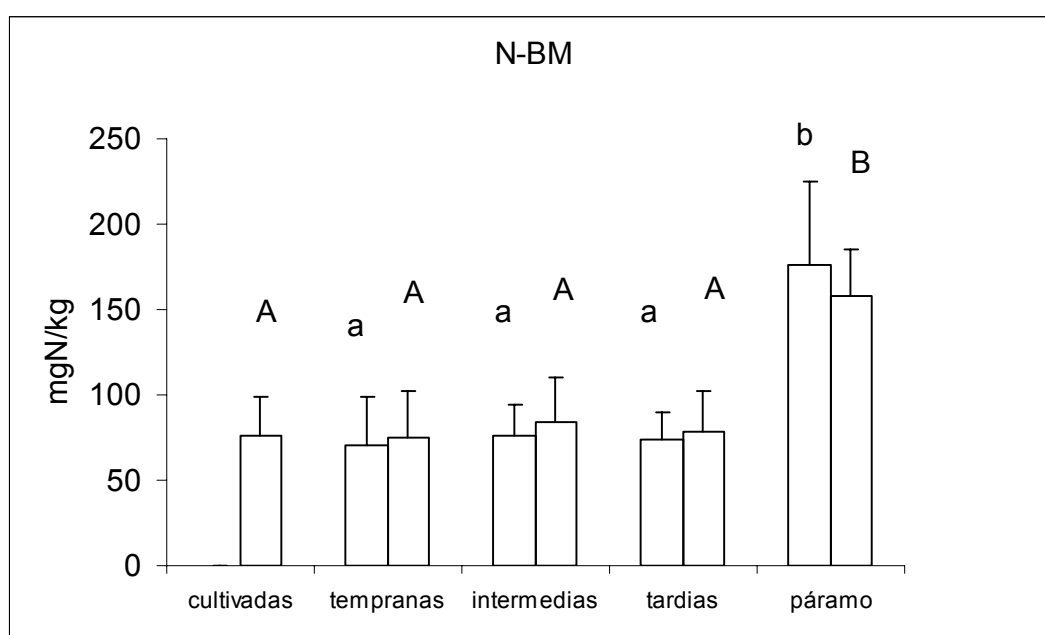


Figura 1. Valores promedios del N-BM (mg/kg) en los dos muestreos en función de las diferentes categorías de descanso. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas en el año 1996 y las mayúsculas en 1999.

En la figura 2 se muestran los cambios netos de N-BM ocurridos durante los dos muestreos, realizados con tres años de diferencia, para las parcelas en sucesión y el páramo. Una comparación de medias indica que no hay diferencias significativas entre los dos años muestreados para ninguna de las categorías, es decir que el análisis diacrónico no detecta diferencias en el N-BM a lo largo del descanso ni en las parcelas que permanecieron como páramo no cultivado. El comportamiento individual de las parcelas fue muy errático, algunas experimentaron disminuciones, otras aumentos y en otras el N-BM permaneció constante a lo largo del tiempo.

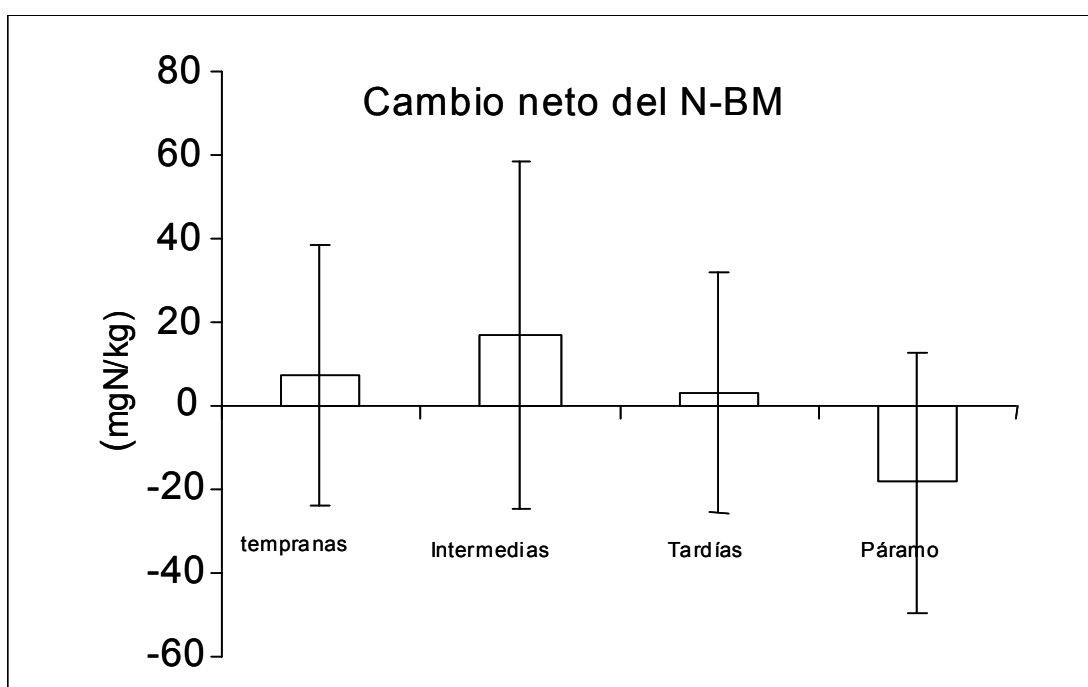


Figura 2. Cambios netos ocurridos en el N-BM en los muestreos realizados, en las diferentes categorías de descanso. Las letras indican las diferencias significativas encontradas según el test de t.

Análisis integrado de las características físico-químicas

Para analizar la relación entre el N-BM y el conjunto de variables físico-químicas se realizaron regresiones lineales simples con los datos del año 1999. Se detectaron correlaciones significativas positivas del N-BM y algunas variables del suelo pero con porcentajes de la varianza explicada muy bajos: N ($r^2=0.29$), C ($r^2=0.17$), CIC ($r^2=0.21$), contenido de las bases Ca ($r^2=0.12$) y Mg ($r^2=0.25$).

Se realizó un análisis de regresión múltiple entre el N-BM como variable dependiente y el conjunto de las variables físico-químicas como variables independientes. Este análisis indicó que el N-BM es función de las variables: N total ($r^2=0.29$), contenido de Mg intercambiable que aumenta el % de varianza explicada en un 26% ($r^2=0.56$), CIC que aumenta el % de varianza explicada en un 13% ($r^2=0.69$) y C que aumenta el % de varianza explicada en un 3% para un r^2 final de 0.72.

Los resultados del ACP se muestran en la figura 3. El porcentaje de la varianza total explicada por los 4 ejes de ordenamiento es de 26.7%, 22.1%, 14% y 10.3% respectivamente. En la tabla 2 se presenta la correlación de cada una de las variables analizadas con los cuatro ejes de ordenamiento. Se observa que el primer eje está altamente correlacionado con la saturación de bases y el contenido de las diferentes bases, principalmente Ca y Mg. También aparecen correlacionados con este eje de ordenamiento pero en forma negativa el C, el N, la relación C/N, la CIC y el limo pudiendo decirse que este eje está relacionado con la disponibilidad de nutrientes. El 2 eje es el que presenta una mayor correlación con el N-BM ($r^2=0.73$) estando además correlacionados con el C, N, los contenidos de Ca, Mg, arena y el pH, el limo aparece negativamente relacionado;

en base a esto se pudiera decir que este eje está relacionado con la MOS y su actividad. El 3 eje está correlacionado positivamente con la relación C/N, el pH y negativamente con la CIC y el N total. El 4 eje está correlacionado con el contenido de limo y el N total y negativamente con la CIC, los contenidos de Na y K. Cuando observamos la disposición de las parcelas en el plano de ordenamiento en función de los dos primeros ejes (figura 3), se destaca que los páramos están ubicados en el lado superior derecho del plano, correspondiendo a sitios con valores altos de N-BM, altos contenidos de las bases cambiables, valores altos de pH. La ubicación del resto de las parcelas no responde a un ordenamiento en función del tiempo de descanso. El mismo comportamiento se observa cuando se analiza la disposición en función a los ejes 1 y 3, 1 y 4 (resultados no presentados).

Tabla 2. Correlaciones entre las principales características físico-químicas del suelo y el N de la biomasa microbiana con los 4 primeros ejes de ordenamiento.

	Eje			
	1	2	3	4
Arena	0.22	0.64**	-0.19	-0.37*
Limo	-0.63**	-0.37*	0.08	0.59**
Arcilla	0.60**	-0.28	-0.36*	-0.36*
pH	0.57**	0.10	0.67**	0.24
C (total)	-0.34*	0.73**	0.45**	-0.07
N total	-0.37*	0.64**	-0.42	0.40*
C/N	-0.24	0.15	0.82**	-0.31
CIC	-0.20	0.55**	-0.45**	-0.39*
Ca	0.80**	0.24	-0.12	0.21
Mg	0.81**	0.23	0.09	0.23
Na	0.39*	-0.37*	0.09	-0.33*
K	0.29	-0.19	-0.10	-0.35*
Sat. Bas	0.87**	-0.12	0.11	0.29
BM	0.24	0.77**	-0.23	0.17

** $\alpha = 0.01$

* $\alpha = 0.05$

Análisis de DELTAS

En la tabla 3 se presenta la variación temporal (deltas) de las propiedades físico-químicas y de la biomasa microbiana para las cinco categorías evaluadas. Se observa que no hay diferencias significativas entre los estadios en el cambio temporal de ninguna de las variables consideradas. Se realizó una comparación de las variables físico-químicas utilizando un test de t pareado con los datos de los dos muestreos para cada variable y categoría de parcela (ver tabla 3) y se observó que solamente la arena, arcilla, el pH y Na mostraron un cambio significativo. En el caso de la arena se observa que disminuyó entre los dos muestreos pero este descenso fue significativo sólo en las parcelas tardías. Con respecto al contenido de arcilla se ve que esta aumentó entre los dos muestreos pero fue significativo solamente en las parcelas tardías y el páramo. El pH disminuyó en todas las categorías de parcelas, siendo este descenso significativo sólo en las parcelas de páramo. Para el contenido de Na se observa una disminución significativa en las parcelas cultivadas, tardías y el páramo natural.

En los análisis de regresiones lineales y múltiples no se detectaron correlaciones significativas entre las variables, lo que indica que el aumento o disminución de una variable en el intervalo de tiempo analizado no está correlacionado con el aumento o disminución de ninguna de las otras variables.

También se realizó un análisis multivariado con los deltas (figura 4) donde se observa que hacia el lado derecho del plano ocurre un cambio positivo de las variables (C, CIC, Ca, Mg) durante el lapso estudiado. Se observa que el ordenamiento de las parcelas no está relacionado con las categorías de descanso

consideradas. Tres de las parcelas de páramo están ubicadas en sitios donde ocurrió un cambio positivo; la otra parcela de páramo está ubicada en un lugar totalmente opuesto a las otras tres, mostrando que en ésta ocurrió un cambio negativo de las variables durante el lapso de estudio. La tabla 4 muestra las correlaciones de cada variable con los diferentes ejes de ordenamiento.

Tabla 3. Valores promedios \pm desviación estándar de los deltas (valor 99 – valor 96) de las características físico-químicas y la biomasa microbiana en las distintas categorías de descanso. ns= no significativo. KW= Kruskal-Wallis para comparación de medias. PV= páramo virgen. El * indica diferencias significativas entre los dos muestreos (test de t). El ANOVA indica diferencias entre categorías.

	Cultivadas	Tempranas	Intermedias	Tardías	PV	ANOVA ($\alpha \leq 0.05$)
Arena (%)	-5.25 \pm 4.06	-7.75 \pm 5.70	-4.80 \pm 4.60	-8.67 \pm 3.72*	-6.00 \pm 5.89	ns
Limo (%)	1.06 \pm 5.60	4.50 \pm 7.07	2.20 \pm 5.59	1.67 \pm 5.96	0.50 \pm 4.43	ns
Arcilla (%)	3.94 \pm 4.36	3.25 \pm 2.71	2.60 \pm 3.29	7.00 \pm 5.29*	6.00 \pm 1.63*	ns
pH	-0.45 \pm 0.24	-0.17 \pm 0.27	-0.12 \pm 0.19	-0.17 \pm 0.27	-0.25 \pm 0.06*	ns
Ct (%)	0.64 \pm 1.89	1.11 \pm 2.68	1.22 \pm 1.32	2.58 \pm 4.75	0.68 \pm 1.07	ns (KW)
Nt (%)	-0.01 \pm 0.09	0.07 \pm 0.08	0.02 \pm 0.03	0.06 \pm 0.18	-0.05 \pm 0.11	ns (KW)
C/N	-0.19 \pm 6.34	-0.05 \pm 6.86	1.59 \pm 2.94	5.99 \pm 13.71	3.39 \pm 2.85	ns (KW)
CIC(meq/100g)	0.20 \pm 6.25	-0.17 \pm 4.30	-1.63 \pm 2.89	-2.84 \pm 6.06	-0.20 \pm 8.84	ns (KW)
Ca(meq/100g)	-0.18 \pm 1.84	0.79 \pm 1.80	0.86 \pm 1.53	-0.11 \pm 3.12	-1.95 \pm 6.25	ns (KW)
Mg(meq/100g)	0.01 \pm 0.21	0.11 \pm 0.29	0.14 \pm 0.20	0.03 \pm 0.26	0.50 \pm 1.23	ns (KW)
Na(meq/100g)	-0.10 \pm 0.03*	-0.11 \pm 0.01	-0.10 \pm 0.02	-0.10 \pm 0.01*	-0.12 \pm 0.02*	ns
K(meq/100g)	0.76 \pm 0.75	0.65 \pm 0.92	0.29 \pm 0.25	0.85 \pm 0.78	1.05 \pm 1.79	ns (KW)
Sat.bases (%)	0.80 \pm 9.54	7.15 \pm 11.01	8.42 \pm 12.63	10.49 \pm 23.42	-0.05 \pm 23.70	ns (KW)
BM (mg/kg)	1.79 \pm 20.91	6.94 \pm 31.12	0.65 \pm 14.54	3.33 \pm 28.67	-18.57 \pm 31.21	ns
	n=16	n=8	n=6	n=6	n=4	

Tabla 4. Correlaciones de los deltas de las características físico-químicas del suelo y la biomasa microbiana con los 4 primeros ejes de ordenamiento.

	Eje			
	1	2	3	4
Arena	0.47**	0.04	-0.45**	-0.51**
Limo	-0.48**	0.16	0.71**	0.14
Arcilla	0.16	-0.25	-0.49**	0.45**
pH	0.31	-0.02	0.59**	-0.37*
Ct	0.81**	0.33*	0.39**	0.19
Nt	-0.15	-0.39*	0.53**	-0.11
C/N	0.71**	0.57**	0.07	0.23
CIC	0.53**	-0.06	-0.42**	-0.17
Ca	0.40*	-0.82**	0.09	-0.04
Mg	0.54**	-0.54**	-0.08	-0.08
Na	0.08	-0.09	0.18	-0.36*
K	0.16	-0.36*	-0.07	0.68**
Sat.Bases	0.19	-0.81**	0.35*	0.24
N-Bm	0.16	-0.17	0.06	-0.62**

** $\alpha = 0.01$

* $\alpha = 0.05$

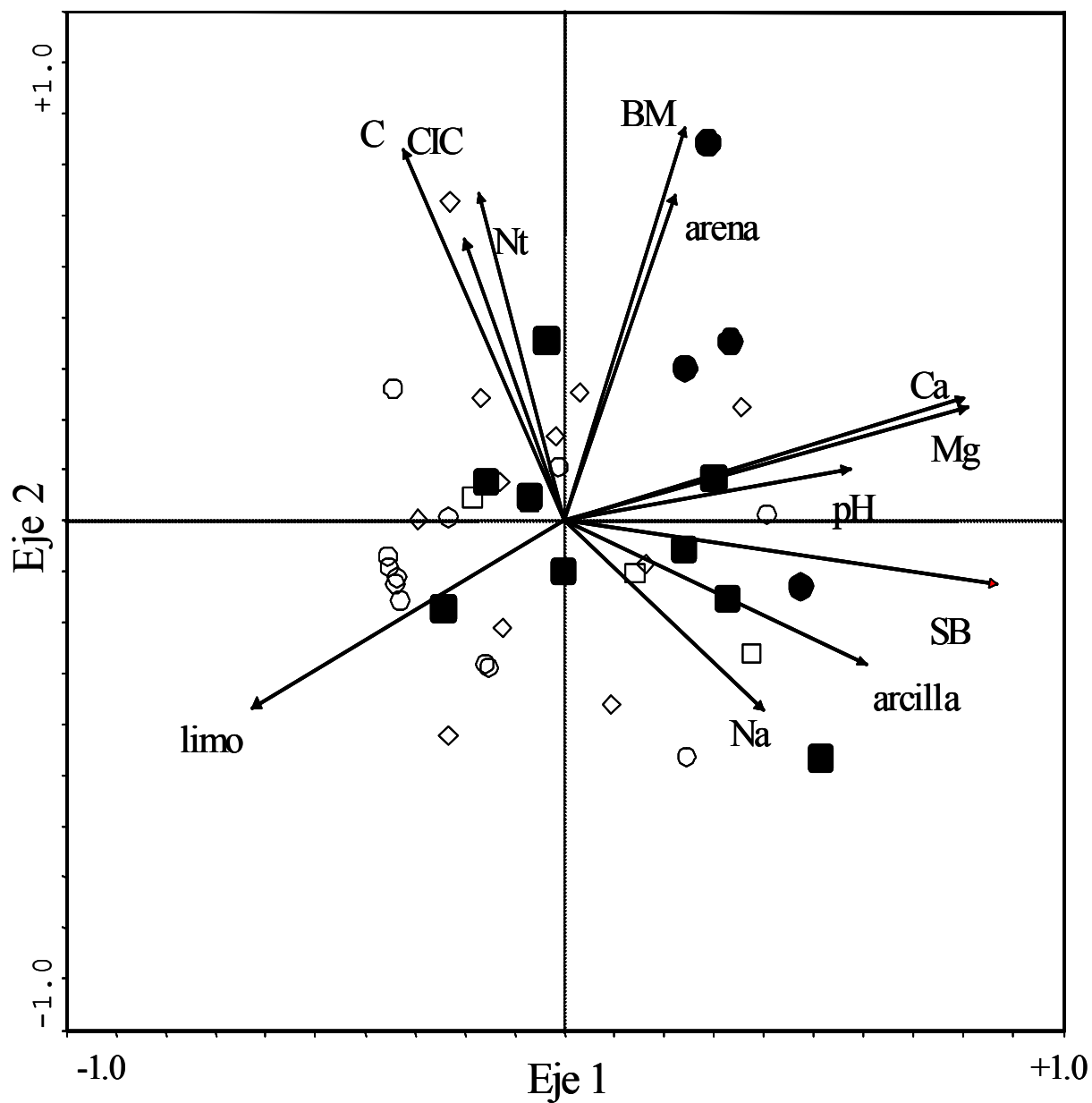


Figura 3. Diagrama de ordenación para el ACP centrado y estandarizado de las 40 parcelas en función de las características físico-químicas y la biomasa microbiana. Se presentan el primer y segundo eje que recogen un 26.7 y 22.1% de la varianza total. Los cuadrados vacíos representan las parcelas cultivadas, los círculos vacíos representan las parcelas tempranas, los diamantes representan las parcelas intermedias, los cuadrados rellenos las parcelas tardías y los círculos rellenos, el páramo natural. Datos de 1999.

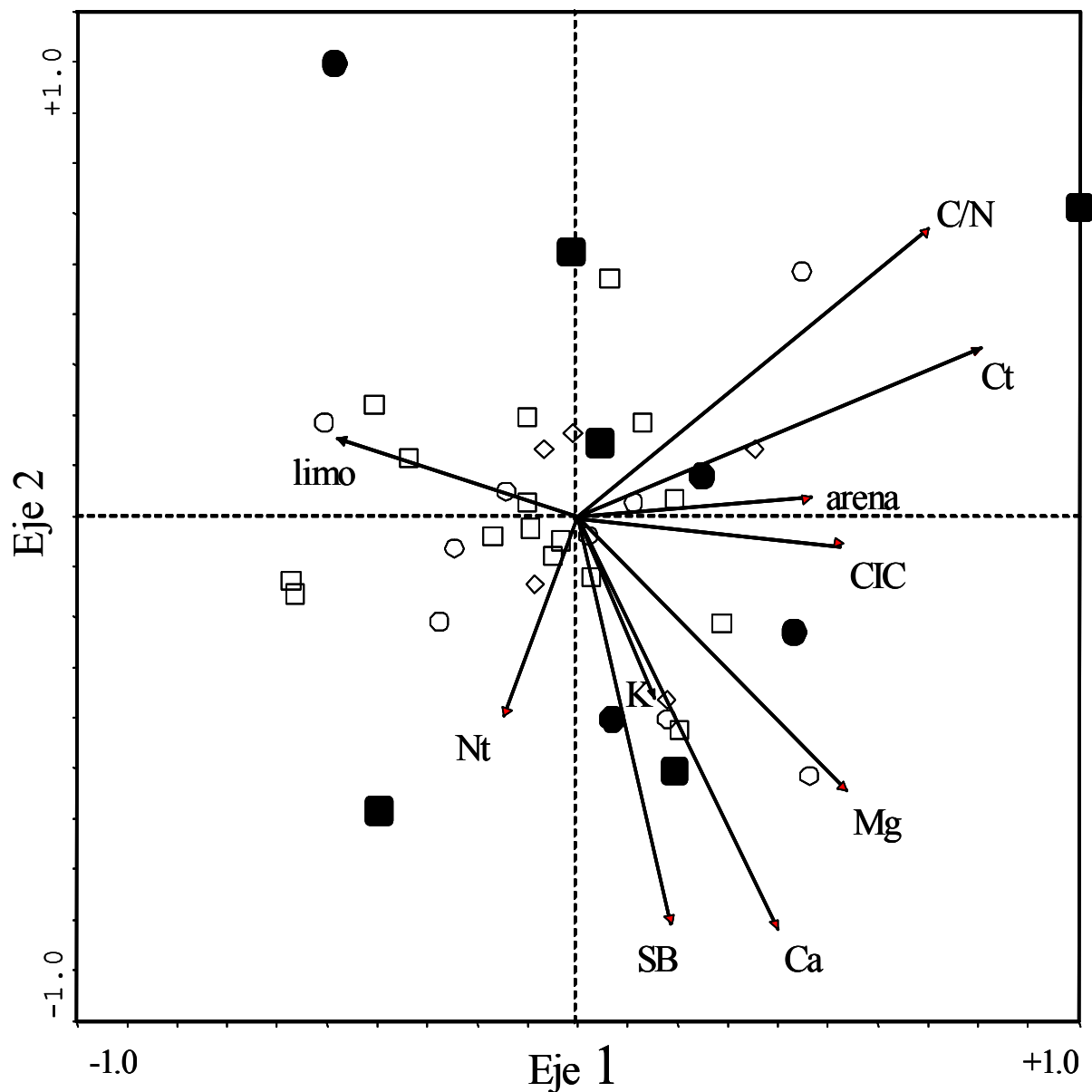


Figura 4. Diagrama de ordenación para el ACP centrado y estandarizado de las 40 parcelas en función de **los deltas** (valor 99 – valor 96) de las características físico-químicas y la biomasa microbiana. Se presentan el primer y segundo eje que recogen un 21.3 y 17.2% de la varianza total. Los cuadrados vacíos representan las parcelas cultivadas, los círculos vacíos representan las parcelas tempranas, los diamantes representan las parcelas intermedias, los cuadrados rellenos las parcelas tardías y los círculos rellenos, el páramo natural.

DISCUSIÓN

Las cantidades de N encontradas en la biomasa microbiana de los suelos estudiados corresponden a un promedio de 1.7% del N total del suelo en las parcelas en el ciclo agrícola (cultivo y descanso) y 2.9% del N total en los páramos nunca antes cultivados, la cuales están en el límite inferior de los valores reportados en la bibliografía para otros ecosistemas (Brookes et al., 1985; Arunachalam y Pandey, 2003). Estos valores bajos de N-BM se relacionan con la gran estabilidad de la materia orgánica en suelos de montaña (Sarmiento y Bottner, 2002).

El análisis sincrónico no detectó cambios en la cantidad de N-BM entre las diferentes edades de descanso. El hecho de detectarse una diferencia entre las distintas categorías de descanso y el páramo nunca cultivado es un indicador de que el uso agrícola de las parcelas modifica la biomasa microbiana, pero ésta no parece recuperarse durante el tiempo que duran los descansos. De las otras características físico-químicas del suelo evaluadas sólo en el pH y en el contenido de Mg se detectaron diferencias significativas, con tendencias a aumentar en la sucesión. Abadín *et al.*, (2002) reportan una tendencia similar de disminución de la acidez a lo largo de la sucesión en la misma zona de estudio. El aumento sucesional del Mg coincide con lo reportado por Llambí y Sarmiento (1998), donde a pesar de no conseguir diferencias significativas, el páramo natural presentaba los promedios más altos de Mg. Las diferencias significativas encontradas en estos parámetros nos estarían indicando el efecto negativo de la perturbación agrícola sobre el páramo, ya que la disminución del pH pudiera estar relacionada

con un descenso de la biomasa microbiana y del Mg, ocasionando una reducción de la fertilidad. La falta de tendencia en el resto de los parámetros físico-químicos corrobora lo ya encontrado por otros autores en sistemas con descansos largos en los Andes.

El análisis diacrónico tampoco permitió detectar cambios significativos en la sucesión. La falta de diferencias entre los dos años puede deberse a que realmente no ocurren cambios detectables en intervalos de tiempo tan cortos o bien pudiera ser consecuencia de que la variabilidad climática entre los dos años de muestreo tiene más influencia que la variabilidad debida al tiempo sucesional. Esta variabilidad climática pudiera ser una de las causas de las diferencias encontradas en los páramos vírgenes, donde no hubo un cambio de manejo. La variabilidad climática puede entonces considerarse como una fuente de error en el análisis diacrónico de variables que son sensibles a la cantidad y distribución de la precipitación u a otras características del clima. Otros factores que podrían estar afectando a la biomasa microbiana del suelo y dificultar el análisis diacrónico son:

- 1) la carga de pastoreo que recibieron las parcelas durante el intervalo que separa a los muestreos consecutivos, la cual fue diferente en cada una de las parcelas, 2)
- la heterogeneidad dentro de cada parcela, si bien el análisis diacrónico permite eliminar el problema de la heterogeneidad entre parcelas, la heterogeneidad interna puede ser muy alta y en consecuencia los 10 puntos de muestreo pueden no ser representativos del total de la parcela, 3) la variabilidad analítica de las determinaciones del N-BM en el laboratorio también pudieran considerarse como otra fuente de error, aunque el coeficiente de variación entre las réplicas

analizadas fue pequeño, por lo que ésta no es una fuente de variabilidad importante.

En otras sucesiones secundarias de montaña si se han encontrado variaciones significativas en la biomasa microbiana del suelo. Por ejemplo, Jaimes (2000) al analizar el N-BM en parcelas entre 1 y más de 20 años de descanso encuentra cambios después de los 12 años, lo cual pudiera indicar que la respuesta de la biomasa microbiana en los suelos de páramo es lenta y explicaría por qué en nuestra área de estudio no se encontraron cambios estudiando parcelas con menos de 12 años de descanso. Sarmiento y Bottner (2002) trabajando en la misma área encuentran cambios al comparar una parcela de 1 año con otra de 16, lo cual nuevamente sugiere que se necesitan intervalos largos de tiempo para detectar diferencias. Por otra parte, Arunachalam y Pandey (2003) en sistemas con descansos largos en montañas de la India, detectan cambios en el N-BM después de 7 años de descanso, en suelos con contenidos menores de materia orgánica. Independientemente de si se produce o no un aumento sucesional de la biomasa microbiana en los primeros años de sucesión éste parece ser muy difícil de detectar en las condiciones de alta heterogeneidad espacial y variabilidad climática interanual de estos ecosistemas de montaña, por lo que puede concluirse que el N-BM no es un indicador sensible en estas condiciones, al igual que no lo son el resto de parámetros físico-químicos analizados. En un trabajo reciente, Hargreaves *et al.* (2003), analizan si la biomasa microbiana del suelo puede ser utilizada como un indicador de cambios en el suelo y concluyen que la variabilidad espacial de este parámetro es tan grande que para detectar cambios

sería necesario realizar muestreos imposiblemente grandes (350 muestras en el caso de las parcelas que ellos estudian). Sin embargo la biomasa microbiana ha sido señalada por muchos autores como un parámetro sensible a los cambios, pero aparentemente la respuesta sólo se produce cuando los cambios en los aportes orgánicos son muy altos o cuando ocurren variaciones muy pronunciadas en el manejo (Hargreaves *et al.*, 2003). La biomasa microbiana no sería sensible a cambios más sutiles en suelos tan ricos en materia orgánica, pero sí sería sensible a la puesta en cultivo, tal como lo muestran las diferencias significativas encontradas entre las parcelas en el ciclo de cultivo y el páramo nunca cultivado. Para detectar cambios sucesionales en periodos tan cortos de tiempo en estos suelos con altos contenidos de materia orgánica y tanta heterogeneidad espacial, se requieren variables edáficas que muestren una respuesta más sutil a los procesos sucesionales. En este sentido, Abadín *et al.* (2002) encuentran, trabajando en la misma área de estudio, que el $\delta^{15}\text{N}$ de la MOS disminuye significativamente durante la sucesión, variando en cortos intervalos de tiempo. El $\delta^{15}\text{N}$ es un indicador de cuan cerrado es el ciclo del N y su disminución indica que a medida que transcurre la sucesión hay menos pérdidas de N por lavado y denitrificación y la eficiencia de ciclado aumenta. Ningún otro indicador ha mostrado ser sensible hasta ahora.

En base a los resultados obtenidos tenemos que, al parecer, no se produce un aumento importante de la biomasa microbiana durante el intervalo del descanso. La recuperación de este parámetro hasta llegar nuevamente a los valores del páramo, pudiera ocurrir en un periodo de tiempo más largo del considerado. La

recuperación de la fertilidad podría estar ligada a otros factores como el pH y el contenido de Mg, que sí parecen mostrar una tendencia a aumentar en la sucesión. Algunos autores han señalado que la acidez presenta una clara tendencia a disminuir a lo largo de la sucesión incidiendo en un aumento de la disponibilidad de los nutrientes en agroecosistemas de páramo (Ferwerda, 1987; De Robert, 1993; Llambí y Sarmiento 1998; Abadín et al, 2002). Este trabajo muestra cuan difícil resulta generalizar los resultados obtenidos a nivel de una parcela (como los resultados de Sarmiento y Bottner, 2002), a toda una región, ilustrando el problema de los cambios de escala en el estudio de los procesos ecológicos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto TROPANDES (Unión Europea, programa INCO-DC, contrato número ERBIC18CT98-0263). Expresamos nuestro agradecimiento al CDCHT (proyecto C-1071-01-01-EM) y a Postgrados Integrados en Ecología (FONACIT) por el financiamiento otorgado. Queremos agradecer muy especialmente la colaboración de Zulay Méndez en los análisis químicos y la participación en el trabajo de campo de Nelson Márquez, Auxiliadora Olivo y el Sr. Bernabé Torres. Así mismo dejamos constancia de nuestro agradecimiento a Maximina Monasterio, coordinadora del proyecto TROPANDES en Venezuela y finalmente un agradecimiento especial a la comunidad de Gavidia.

BIBLIOGRAFIA

- Abadín, J. González-Prieto, S. J. Sarmiento, L. Villar, M. C. y T. Carballas. 2002. Successional dynamics of soil characteristics in a long fallow agricultural system of the high tropical Andes. *Soil Biology and Biochemistry* 34(11):1739-1748.
- Aranguren, A. y M. Monasterio. 1997. Aspectos de la Dinámica del nitrógeno de parcelas con diferentes tiempos de descanso en el Páramo de Gavidia (Andes Venezolanos). En: Liberman, M. y C. Baied. (Eds). *Desarrollo sostenible de ecosistema de montañas: Manejo de Áreas Frágiles en los Andes*. UNU-PL-880. pp 171-179.
- Arunachalam, A. y H.N.Pandey. 2003. Ecosystems restoration of Jhum fallow in northeast India: microbial C and N along altitudinal and successional gradients. *Restoration Ecology* 11(2):168-173.

- Brookes, P.C. Landman, A. Pruden, G. y D.S. Jenkinson. 1985. Chloroform fumigation and release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen of soil. *Soil Biology and Biochemistry* 17 (6): 837-842.
- Carter, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal* 94:38-47.
- De Robert, P. 1993. Prácticas campesinas en el páramo de Apure: fundamentos ecológicos, económicos y sociales de un sistema de producción andino (cordillera de Mérida, Venezuela). Tesis de Doctorado. Postgrado de Ecología Tropical. Facultad de Ciencias. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- Ferwerda, W. 1987. The influence of potato cultivation on the natural bunchgrass paramo in the colombian Cordillera Oriental. Internal report no. 220. Hugo de Vries Laboratory, Department of Palynology and Palaeo/Actuo-Ecology, University of Amsterdam, Amsterdam. 83 pp.
- Hargreaves, P. Brookes, P. Ross, G. y P.Poulton. 2003. Evaluating soil microbial biomass as an indicator of long-term environmental change. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 401-407.
- Jaimes, V. 2000. Estudio ecológico de una sucesión secundaria y mecanismos de recuperación de la fertilidad en un ecosistema de páramo. Tesis de Maestría. Postgrado de Ecología Tropical. Facultad de ciencias. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- Llambí, L. D. y L. Sarmiento. 1998. Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria de los páramos venezolanos. *Ecotrópicos* 11(1): 1-14.
- Powlson, D. Brookes, P y B. Christensen. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry* 19: 159-164.
- Sarmiento, L. Monasterio, M. y Montilla, M. 1993. Ecological bases, sustainability, and current trends in traditional agriculture in the Venezuelan high Andes. *Mountain Research and Development* 13 (2):167-176.
- Sarmiento, L. 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Tesis de Doctorado. Universidad de Paris XI. 237 p.
- Sarmiento, L. y P. Bottner. 2002. Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration. *Applied Soil Ecology* 19(1):79-89.
- Sarmiento, L. Llambí L.D., Escalona A. y J. Márquez. 2003. Vegetation patterns, regeneration rates and divergence in an old-field succession of the high tropical Andes. *Plant Ecology* 166: 63-74.
- Smith, J. 1995. Die Auswirkungen der Intensivierung des Ackerbaus im Páramo de Gavidia-Landnutzungswandel an der oberen Anbaugrenze in den

venezolanschen Anden. Diplomarbeit. Instituto de Geografía.
Universidad de Bonn.

Turco, R. Kennedy, A y M. Jawson. 1994. Microbial indicator of soil quality. Pages 73-90 in Doran, D. Coleman, C. Bezdicek, D y B. Stevart, editors. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Bulletin No. 35. Soil Science Society of America Journal, Madison, Wisconsin.

CAPITULO 3

DINÁMICA DEL CARBONO Y DEL NITRÓGENO POTENCIALMENTE MINERALIZABLES EN UNA SUCESIÓN SECUNDARIA EN LOS PÁRAMOS VENEZOLANOS: ENFOQUES SINCRÓNICO Y DIACRÓNICO*

RESUMEN

La dinámica sucesional del nitrógeno (No) y carbono potencialmente mineralizable (Co), fué analizada en un sistema agrícola con descansos largos en los Andes venezolanos, con la finalidad de evaluar la sensibilidad de estos parámetros a los cambios sucesionales y su utilidad como indicadores de la restauración de la fertilidad. Se muestreó el suelo de 12 parcelas de las siguientes categorías sucesionales: 3 tempranas (1-3 años), 3 intermedias (4-6 años), 3 tardías (más de 6 años) y 3 de páramo natural nunca antes cultivado. Estos suelos fueron incubados en el laboratorio durante 90 días. Este enfoque sincrónico para el estudio de la sucesión ecológica fue complementado con un enfoque diacrónico en el cual las mismas parcelas fueron muestreadas por segunda vez con tres años de intervalo. En cada parcela y año de muestreo se determinaron los parámetros cinéticos de la mineralización del C y del N además de distintas propiedades físico-químicas del suelo incluyendo el N de la biomasa microbiana (N-BM). Se consideraron la intensidad del pastoreo y la biomasa vegetal como otras variables explicativas además del tiempo de descanso. No se encontraron tendencias sucesionales en ninguno de los parámetros evaluados a pesar de que se utilizaron los dos tipos de enfoques mencionados. Se corroboró la hipótesis de que la tasa de mineralización de la materia orgánica en los suelos de páramo es muy baja y esto pudiera ser una de las causas de la baja fertilidad intrínseca de estos suelos. La BM presentó una alta correlación con el Co y No ($r^2=0.79$ y $r^2=0.75$ respectivamente) lo que corrobora el papel de la BM como fuente y sumidero de nutrientes. Se observó un posible efecto positivo del pastoreo sobre algunas variables relacionadas con la recuperación de la fertilidad, tales como Co, No, pH, Ca, Mg y CIC.

Palabras claves: incubaciones aeróbicas, biomasa microbiana, sucesiones, páramo, fracciones de la materia orgánica, fracciones lábiles.

*Este capítulo será presentado posteriormente como artículo con los siguientes autores: Zoraida Abreu y Lina Sarmiento. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela.

INTRODUCCION

La actividad agrícola en la zona del páramo andino venezolano ha ido aumentando e intensificándose en las últimas décadas pero en general con una dependencia muy alta de la utilización de cantidades importantes de fertilizantes, ya sean minerales u orgánicos. Incluso en los sistemas agrícolas menos intensivos, que utilizan descansos largos (5 a 10 años) para recuperar la fertilidad de los suelos, se emplean fertilizantes minerales, aunque en cantidades menores en comparación con los sistemas más intensivos, donde los descansos han desaparecido. Los mecanismos implicados en la recuperación de la fertilidad durante los periodos de descanso en la alta montaña tropical han sido objeto de un cierto número de investigaciones (Ferwerda, 1987; Sarmiento *et al.*, 1993; Hervé, 1994; Sarmiento, 1995; Aranguren y Monasterio, 1997; Llambí y Sarmiento, 1998; Abadín *et al.*, 2003; Abreu *et al.*, capítulo 2 de esta tesis) sin que hasta el momento haya podido avanzarse mucho en este sentido. No se han encontrado tendencias en los parámetros edáficos analizados como es el caso de los contenidos totales de nitrógeno y carbono del suelo, en la disponibilidad de nutrientes, ni en la biomasa microbiana del suelo. La falta de respuestas de estos parámetros edáficos al tiempo sucesional puede deberse a que éstos son realmente poco o nada sensibles a las escalas de tiempo consideradas y/o a la alta heterogeneidad de los suelos de montaña, que dificulta el análisis sincrónico de la sucesión. Por lo tanto se hace necesario utilizar indicadores más sensibles que tengan un tiempo de respuesta más acorde con la duración de los periodos de descanso y tratar de minimizar la heterogeneidad espacial que pudiera estar

enmascarando posibles tendencias sucesionales. Una de las mayores dificultades para el estudio de sucesiones en ambientes heterogéneos, como son los sistemas montañosos, es que al utilizar un análisis sincrónico (sustitución de tiempo por espacio) la gran heterogeneidad espacial dificulta la visualización de las tendencias temporales. Un enfoque diacrónico (seguimiento en el tiempo de las mismas parcelas) puede resolver este problema pero tiene a su vez la desventaja de que se requiere un tiempo mayor de estudio y de que variaciones interanuales de las condiciones ambientales pueden ocultar las tendencias sucesionales cuando el intervalo de tiempo es corto y la sensibilidad de la variable baja (Abreu et al., capítulo 2 de esta tesis).

La materia orgánica del suelo constituye una importante fuente de N para las plantas cultivadas, pudiendo representar entre el 30 al 100% de las necesidades de N de los cultivos (Allison, 1973, Curtin y Wen, 1999; Carter, 2002). En un trabajo previo Abreu *et al.* (capítulo 1 de esta tesis), cuantificaron en 30% la contribución del N nativo a la absorción total del cultivo de papa en un experimento realizado en los páramos venezolanos utilizando una fertilización moderada (288 kg de N ha⁻¹) en una parcela con siete años de descanso. Si bien este porcentaje no es despreciable, es bastante bajo si se considera el alto contenido en N orgánico de estos suelos de montaña, representando la cantidad absorbida únicamente el 0.1% del N total del suelo. Este resultado sugiere que la tasa de mineralización de la materia orgánica de los suelos de páramo es muy baja y pudiera ser una de las causas de su baja fertilidad intrínseca, explicando la necesidad de utilizar grandes cantidades de fertilizantes pese a la riqueza en N del suelo. De lo anterior también se deduce que el contenido de N total del suelo no

es necesariamente un buen indicador de la disponibilidad de este elemento para las plantas, debido a que la tasa de mineralización puede ser muy variable dependiendo del tipo de suelo y del clima, según ha sido previamente señalado por varios autores (Aranguren y Monasterio, 1997; Llambí y Sarmiento, 1998). En este sentido se ha propuesto que el N mineralizado durante la incubación aeróbica del suelo en el laboratorio, en condiciones estándar de temperatura y humedad, puede ser un mejor indicador de la disponibilidad de N nativo para los cultivos (Standford y Smith, 1972). Así mismo, el carbono mineralizado en las mismas condiciones es un indicador de la fracción lábil de la materia orgánica del suelo. Sarmiento y Bottner (2002) trabajando con dos suelos de páramo con distintos tiempos en sucesión (0 y 15 años) encontraron que el N y el C mineralizables representan un porcentaje muy bajo del N y C totales del suelo, lo cual indica que la materia orgánica de los suelos de los páramos es aparentemente muy estable, reforzando la idea de que estos suelos tienen tasas de mineralización muy bajas. Por otra parte, estos autores encontraron que tanto el C como el N mineralizables fueron mayores en la parcela que había pasado varios años en sucesión que en la parcela recién abandonada, lo cual sugiere que esta fracción mineralizable aumentaría durante la sucesión, pudiendo ser un componente importante de la restauración de la fertilidad. Sin embargo, el trabajo de estos autores, realizado únicamente en dos parcelas, requiere de una verificación basándose en un número mayor de parcelas. En este trabajo nos planteamos utilizar un análisis combinado sincrónico-diacrónico de la sucesión secundaria en parcelas en descanso en el páramo para: 1) analizar el N y C mineralizables en estos suelos para verificar la hipótesis de que la baja fertilidad intrínseca de los mismos se

relaciona con la baja tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo. 2) Analizar si a lo largo de los periodos de descanso el C y N mineralizables aumentan, según plantean Sarmiento y Bottner (2002). Si realmente se presenta un aumento sucesional, esto significaría que dichos parámetros pudieran ser utilizados como indicadores de la recuperación de la fertilidad. 3) Identificar las propiedades edáficas relacionadas con la mineralización del C y N en suelos de páramo. 4) Analizar otros factores que pudieran explicar las diferencias en el C y N mineralizables entre las dos fechas de muestreo. Los factores a considerar en este último punto serán la biomasa vegetal y la intensidad de pastoreo.

METODOLOGÍA

Área de Estudio

El estudio se realizó en el Páramo de Gavidia localizado entre 8° 35'- 8° 45' de latitud N y 70° 52'-70° 58' de longitud O dentro del parque Nacional Sierra Nevada, en la cordillera de Mérida, a 10 kilómetros de la población de Mucuchíes y a una altitud de 3300 m. El régimen de precipitación es unimodal, con un promedio de 1300 mm y una temperatura media anual de 8.5°C. Los muestreos se realizaron en un pequeño valle glacial donde el paisaje está conformado por un mosaico de zonas de páramo nunca cultivado, áreas en diferentes etapas sucesionales y parcelas cultivadas. La actividad agrícola se desarrolla entre 3300 y 3800 m sobre laderas o sobre pequeños abanicos fluviales y valles colgantes. Los suelos son inceptisoles, muy ricos en materia orgánica con pH ácido, textura franco arenosa y alta pedregosidad.

El sistema agrícola se caracteriza por la alternancia de periodos de cultivo de 1 a 4 años, durante los cuales se cultivan papas y cereales, con periodos de descanso

que pueden durar más de 10 años. El ciclo de cultivo se inicia con un arado de rompedura, cinco meses antes de la siembra, para incorporar la vegetación como abono verde, luego se realiza la siembra, durante la cual se ara nuevamente y se coloca la semilla y el fertilizante mineral. Para todas estas labores se usa el arado de bueyes. Las variedades de papa que se cultivan son de ciclo largo que van desde cinco a ocho meses. Durante el descanso las parcelas son utilizadas, fundamentalmente, para pastoreo.

Selección de las parcelas

Se escogieron 9 parcelas con edades comprendidas entre 1 a 9 años de descanso y 3 parcelas de páramo nunca cultivado. El tiempo de descanso de las parcelas se determinó con exactitud a partir de la base de datos histórica elaborada por Smith (1995). Las parcelas seleccionadas fueron muestreadas dos veces, la primera en julio de 1996 y la segunda en julio de 1999. En el segundo muestreo, ninguna de las parcelas que estaban en descanso en 1996 fue cultivada, es decir que tenían 3 años más de descanso. Para realizar el muestreo de suelo se excluyó un borde de 2 m alrededor de cada parcela y se seleccionaron aleatoriamente 10 puntos de muestreo. En cada punto se extrajo con una pala un monolito de suelo de 20 cm de profundidad y un área aproximada de 10 cm de diámetro. El suelo de los 10 puntos se mezcló para obtener una muestra compuesta por parcela de entre 4 y 6 Kg de suelo. Estas muestras compuestas fueron llevadas al laboratorio y pasadas por un tamiz de 4 mm. En 1996 las muestras fueron tomadas por Llambí y Sarmiento, secadas y almacenadas hasta 1999 cuando se realizaron las incubaciones.

N y C potencialmente mineralizables

Para cada incubación se tomaron 50 g de suelo seco que fue rehumificado homogéneamente a 35% de contenido relativo de humedad. Estas muestras fueron colocadas en frascos de vidrio de 950 ml e incubadas aeróbicamente por 90 días a 28°C (Stanford y Legg, 1968). Los frascos se abrían una vez por semana para mantener las condiciones aeróbicas y ajustar el contenido de humedad. Para cada suelo y época de muestreo se incubaron 15 réplicas utilizadas para los muestreos destructivos de N mineral y para los muestreos no destructivos de CO₂ liberado, para un total de 360 muestras incubadas.

Determinaciones de N mineral

Se realizó una determinación inicial, luego otras a los 15, 30, 45, 65 y 90 días de incubación. En cada muestreo se tomaron 3 réplicas por parcela y fecha de muestreo (12 parcelas x 2 años x 3 réplicas). Para las determinaciones del nitrógeno mineral, se realizaron extractos de suelo agregando al equivalente de 40 g de suelo seco, 150 ml de K₂SO₄ 1N y agitando por 30 minutos. Los extractos fueron destilados con óxido de magnesio en presencia de aleación Dewarda (Keeney y Nelson, 1982).

Carbono mineralizado

El CO₂ liberado fue absorbido en trampas de NaOH (25 ml), éstas eran remplazadas en cada muestreo. Los muestreos se realizaron a los 6, 15, 22, 30, 58, 73 y 90 días de incubación. La normalidad de las trampas se ajustó a medida que transcurría la incubación, para obtener un porcentaje de uso de la trampa entre 25 y 75 %. Se tenían cuatro réplicas por parcela en cada una de las dos

fechas de muestreo (12 suelos x 2 fechas de muestreo x 4 réplicas por muestreo). Se utilizaron 6 blancos, frascos del mismo tamaño que sólo contenían trampas con el NaOH. Para determinar los mg de C en las trampas, se realizó una diferencia del volumen promedio gastado en la titulación de los blancos y el volumen de titulación de la muestra. Las trampas se titularon con H₂SO₄, con una normalidad equivalente a la mitad de la de la trampa, agregándoles una solución saturada de cloruro de bario para precipitar los carbonatos. La titulación se hizo utilizando un titulador automático (Titrino 702).

Parámetros de la incubación

El N y el C potencialmente mineralizable (No y Co) fueron calculados ajustando el N y C mineralizado acumulado a un modelo exponencial (Campbell *et al.*, 1993):

$$y = a(1 - \exp^{-bt})$$

Donde y = N ó C mineralizado acumulado, a = No ó Co, b = tasa de mineralización, en nuestro caso llamaremos KN a la tasa de mineralización del nitrógeno y KC a la tasa de mineralización del carbono.

N de la biomasa microbiana

Para las determinaciones del N-BM, se utilizó el método de fumigación extracción (Brookes *et al.*, 1985). El suelo fue tamizado a 4 mm y tres réplicas de suelo fresco equivalente a 40 g de suelo seco, fueron fumigados por 18 h con cloroformo libre de alcohol. Después de remover el cloroformo, los suelos fumigados y tres controles de suelo no fumigado fueron extraídos con K₂SO₄ 1N (proporción suelo:solución 1:5). El N total de los controles y fumigados fue determinado por digestión y destilación, utilizando el método de Kjeldahl. El N-BM fue calculado como la diferencia entre fumigados y controles dividida por un factor de 0.45. Los

datos de N-BM correspondientes a los suelos del año 1996 fueron tomados de Llambí (1997).

Otros análisis físico-químicos

Los suelos fueron secados al aire, tamizados a 2 mm y analizados para las siguientes propiedades físico-químicas: textura (método del hidrómetro de Boyucos), pH (en una suspensión suelo-agua en proporción 2:1), nitrógeno total (método Kjeldahl), carbono orgánico (método de Walkley-Black), bases cambiables (método de Pranshnikov), CIC (extracción con NH_4O 1M a pH 7). Estos mismos parámetros fueron determinados en las muestras de suelo en el año 1996 utilizando la misma metodología.

Se utilizaron como variables explicativas: el índice de pastoreo, la biomasa vegetal y la edad de descanso. La biomasa vegetal se estimó utilizando los censos de vegetación realizados por Sarmiento *et al.* (2003). El índice de pastoreo se calculó basándose en la abundancia de 7 especies indicadoras, 5 que muestran ausencia de pastoreo: *Trisetum irazuense*, *Sisyrinchium tinctorium*, *Brachypodium mexicanum*, *Nassella linerifolia* y *Agrostis trichodes*, y 2 que indican presencia del mismo: *Oenothera epilobifolia* y *Poa annua* (Sarmiento, 2004).

Estadística y procesamiento de la información

Para los análisis estadísticos las parcelas fueron agrupadas en cuatro categorías: tempranas (1 a 3 años de descanso), intermedias (4-6 años), tardías (más de 6 años) y páramo natural. En el enfoque sincrónico se utilizó un Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía, para la comparación de cada una de las variables de estudio. Se probaron los supuestos del ANOVA. Cuando las diferencias eran significativas se utilizó la prueba de comparación de medias de Tukey (HSD). Para

estudiar las correlaciones entre las diferentes variables se realizaron regresiones simples y múltiples. En el análisis diacrónico se realizaron pruebas de comparación de medias (t de student). Para analizar los cambios temporales ocurridos en las variables se calculó la diferencia de éstas en los dos muestreos (deltas). Se utilizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para hacer una evaluación integrada de las características físico-químicas en las parcelas en los dos muestreos con los valores absolutos y con los deltas. Los programas utilizados para el análisis de los datos fueron STATISTICA versión 4.5 y CANOCO para Windows versión 4.02.

RESULTADOS

Parámetros de la incubación

Los valores de No variaron entre 48.8 ± 4.8 a 237 ± 10 mg/kg (tabla 1), los valores mayores correspondieron a las parcelas de páramo. Los valores de Co variaron entre 400 ± 34 a 972 ± 53 mg/kg e igualmente los mayores valores correspondieron a las parcelas de páramo natural. Es importante resaltar la gran variabilidad entre los valores obtenidos tanto del No como del Co y los bajos valores en los coeficientes de variación de las réplicas (frascos de incubación de la misma parcela) lo que indica que la variabilidad encontrada corresponde a la heterogeneidad entre parcelas y no a problemas metodológicos en las incubaciones. Tanto el No como el Co no presentaron diferencias significativas entre las dos fechas de muestreo para ninguna de las categorías de descanso. Se observa que para el No, no se detectaron diferencias significativas tanto en el análisis sincrónico como diacrónico. Con respecto al Co, en el análisis sincrónico al realizar el ANOVA no se observaron diferencias significativas en el primer año

de muestreo, no así para el segundo donde se detectaron diferencias significativas (Tukey honesto) entre el páramo natural y el resto de las parcelas, siendo mayor en el primero.

El KN varió entre 0.04 a 2.39 mg día⁻¹. En este parámetro no se detectaron diferencias significativas tanto en el análisis sincrónico como diacrónico. Los valores obtenidos de KC oscilaron entre 0.04 a 0.13 mg día⁻¹. Para el KC, en el análisis sincrónico no se detectaron diferencias significativas; en el enfoque diacrónico se observaron diferencias significativas en las parcelas intermedias y tardías, en ambos casos los valores del año 1996 fueron mayores al año 1999.

Se calculó el porcentaje del C y N total que se mineralizan (%No y %Co), con el fin de poder realizar comparaciones más directas e independientes de los valores absolutos. El %No varió entre 1.3 y 3.9% del N total de suelo. Este parámetro no mostró diferencias significativas en el análisis sincrónico en las dos fechas de muestreo. En el análisis diacrónico se detectaron diferencias significativas en: las parcelas tardías, siendo mayor en el primer año, y en las parcelas de páramo donde se observó el mismo comportamiento. En relación a los deltas se observa que no hay una respuesta igual para las parcelas de los diferentes grupos; en algunas el cambio ocurrido en el %No fué positivo y en otras negativo. Los valores de %Co obtenidos variaron entre 0.4 a 1.4%. En el análisis sincrónico no se detectaron diferencias significativas. En el análisis diacrónico se detectaron diferencias significativas en las parcelas tempranas intermedias y el páramo natural, mostrando ambos grupos el mismo comportamiento: los valores correspondientes al año 1996 fueron mayores que los del año 1999. En casi todos

los parámetros de la incubación se observa una alta variabilidad entre las parcelas.

Relación de los parámetros de incubación (No, Co, KN, KC, %No, %Co, Co/No) con las variables edáficas y las variables explicativas.

Se realizaron regresiones simples y múltiples entre el No y el Co con las variables edáficas y explicativas. Las regresiones simples (tabla 2) nos indicaron que el No está relacionado positivamente con la biomasa microbiana, el N y C totales y con la variable explicativa biomasa vegetal. Con el análisis de regresión múltiple (tabla 3) se obtuvo que el No está en función de las variables biomasa microbiana y contenido de Mg, este último explica aproximadamente un 5% más de la varianza ($r^2=0.88$).

El Co presenta una correlación positiva con la biomasa microbiana y el C total. En el análisis de regresión múltiple (tabla 3) las variables significativas fueron la BM y el K, esta última aumenta un 11% más la varianza total explicada. En la tabla 2 puede observarse que tanto el No como el Co presentaron una alta correlación con el N-BM lo cual puede corroborarse al observar la figura 1.

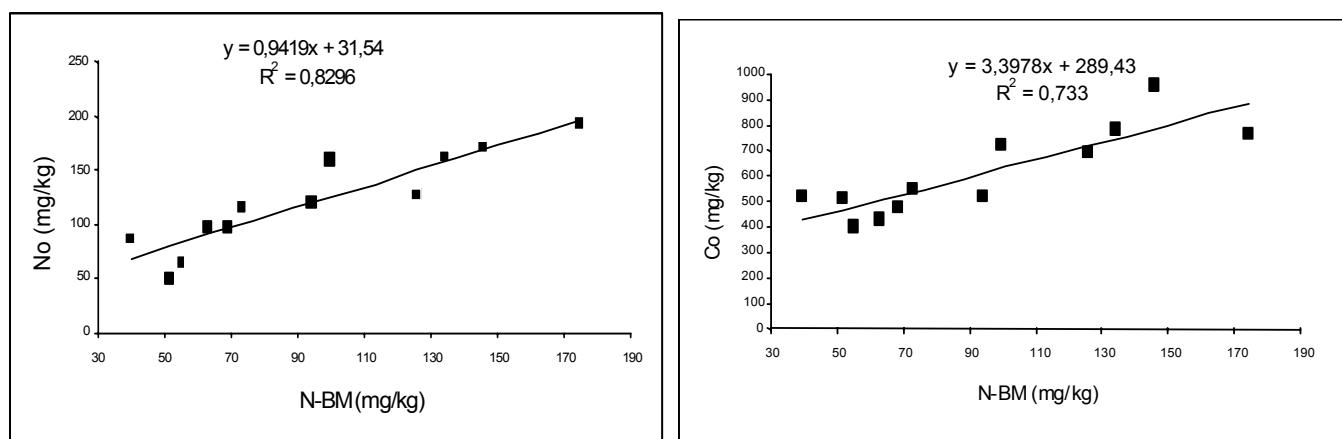


Figura 1. Regresión lineal simple entre el No y el Co con el nitrógeno de la biomasa microbiana expresados en mg/kg correspondiente al año 1999 (n=12).

Tabla 1. Parámetros de la mineralización del N y del C (media \pm sd) usando un ajuste exponencial. Leyenda: temprá = parcela temprana, Inter = parcela intermedia y PV = parcela del páramo natural. No y Co = nitrógeno y carbono potencialmente mineralizable. KN y KC = tasa de mineralización del N y C. %Co y %No = porcentaje del C o N total que se mineraliza (%No y %Co). Delta = cambio en el % de No y Co (1999-1996).

Parcela	Rep	año	No (mg/kg)	KN	r ²	%No	Delta %No	Co (mg/kg)	KC	r ²	%Co	Delta %Co
tempra	1	96	122 \pm 7	0.06	0.88	2.5	-0.14	511 \pm 24	0.10	0.96	0.5	0.05
		99	115.2 \pm 3.2	0.14	0.95	2.4		544 \pm 31	0.09	0.94	0.6	
	2	96	52.5 \pm 3.6	0.04	0.93	1.4	-0.10	413 \pm 38	0.05	0.93	0.6	0.13
		99	48.8 \pm 4.8	0.04	0.85	1.3		513 \pm 44	0.04	0.95	0.7	
	3	96	135.2 \pm 6.8	0.33	0.90	2.3	0.46	824 \pm 59	0.05	0.95	0.8	-0.01
		99	161.9 \pm 7.1	0.12	0.89	2.8		784 \pm 43	0.09	0.95	0.8	
media	96		103 \pm 44	0.14		2.1	0.07	583 \pm 215	0.06		0.6a	0.06
	99		109 \pm 57	0.10		2.2		614 \pm 149 A	0.07		0.7b	
Inter	1	96	118 \pm 7	0.05	0.90	2.8	-0.49	405 \pm 39	0.09	0.86	0.6	0.11
		99	97 \pm 4	0.16	0.89	2.3		470 \pm 40	0.07	0.89	0.7	
	2	96	92 \pm 4	0.15	0.91	1.9	0.55	545 \pm 41	0.10	0.90	0.8	-0.09
		99	119 \pm 5	0.06	0.94	2.4		517 \pm 28	0.08	0.94	0.7	
	3	96	63 \pm 5	0.04	0.89	1.8	0.03	421 \pm 33	0.08	0.90	0.8	-0.02
		99	64 \pm 4	0.05	0.89	1.8		400 \pm 34	0.08	0.89	0.8	
media	96		91 \pm 27	0.08		2.2	0.03	457 \pm 76	0.09 a		0.7	0.00
	99		94 \pm 28	0.09		2.2		462 \pm 59 A	0.08 b		0.7	
Tardías	1	96	139 \pm 4	0.12	0.94	3.4	-0.99	526 \pm 29	0.11	0.93	0.6	-0.11
		99	98 \pm 6	0.11	0.83	2.4		427 \pm 29	0.07	0.93	0.5	
	2	96	142 \pm 7	0.18	0.85	3.5	0.44	469 \pm 38	0.09	0.89	0.8	0.34
		99	160 \pm 4	2.39	0.94	3.9		719 \pm 49	0.08	0.92	1.1	
	3	96	91 \pm 3	2.27	0.93	3.8	-0.21	481 \pm 30	0.07	0.94	1.3	0.06
		99	86 \pm 4	0.30	0.89	3.6		514 \pm 30	0.06	0.95	1.4	
media	96		124 \pm 29	0.86		3.6 a	-0.25	492 \pm 30	0.09 a		0.9	0.09
	99		111 \pm 42	0.93		3.3 b		553 \pm 150 A	0.07 b		1.0	
PV	1	96	128 \pm 5	2.26	0.86	3.5	-0.04	616 \pm 37	0.11	0.93	1.0	0.1
		99	126 \pm 3	0.15	0.96	3.5		693 \pm 46	0.07	0.93	1.1	
	2	96	237 \pm 10	0.09	0.92	3.9	-0.72	981 \pm 77	0.09	0.90	1.1	-0.30
		99	193 \pm 6	0.11	0.94	3.1		766 \pm 38	0.13	0.94	0.8	
	3	96	204 \pm 8	0.20	0.91	3.2	-0.53	972 \pm 53	0.06	0.96	0.8	0.004
		99	171 \pm 5	0.08	0.96	2.7		951 \pm 70	0.07	0.92	0.8	
media	96		190 \pm 56	0.85		3.5 a	-0.43	856 \pm 208	0.09		1.0 a	-0.07
	99		160 \pm 39	0.12		3.1 b		803 \pm 133 B	0.09		0.9 b	

Letras mayúsculas son usadas para el análisis sincrónico (ANOVA). Letras minúsculas son usadas para la comparación de medias en el análisis diacrónico (test de t).

El KN presentó correlación con el contenido de arcilla (tabla 3). El KC presentó una correlación con la BM, la biomasa vegetal y el contenido de K en sentido negativo. El análisis de regresión múltiple señaló como significativas a las variables biomasa vegetal y el contenido de K (tabla 3).

El %No y %Co presentaron correlación con el Na. El %No presenta además una correlación positiva con el Mg. En el análisis de regresión múltiple las variables significativas fueron el Mg, el contenido de arcilla, el N total y la BM. La regresión múltiple del %Co indica que las variables significativas fueron: Na, la relación C/N, BM y el contenido de Ca.

El análisis de regresión múltiple de la relación Co/No señala las variables: arena, N total y contenido de K como significativas (tabla 3).

La edad de descanso, como variable explicativa, no presentó correlación con ninguno de los parámetros, indicando que ninguno de estos se incrementa en el tiempo.

Tabla 2. Correlación entre los parámetros de la incubación, los parámetros del suelo y las variables explicativas Índice de pastoreo (IP), biomasa vegetal y edad. Datos del año 1999 (n=12).

	Co	No	%Co	%No	KC	KN	Co/No
BM	0.86*	0.91*	0.05	0.48	0.66*	0.02	-0.43
Ct	0.60*	0.56*	-0.55	-0.13	0.23	-0.25	-0.23
Nt	0.50	0.64*	-0.52	-0.19	0.45	-0.09	-0.33
C/N	0.28	0.01	-0.20	0.10	-0.22	-0.35	0.10
pH	0.16	0.09	0.51	0.46	0.11	0.07	-0.07
CIC	0.36	0.50	-0.38	0.02	0.13	0.22	-0.44
Ca	0.30	0.34	0.29	0.25	0.27	0.04	-0.06
Mg	0.45	0.38	0.47	0.69*	0.29	-0.12	-0.16
Na	-0.01	-0.15	0.70*	0.60*	-0.18	-0.06	0.08
K	0.34	0.00	-0.14	-0.3	-0.58*	0.16	0.45
IP	-0.06	-0.31	0.07	-0.27	-0.40	-0.10	0.39
Biomasa Vegetal	0.51	0.67*	0.07	0.41	0.71*	-0.25	-0.41
Edad ¹	-0.25	0.11	0.02	0.19	0.20	0.43	-0.46

*Correlación significativo $\alpha < 0.05$

¹ La correlación con la edad de descanso fue calculada excluyendo el páramo natural.

Tabla 3. Regresiones múltiples de los parámetros de la incubación con las variables edáficas y explicativas. Datos del año 1999 (n=12).

	r^2	B ₀	B ₁	X ₁	r^2	B ₂	X ₂	r^2	B ₃	X ₃	r^2	B ₄	X ₄	r^2
No	0.88	-106.66	1.26	BM	0.83	-53.7	Mg	0.05						
Co	0.84	105.70	6.07	BM	0.73	41.92	K	0.11						
KN	0.39	0.18	0.12	arcilla	0.39									
KC	0.68	0.12	0.01	BV	0.49	-0.012	K	0.19						
%No	0.80	0.58	-1.12	Mg	0.48	0.17	arcilla	0.12	-5.87	N	0.13	0.0	BM	0.07
%Co	0.79	1.42	49.7	Na	0.49	-0.05	C/N	0.16	0.004	BM	0.07	-0.04	Ca	0.07
Co/No	0.74	0.58	0.33	arena	0.51	-9.41	N	0.1	1.09	K	0.11			

Análisis multivariado con los valores absolutos

En la tabla 4 se muestran las correlaciones de las variables edáficas y las variables explicativas con los cuatro primeros ejes de ordenamiento. El % de la varianza total explicada por los 4 ejes de ordenamiento es de 53.2%, 20%, 8.3%, y 5% respectivamente. En el primer eje se observa que las variables No, Co y Bm están fuertemente correlacionadas entre sí y con la parte positiva del primer eje. El Nt, Ct, Mg, Ca, CIC y el KC también se correlacionan positivamente con este primer eje aunque en menor grado; la relación Co/No se correlaciona negativamente con este eje. De las variables explicativas solo la biomasa vegetal presentó una correlación positiva con éste. Este primer eje está relacionado con la materia orgánica, específicamente con la actividad de los microorganismos del suelo. En el 2 eje las variables %Co, %No, KN, pH, Ca, Mg, Na, presentan una correlación positiva con éste, en el lado negativo tenemos las variables C/N, Nt, Ct, K y la CIC. Este eje pareciera estar definido por la disponibilidad de nutrientes. En la figura 2 se representan las unidades muestrales en el plano definido por los ejes 1 y 2; se observa que no hay un agrupamiento de los puntos en base al tiempo de descanso, las parcelas del páramo natural se ubican en el lado derecho del plano respondiendo a la edad y a altos valores de Bm, No, Co, CIC entre otras variables. El desplazamiento temporal de las parcelas es hacia abajo (en dirección al 2 eje) a excepción de una parcela temprana y una tardía, cuyo movimiento es hacia la derecha (en dirección al 1 eje) dirigiéndose hacia un aumento de la Bm, No, Co, etc. Este movimiento temporal pareciera estar relacionado con una disminución del pastoreo, la cual generaría un aumento de la relación C/N y una disminución del KN y de la concentración de Na.

En el eje 3 las variables Na y contenido de arena están fuertemente correlacionadas entre sí y positivamente con este eje mientras que la arcilla y el K están correlacionados entre sí y negativamente con el eje 3. Este eje pareciera estar definido por la textura y cambios de K opuestos al Na. De las variables explicativas el pastoreo se correlaciona positivamente con este eje. En la figura 3 se presenta la ubicación de las parcelas en función de estos dos ejes de ordenamiento y se observa una clara separación de puntos correspondientes a los dos años de muestreo; las parcelas muestreadas en el año 1996 se ubican en la parte superior del plano y las del año 1999 en la parte inferior. Se observa nuevamente que la trayectoria en el tiempo de las parcelas pareciera estar relacionada con una disminución del pastoreo y del Na, y un aumento de la biomasa vegetal y del K.

Las variables que se correlacionan positivamente con el eje 4 son la relación Co/No, el Co y el K, negativamente tenemos el KC y el limo. En la distribución de los puntos de muestreo de acuerdo a estos ejes (figura 4) se observa que no hay un agrupamiento en base al tiempo de descanso ni tampoco una separación de los puntos en base a las fechas de muestreo, el desplazamiento temporal que muestran las parcelas en estos dos ejes es diferente en cada una.

Tabla 4. Matriz de correlación entre las variables físico-químicas del suelo y las variables explicativas con los primeros cuatro ejes de ordenamiento obtenidos por el análisis de componentes principales utilizando los valores de los dos muestreos (n=24).

	Eje			
	1	2	3	4
No	0.97**	-0.02	0.07	0.03
Kn	0.04	0.59**	-0.27	0.09
Co	0.85**	-0.12	0.03	0.43*
Kc	0.41*	0.21	-0.04	-0.73**
%No	0.59**	0.63**	-0.07	0.01
%Co	0.14	0.85**	-0.18	0.33
Co/No	-0.59**	-0.13	-0.01	0.63**
BM	0.87**	-0.12	0.18	0.29
Ct	0.60**	-0.75**	0.14	0.13
Nt	0.68**	-0.64**	0.08	-0.02
CIC	0.66**	-0.44*	0.18	-0.19
C/N	0.10	-0.55**	0.11	0.29
pH	0.24	0.72**	-0.01	0.02
Ca	0.59**	0.43*	-0.07	0.07
Mg	0.63**	0.43*	-0.29	0.19
Na	0.11	0.46*	0.82**	0.05
K	0.01	-0.47*	-0.56**	0.47*
arena	-0.21	0.13	0.89**	0.31
arcilla	0.07	-0.01	-0.88**	0.19
limo	0.17	-0.19	-0.23	-0.69**
Variables explicativas				
Edad ¹	0.11	-0.35	0.49	-0.52
Indice de pastoreo	-0.27	0.08	0.59**	0.14
Biomasa vegetal	0.60**	-0.03	-0.39	-0.01

¹ La correlación con la edad de descanso fue calculada excluyendo el páramo natural en el análisis multivariado.

**significativo $\alpha=0.01$

*significativo $\alpha=0.05$

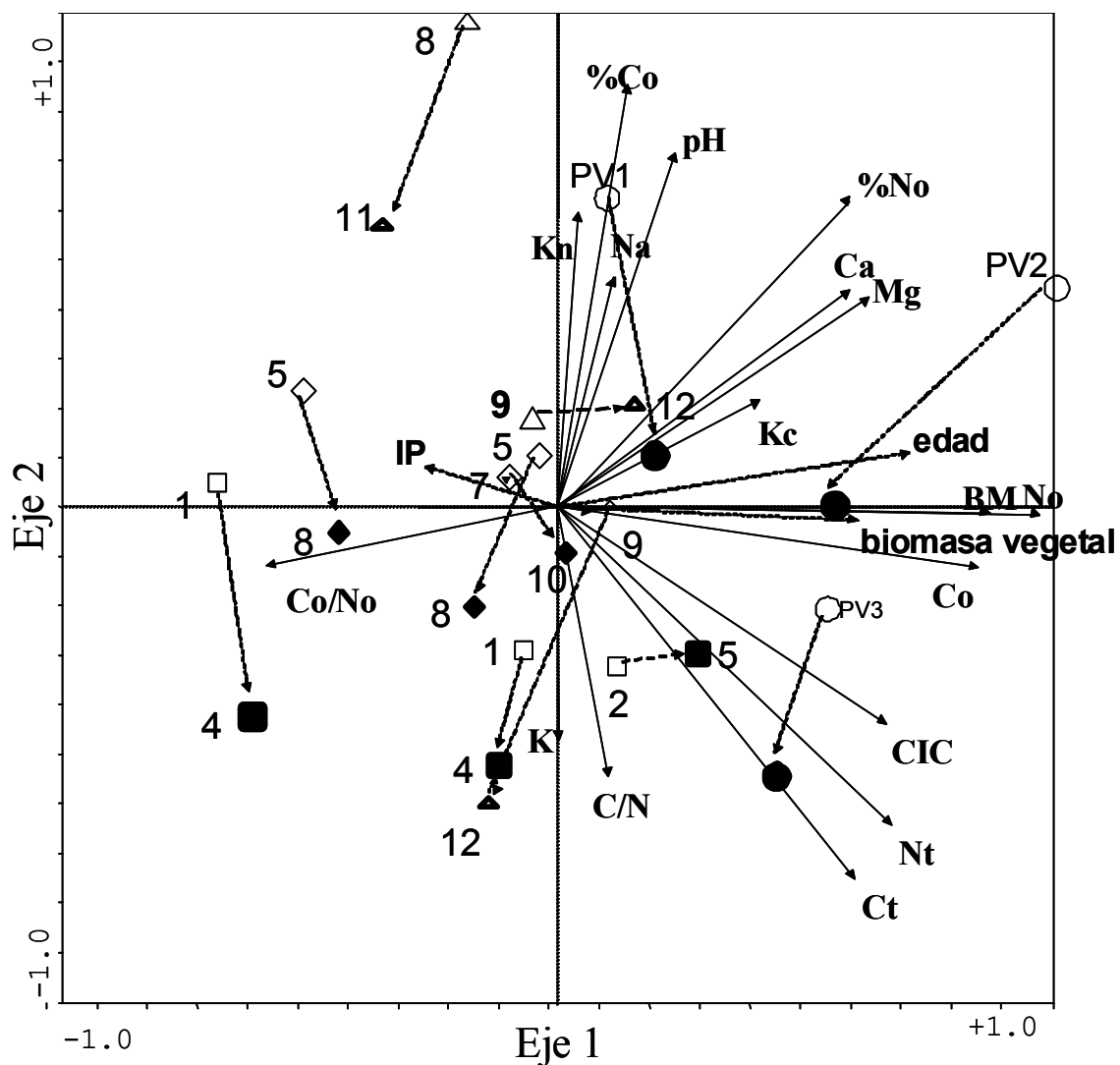


Figura 2. Ordenamiento de las parcelas (ACP) en los ejes 1 y 2. Leyenda: los círculos representan las parcelas de páramo, los cuadrados las parcelas tempranas, los diamantes las parcelas intermedias y los triángulos la parcelas tardías. Las figuras vacías representan el año 1996 y las llenas corresponden al año 1999. Las flechas punteadas señalan el desplazamiento temporal de las parcelas. El número que acompaña las figuras señalan la edad de descanso.

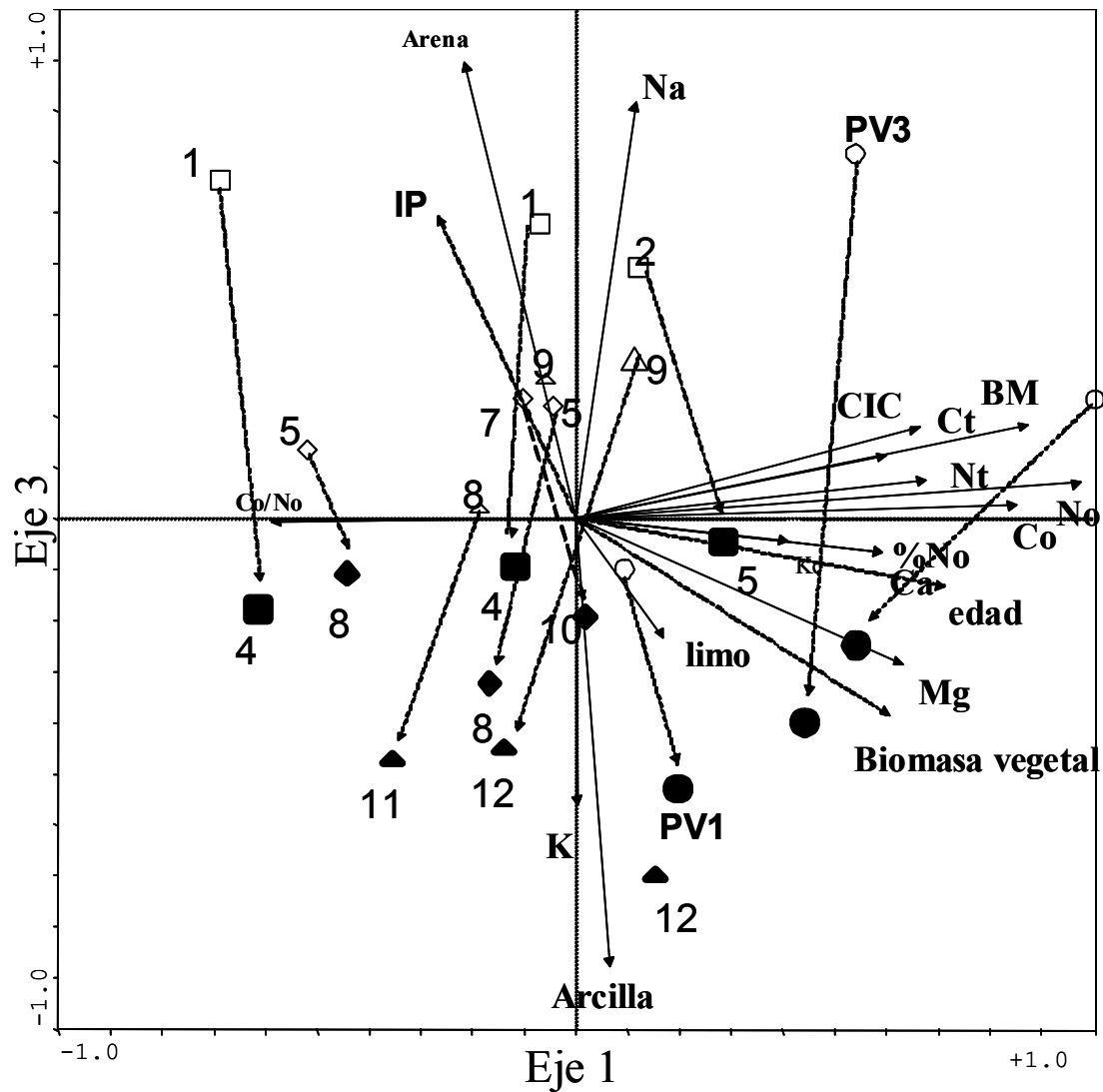


Figura 3. Ordenamiento de las parcelas (ACP) en los ejes 1 y 3. Leyenda: los círculos representan las parcelas de páramo, los cuadrados las parcelas tempranas, los diamantes las parcelas intermedias y los triángulos la parcelas tardías. Las figuras vacías representan el año 1996 y las llenas corresponden al año 1999. Las flechas punteadas señalan el desplazamiento temporal de las parcelas. El número que acompaña las figuras señalan la edad de descanso.

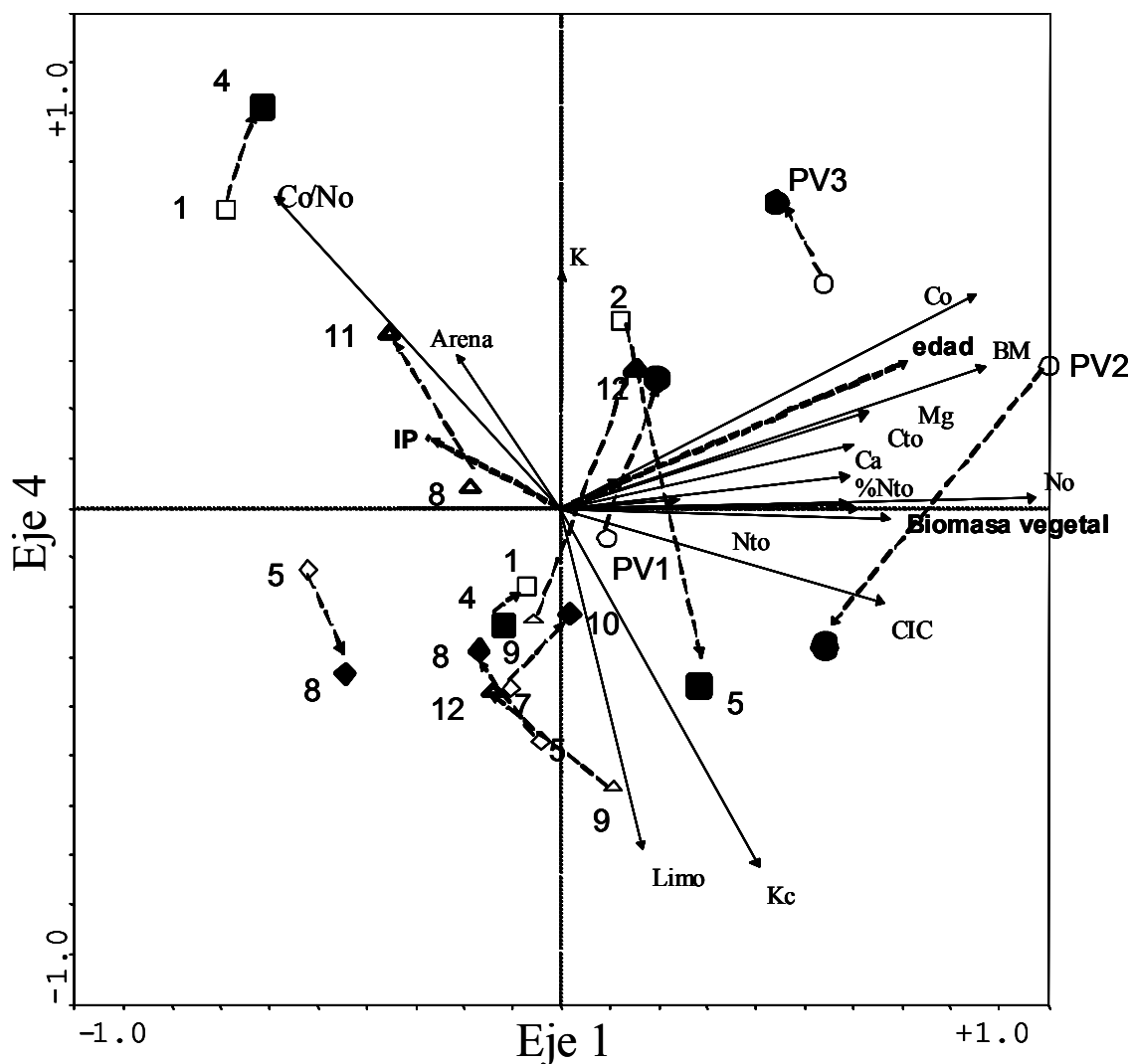


Figura 4. Ordenamiento de las parcelas (ACP) en los ejes 1 y 4. Leyenda: los círculos representan las parcelas de páramo, los cuadrados las parcelas tempranas, los diamantes las parcelas intermedias y los triángulos la parcelas tardías. Las figuras vacías representan el año 1996 y las llenas corresponden al año 1999. Las flechas punteadas señalan el desplazamiento temporal de las parcelas. El número que acompaña las figuras señalan la edad de descanso.

DELTAS

El análisis de regresión simple de los deltas (Tabla 5), indicó que la variación del Co está asociada con la variación de los deltas de las bases Ca, Na y el pH. El análisis de regresión múltiple (tabla 6) señaló que la variación del No se relaciona con la variación del Ca y del K, este último en sentido negativo.

El delta de Co presenta correlación con las variaciones de la CIC, Ca, Mg y la variable explicativa biomasa vegetal (en sentido negativo). El análisis de regresión múltiple señaló los deltas de la biomasa vegetal y del Ca como las variables significativas.

El delta del %No presentó correlación positiva con la variación del Mg. El análisis múltiple señaló a los deltas del Mg y la arcilla, en sentido negativo, como variables significativas (tabla 6).

El delta del % Co presenta correlación con el Ca. El análisis múltiple señaló a los deltas del Ca, el contenido de arena y arcilla como variables significativas.

El delta del KN resultó significativamente correlacionado en sentido negativo con la relación C/N (tabla 5). El análisis de regresión múltiple señaló como variables significativas los deltas de la relación C/N, el índice de pastoreo, el C total y el N total, en sentido negativo.

El delta del KC no fue significativo con ninguno de los parámetros evaluados. La variación de Co/No está correlacionada con el delta de la CIC. El análisis de regresión múltiple señaló como significativas a los deltas de las variables: CIC y el Na en sentido negativo (tabla 6).

Tabla 5. Correlación entre los deltas de los parámetros de la incubación, los parámetros edáficos y las variables explicativas Índice de pastoreo (IP), biomasa vegetal. Datos del 1999-1996 (n=12)

	ΔCO	ΔNO	$\Delta\%\text{Co}$	$\Delta\%\text{No}$	ΔKC	ΔKN	$\Delta\text{Co/No}$
ΔBM	0.29	0.55	0.29	0.34	-0.36	0.21	-0.37
ΔC	0.13	-0.13	-0.43	-0.16	-0.48	-0.10	0.35
ΔN	0.21	0.31	0.16	-0.37	0.04	0.56	0.13
$\Delta\text{C/N}$	-0.12	-0.28	-0.52	0.27	-0.35	-0.67*	0.04
ΔpH	0.17	0.58*	-0.01	0.35	0.57	0.18	-0.31
ΔCIC	0.67*	0.18	0.39	-0.05	-0.53	-0.01	0.67*
Δca	0.72*	0.69*	0.60*	0.52	-0.15	0.30	0.13
ΔMg	0.60*	0.45	0.32	0.69*	-0.37	-0.28	0.11
Δna	0.28	0.68*	0.13	0.47	-0.30	0.15	-0.47
ΔK	0.31	-0.22	0.34	-0.14	-0.18	0.31	0.55
ΔIP	0.30	0.41	0.15	0.57	0.22	-0.15	0.00
$\Delta\text{Biomasa Vegetal}$	-0.75*	-0.34	-0.50	-0.05	0.28	-0.27	-0.43

*Correlación significativa $\alpha < 0.05$

Tabla 6. Regresiones múltiples de los deltas de los parámetros de incubación con las variables edáficas y explicativas: Índice de pastoreo (IP) y biomasa vegetal (BV). Datos del año 1999-1996 (n=12).

	r^2	B0	B1	X1	r^2	B2	X2	r^2	B3	X3	r^2
No	0.83	12.79	3.53	Ca	0.47	-7.14	K	0.36			
Co	0.64	-1260.0	-0.20	BV	0.56	11.2	Ca	0.08			
KN	0.82	1.50	-0.14	C/N	0.45	-3.32	IP	0.15	-91.24	N	0.14
KC	0.64	-0.06	0.09	pH	0.32	-0.67	Na	0.32			
%No	0.70	0.34	1.53	Mg	0.48	-0.12	arcilla	0.22			
%Co	0.76	-0.38	0.03	Ca	0.36	-0.04	arena	0.20	0.02	arcilla	0.20
Co/No	0.80	-12.80	0.07	CIC	0.45	-144.87	Na	0.35			

Análisis multivariado de los deltas

Al realizar un ACP con los deltas se tiene que el % de la varianza total explicada por los 4 primeros ejes es de 24.5%, 22.1%, 16.5% y 11.7%. Los deltas de las variables Co, No, %Co, Ca, Mg, y CIC están fuertemente correlacionados entre sí y presentan a su vez una correlación negativa con el primer eje de ordenamiento (tabla 7). Esto estaría indicando un cambio positivo de estas variables, en el lapso evaluado, hacia el lado izquierdo de este primer eje y nos muestra que al aumentar o disminuir el Co y el No, también lo hacen estas variables edáficas. De las variables explicativas el delta de la biomasa vegetal se correlaciona positivamente con este eje lo que indica que cuando aumenta la biomasa vegetal disminuye el Co y No. En el eje 2, el Δ pH, y los deltas del Na y %No muestran una correlación positiva con este eje; como variables opuestas tenemos Δ Co/No, Δ K y el Δ del contenido de arcilla. De las variables explicativas el pastoreo presenta la correlación más alta pero no es significativa. Este 2 eje pudiera estar relacionado con el pastoreo asociado con el Na, es decir que el aumento del pastoreo pareciera ocasionar un aumento del Na y una disminución del K, opuesto al delta del índice de pastoreo está el delta de la biomasa vegetal lo que indica que al aumentar el pastoreo disminuye la biomasa vegetal. En la ubicación de las parcelas en el plano de ordenamiento (figura 5) en los ejes 1 y 2, no se observa un agrupamiento de puntos en base al tiempo de descanso; la parte izquierda del plano como lo mencionamos anteriormente indica un incremento de las variables relacionadas con la posible recuperación de la fertilidad del suelo (CIC, Co, No, Ca, Mg, BM) por lo que la disposición de los puntos de muestreo en estos dos ejes pudiera estar indicándonos posibles “niveles” de recuperación del suelo. Es así

como la parcela más recuperada es la tardía 2 mientras que el páramo virgen 2 habría perdido fertilidad en el intervalo estudiado ya que se encuentra en un sitio caracterizado por disminuciones de la Bm, No, Co, C, N, con un gran incremento de la biomasa vegetal.

El delta de la relación C/N y del Mg presentan una correlación positiva con el tercer eje y como variables opuestas están los deltas de KC y KN, es decir que este eje se relaciona con cambios en las tasas de mineralización. El cambio en el contenido de arcilla se correlaciona positivamente con el eje 4 y como variable opuesta está el delta del N total. En el ordenamiento de las parcelas en función de estos ejes se observa el mismo comportamiento en relación a los posibles “niveles de recuperación” mencionados anteriormente (datos no presentados). Un “nivel alto” de recuperación donde se ubica la parcela tardía 2, un “nivel bajo” donde se ubica la parcela correspondiente al páramo 2 y un “nivel intermedio” donde se ubicarían el resto de las parcelas.

Tabla 7. Correlación entre las diferencias (DELTAS) de las variables físico-químicas y las variables explicativas: biomasa vegetal e índice de pastoreo. El delta se calculó como la diferencia entre 1999-1996, (n=12).

	Eje			
	1	2	3	4
Δ No	-0.73**	0.58	-0.08	-0.12
Δ KN	-0.35	-0.18	-0.74**	-0.14
Δ Co	-0.87**	-0.27	0.09	-0.09
Δ KC	0.34	0.41	-0.58*	0.36
Δ %No	-0.41	0.66*	0.35	0.42
Δ %Co	-0.75**	-0.28	-0.37	0.18
Δ Co/No	-0.20	-0.84**	0.11	0.02
Δ BM	-0.56	0.42	-0.00	-0.29
Δ C	-0.05	-0.16	0.53	-0.47
Δ N	-0.29	-0.06	-0.56	-0.63*
Δ CIC	-0.64*	-0.44	0.21	-0.07
Δ C/N	0.23	0.08	0.91**	0.15
Δ pH	-0.26	0.65*	-0.22	-0.02
Δ Ca	-0.86**	0.05	0.02	0.21
Δ Mg	-0.66**	0.08	0.62*	0.35
Δ Na	-0.57	0.61*	0.12	-0.34
Δ K	-0.30	-0.67*	-0.01	0.41
Δ arena	0.25	0.56	0.30	-0.55
Δ Limo	-0.06	-0.74**	0.08	-0.29
Δ arcilla	-0.02	0.28	-0.32	0.62
Δ Biomasa vegetal	0.65*	0.21	-0.08	0.04
Δ Índice de pastoreo	-0.29	0.19	0.22	0.44

**significativo $\alpha=0.01$

*significativo $\alpha=0.05$

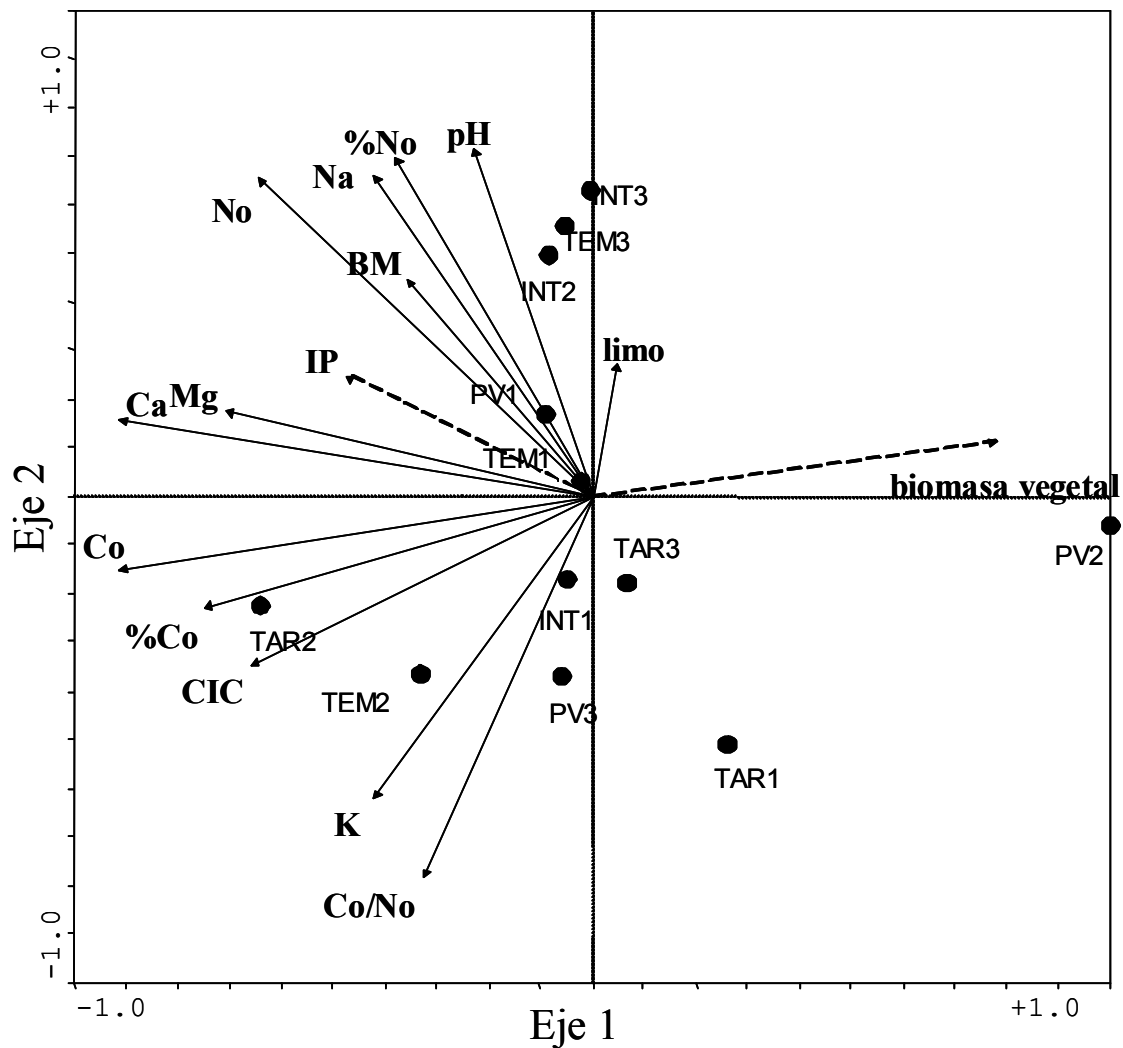


Figura 5. Diagrama de ordenación del análisis de componentes principales (ACP) centrado y estandarizado de las 12 parcelas en función de los deltas de las características físico-químicas y las variables explicativas: Pastoreo y biomasa vegetal.

DISCUSION

La proporción del C nativo del suelo mineralizado durante la incubación (0.5-1.3%) fue algo más bajo que los valores (1.3-1.5%) reportados por Sarmiento y Bottner (2002) en dos parcelas de la misma área. El N potencialmente mineralizable estimado fue bajo (1.3 - 3.9%) en comparación a lo obtenido por Sarmiento y Bottner (2002), quienes reportan valores entre 3 y 9% del N total y los consideran como bajos. Stanford y Smith (1972) trabajando con diferentes suelos reportan valores entre 10 a 15% del N total del suelo. Estos resultados estarían corroborando la hipótesis planteada de una alta estabilidad de la materia orgánica asociada con bajas tasas de mineralización, lo cual pudiera ser una de las causas de la baja fertilidad intrínseca en estos suelos.

El análisis sincrónico no detectó cambios en el No y Co ni en ninguno de los otros parámetros de la incubación. El análisis diacrónico tampoco permitió detectar cambios significativos del Co y No en la sucesión. Solamente se detectaron diferencias significativas entre ambos muestreos en las parcelas intermedias y tardías en el KC, %No y %Co en las parcelas tempranas y en el páramo, en estos casos no se observó un aumento sino una disminución de los valores en el año 1999 en comparación con el año 1996. El hecho de no haberse logrado visualizar un aumento sucesional de estas fracciones lábiles usando estos dos enfoques no permite concluir definitivamente que este no ocurra, ya que diversos factores pudieran estar enmascarando la detección de un incremento de estas variables. Por ejemplo la diferencia en el clima entre los dos años de muestreo representada por la precipitación pudiera ser uno de estos factores. Para verificar esta

posibilidad se analizaron los datos de precipitación mensual de los dos años de muestreo y se observó en el mes anterior al muestreo la precipitación fue mayor en el año 1996 (220 mm) en comparación al año 1999 (112 mm), con una diferencia de 108 mm (Smith, comunicación personal). Esta diferencia en la precipitación pudiera tener algún efecto sobre las variables evaluadas y por lo tanto debería ser tomada en cuenta como uno de los posibles factores cuya influencia pudiera ser mayor que la variabilidad debida al tiempo sucesional. Esta variabilidad climática pudiera ser una de las causas de la aparente disminución encontrada en el %del Co y %No en el páramo natural, donde no hubo influencia de las actividades agrícolas. Otros factores que pudieran estar dificultando el análisis diacrónico pudieran ser: 1) la historia de uso de la parcela representada principalmente por la presencia e intensidad del pastoreo, la cual fue diferente en cada parcela y en cada fecha de muestreo; 2) La variabilidad dentro de las parcelas, el análisis diacrónico permite eliminar el problema de la heterogeneidad entre parcelas, pero la variabilidad interna puede ser muy alta y en consecuencia los 10 puntos de muestreo pueden no ser representativos del total de la parcela. No se pudo comprobar la hipótesis planteada por Sarmiento y Bottner (2002) de un aumento sucesional del Co y No. Como se mencionó anteriormente estos autores trabajaron en 2 parcelas adyacentes con una diferencia de edad entre las mismas de 14 años de descanso, en nuestro caso la edad máxima de las parcelas era de 12 años y además el número de parcelas analizadas fue mayor, incrementándose con esto la variabilidad. Si bien los resultados obtenidos no nos permiten descartar completamente la hipótesis de un aumento sucesional del Co y del No, podemos concluir que los

cambios en estas dos variables, no son detectables ni con el método sincrónico ni con el diacrónico. Al utilizar el análisis sincrónico la variabilidad espacial supera en magnitud el posible incremento sucesional de esta variable. Como conclusión general desde un punto de vista teórico se puede decir que sólo son detectables cambios sucesionales en variables cuya heterogeneidad espacial sea menor que su tasa de incremento sucesional y este no es el caso del Co y el No. Por otra parte no se presentó un cambio direccional consistente en el intervalo de 3 años utilizado para el análisis diacrónico. Puede entonces afirmarse que sólo son detectables cambios diacrónicos en variables cuya respuesta al tiempo sea mayor que su respuesta a otras características (manejo, clima) que también varían en el intervalo estudiado. Por lo tanto ninguno de estos dos parámetros puede considerarse sensible al tiempo sucesional en la matriz de variabilidad espacio-temporal presente en el valle de estudio.

Los resultados obtenidos nos permitieron también analizar que otros factores, además del tiempo sucesional, pudieran tener una influencia sobre el No y el Co. En este sentido, ambas variables resultaron estar altamente relacionadas con la biomasa microbiana, lo cual verifica que la biomasa microbiana es crucial en determinar la cantidad de No y Co bien sea porque ésta es un compartimiento lábil de la materia orgánica del suelo y además de ser el agente transformador de la misma. Resultados similares han sido obtenidos por Álvarez y Álvarez (2000), en ensayos de incubación con 28 parcelas bajo distintos tipos de manejo en Argentina, estos autores reportan una alta correlación entre el Co y la BM. Las regresiones múltiples del Co y No señalaron a los contenidos de Ca, Mg y Na como variables significativas lo cual pudiera indicar un aumento en la

mineralización a medida que aumenta la disponibilidad de nutrientes. Un aspecto interesante es que el Co y el No no representan un porcentaje fijo de la cantidad de C y N presentes en el suelo, sino que el porcentaje que se mineraliza depende de la biomasa microbiana y de algunas bases como Ca, Mg y Na, esto significa que la determinación del N total del suelo no indica la disponibilidad del mismo para las plantas, siendo necesario elaborar un índice más complejo de fertilidad, que incluya la BM.

El análisis de los cambios ocurridos en el intervalo de estudio de las variables (deltas) nos permite observar con más detalle cuales variables cambian simultáneamente. En términos generales, se obtuvo que la variación tanto del Co como del No están relacionados con cambios de la MOS y las variables relacionadas con este compartimiento como la CIC, disponibilidad de nutrientes (indicado por el aumento de algunas bases como Ca y Mg), aumentos en el pH que favorecerían la actividad microbiana y con el C y N total del suelo. Con respecto a la variación del KC el análisis indicó que está asociada negativamente con la relación C/N, es decir que a medida que se incrementa la relación C/N disminuye la tasa de liberación del C (KN) debido tal vez a una competencia por los nutrientes entre las plantas y los microorganismos del suelo.

En el análisis multivariado de los valores absolutos no se observó un agrupamiento de las parcelas en base al tiempo de descanso lo que confirma que no hay cambios sucesionales de ninguna de las variables edáficas analizadas; lo que si se observó fue un desplazamiento en el intervalo entre 1996 y 1999 de las parcelas en dirección al segundo y tercer eje de variación, los cuales están relacionados positivamente con la biomasa vegetal y en sentido contrario con el

pastoreo, por lo cual pareciera que ocurrió un aumento de la biomasa vegetal y por ende una posible disminución del pastoreo en el intervalo de tiempo evaluado. De las variables explicativas la biomasa vegetal aparece asociada con el Co y el No, lo cual pudiera estar ligado con la relación que tiene la vegetación como fuente de carbono para el suelo a partir del proceso de mortalidad. Esto refuerza lo señalado por algunos autores sobre el papel energético que tiene la vegetación en el sistema y que presenta además un claro incremento sucesional (Llambí y Sarmiento, 1998; Pestalozzi, 2001). Otra variable explicativa, el pastoreo, presentó una aparente relación con el contenido de Na y opuesto al contenido de K. Una posible explicación de porqué el pastoreo contribuiría a la disminución del K pudiera estar dada porque el mantenimiento de los niveles del K en el suelo está relacionado con el manejo o la presencia de los restos de vegetación, si estos se retiran se produce una pérdida sustancial del K, con el pastoreo disminuye parte de la vegetación pudiendo esto incidir en el descenso del contenido de K. Paniagua *et al.*, (1999) en un trabajo realizado en suelos de una cuenca en Honduras, donde encontraron que los valores más altos de K correspondían a parcelas con estadios sucesionales intermedios (asociaciones de leñosas) y en el bosque secundario, y lo atribuyen a una probable transferencia de nutrientes a través de las raíces desde las capas más profundas a las capas más superficiales del suelo. Por otra parte, el K aparece asociado con la arcilla por presentar una mayor adsorción, lo que en algunos casos puede representar una reserva importante de este elemento en el suelo. En el caso del Na parece estar relacionado con la arena por presentar una adsorción más débil, debido a que posee mayor grado de hidratación y está más propenso a pérdidas por lavado.

En el análisis de los deltas, se observa una aparente asociación entre el aumento del pastoreo y el aumento de algunos parámetros edáficos (pH, Ca, Mg, Na Co, No, BM) cuyos incrementos pudieran estar indicando una posible recuperación del suelo por efecto del pastoreo. En contraste el pastoreo aparece asociado con disminuciones de la relación C/N y de la biomasa vegetal. La disminución de la relación C/N con el pastoreo pudiera estar dada por el estiércol y orinas dejado en el suelo por los animales y el hecho de que estos materiales son ricos en N; en el caso contrario, sin pastoreo, aumentaría la relación C/N debido a que los tejidos secos de la biomasa vegetal (necromasa) se mantienen en el sistema siendo un material rico en carbono. La tasa de mineralización del N (KN) presenta un aumento con el pastoreo por un lado y por otro una correlación negativa con la relación C/N, esto nos podría estar indicando la presencia de N que puede ser liberado; en el caso contrario, sin pastoreo, el aumento de la relación C/N incide en la disminución de KN. Como es de esperarse el pastoreo aparece opuesto a la biomasa vegetal.

El efecto del pastoreo ha sido evaluado por diversos autores en una amplia gama de sistemas, se ha mencionado su efecto positivo en el aporte de N y P orgánico así como también su influencia en la composición de las especies vegetales. Hofstede (1995), señala un aumento del N total en los 10 primeros centímetros del suelo, en parcelas pastoreadas en un páramo colombiano. Schuman *et al.* (1999) reportan un cambio en la redistribución y ciclaje del N y C donde estos se encontraron principalmente en los primeros 30 cm del suelo, representando una gran oportunidad en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. En el páramo de Gavidia se han realizado algunos trabajos de campo evaluando el efecto del

pastoreo sobre la fertilidad (Sarmiento, datos sin publicar), consideramos importante dar a conocer los resultados de estas experiencias para tener más información sobre el efecto de esta práctica en el restablecimiento de la fertilidad de los suelos en estos agroecosistemas.

Al igual que en trabajos anteriores (Sarmiento, 1995; Aranguren y Monasterio, 1997; Llambí y Sarmiento, 1998; Sarmiento y Bottner, 2002; Abadín *et al.*, 2002), en el presente trabajo no se lograron detectar cambios sucesionales en las variables edáficas analizadas que pudieran relacionarse con la recuperación del suelo durante el descanso. En nuestro caso, aún complementando el análisis con un enfoque diacrónico y con la exploración de estas fracciones lábiles de la materia orgánica del suelo (Co y No), no logramos captar cambios edáficos que indicaran un posible restablecimiento de la fertilidad.

En otras sucesiones secundarias de montaña si se han encontrado variaciones significativas en otra fracción lábil de la materia orgánica, como lo es la biomasa microbiana del suelo pero en intervalos de tiempo mayores al utilizado en el presente trabajo (Jaimes, 2000; Sarmiento y Bottner, 2002). El No y Co han sido señalados por diversos autores como buenos indicadores de los cambios edáficos, pero como lo señala Carter (2002), la validez de estos parámetros está influenciada por las limitaciones climáticas, pudiendo ser este nuestro caso donde la influencia de la variabilidad climática sumado a la heterogeneidad espacial puede haber contribuido a no encontrar tendencias sucesionales claras.

También se observó que uno de los factores edáficos que conlleva hacia una posible ruta de la recuperación del suelo, es la materia orgánica, representada por el No, Co y la Bm, y ésta está ligada a la disponibilidad de nutrientes representada

por el aumento de algunas bases cambiables. El manejo adecuado de la MOS ha sido señalado como un factor importante a tomar en cuenta en el “sostenimiento” de la fertilidad en los agroecosistemas (Paniagua *et al.*, 1999; Sarmiento y Bottner, 2002), razón por la cual resulta vital el manejo adecuado de este compartimiento para el mantenimiento de la fertilidad tomando en cuenta las condiciones naturales de los sistemas del área de estudio, principalmente las bajas temperaturas y su influencia en la acumulación de la MOS. Finalmente pensamos que sería importante considerar el efecto del pastoreo como un factor influyente en la recuperación de la fertilidad del suelo en estos agroecosistemas de páramo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto TROPANDES (Unión Europea, programa INCO-DC, contrato número ERBIC18CT98-0263). Expresamos nuestro agradecimiento al CDCHT (proyecto C-1071-01-01-EM) y a Postgrados Integrados en Ecología (FONACIT) por el financiamiento otorgado. Queremos agradecer muy especialmente la colaboración de Zulay Méndez en los análisis químicos y la participación en el trabajo de campo de Nelson Márquez, Auxiliadora Olivo y el Sr. Bernabé Torres. Así mismo dejamos constancia de nuestro agradecimiento a Maximina Monasterio, coordinadora del proyecto TROPANDES en Venezuela. También queremos agradecerle al laboratorio de Suelos de Geografía de la Universidad de Los Andes (ULA), por los análisis realizados y finalmente expresamos un agradecimiento especial a la comunidad de Gavidia.

BIBLIOGRAFIA

- Abadín, J. González-Prieto, S. J. Sarmiento, L. Villar, M. C. y T. Carballas. 2002. Successional dynamics of soil characteristics in a long fallow agricultural system of the high tropical Andes. *Soil Biology and Biochemistry* 34(11): 1739-1748.
- Allison, F. 1973. *Soil organic matter and its role in crop production*. Elsevier Science Publishing Co., Amsterdam.

- Alvarez, R. y C. Alvarez. 2000. Soil organic matter pools and their associations with Carbon mineralization kinetics. *Soil Science Society of America Journal* 64: 184-189.
- Aranguren, A. y M. Monasterio. 1997. Aspectos de la Dinámica del nitrógeno de parcelas con diferentes tiempos de descanso en el Páramo de Gavidia (Andes Venezolanos). En: Liberman, M. y C. Baied. (Eds). *Desarrollo sostenible de ecosistema de montañas: Manejo de Áreas Frágiles en los Andes*. UNU-PL-880. Pp 171-179.
- Brookes, P.C. Landman, A. Pruden, G. y D.S. Jenkinson. 1985. Chloroform fumigation and release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen of soil. *Soil Biology and Biochemistry* 17 (6): 837-842.
- Campbell, C.A. Ellert B.H. y Y. W. Jame. 1993. Nitrogen mineralization potential in soils. P.341-349. In M.R. Carter (ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publ., Boca Raton.FL.
- Carter, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal* 94:38-47.
- Curtin, D. y G. Wen. 1999. Organic matter fractions contributing to soil nitrogen mineralization potential. *Soil Science Society American Journal* 63: 410-415.
- Ferwerda, W. 1987. The influence of potato cultivation on the natural bunchgrass paramo in the colombian Cordillera Oriental. Internar report no. 220. Hugo de Vries Laboratory, Department of Palynology and Palaeo/Actuo-Ecology, University of Amsterdam, Amsterdam. 83 pp.
- Hervé, D. 1994. Desarrollo sostenible en los Andes Altos: los sistemas de cultivo con descanso largo pastoreado. En: Hervé, D. Genin, D. y G. Riviere. (Eds). *Dinámica del descanso de la tierra en los Andes*. IBTA-ORSTOM. La Paz pgs 15-36.
- Jaimes, V. 2000. Estudio ecológico de una sucesión secundaria y mecanismos de recuperación de la fertilidad en un ecosistema de páramo. Tesis de Maestría. Postgrado en Ecología Tropical. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Keeney, D.R. y D.W. Nelson. 1982. Nitrogen-inorganic forms. In: Page, A.L. Miller, R.H. y D.R. Keeney (Eds). *Method of soil analysis Part 2*. 2nd Edition. *Agronomy* 9:635-698.
- Llambí, L.D. 1997. Recuperación de la fertilidad en una sucesión secundaria en el páramo: Biomasa microbiana y ciclaje de nitrógeno. Tesis de Licenciatura. Universidad Simón Bolívar. 116 pp.
- Llambí, L. D. y L. Sarmiento. 1998. Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria de los páramos venezolanos. *Ecotrópicos* 11(1): 1-14.
- Paniagua, A. Kammerbauer, J. Avedillo M. y M. Andrews. 1999. Relationship of soil characteristics to vegetation successions on a sequence of

- degrade and rehabilitated soils in Honduras. *Agriculture Ecosystems and Environment* (72): 215-225.
- Pestalozzi, H. 2000. Sectoral fallow systems and the management of soil fertility: the rationality of indigenous knowledge in the high Andes of Bolivia. *Mountain Research and Development* 30(1):64-71.
- Sarmiento, L. 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Tesis de Doctorado. Universidad de Paris XI. 237 p.
- Sarmiento, L. y Monasterio, M. 1993. Elementos para la interpretación ecológica de un sistema agrícola campesino de los páramos venezolanos. En: Rabey, M. (Ed.). *El uso tradicional de los recursos en montañas: tradición y transformación*. UNESCO-ORCYT. Montevideo, Uruguay.
- Sarmiento, L. Monasterio, M. y Montilla, M. 1993. Ecological bases, sustainability, and current trends in traditional agriculture in the Venezuelan high Andes. *Mountain Research and Development* 13 (2):167-176.
- 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. *Applied Soil Ecology* 19(1):79-89.
- Sarmiento, L. Llambí, L.D. Escalona, A. y J. Márquez. 2003. Vegetation patterns, regeneration rates and divergence in an old-field succession of the high tropical Andes. *Plant Ecology* 166: 63-74.
- Sarmiento, L. 2004. Effect of grazing on plant richness and vegetation structure in an old-field succession of the Venezuelan paramos. In: Körner, C y E. Spehn (Eds).: *Linking mountain diversity with fire, grazing and erosion*. En prensa.
- Schmitz, M. F. Yuste, P. Bermúdez, F. y F.D. Pineda. 1989. Microorganisms of carbon and nitrogen cycles variation during succession in a Mediterranean pasture. *Review in Ecology and Biology of Soils* 26 (4):371-389.
- Schuman, G. Reeder, J. Manley, J. Hart, R. y W. Manley. 1999. Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland. *Ecological Applications* 9(1): 65-71.
- Smith, J. 1995. Die Auswirkungen der Intensivierung des Ackerbaus im Páramo de Gavidia- Landnutzungswandel an der oberen Anbaugrenze in den venezolanischen Anden. Diplomarbeit. Instituto de Geografía. Universidad de Bonn.
- Stanford, G. y J.O. Legg. 1968. Correlation of soil N availability indexes with N uptake by plants. *Soil Science* 105 (5): 320-326.
- Stanford, G. y S. J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc* 36:465-472.

DISCUSION GENERAL Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos tanto en la fase de cultivo como en la de descanso nos permiten comprender mejor algunos de los procesos que rigen la disponibilidad de nitrógeno en los suelos parameros y plantear nuevas interrogantes para la continuación de las investigaciones en este campo.

Durante la fase de cultivo, la evaluación de la dinámica del N en el primer año de producción después del descanso permitió determinar que las pérdidas gaseosas del fertilizante aplicado (denitrificación+volatilización) son aparentemente considerables mientras que la salida del N por lixiviación es aparentemente baja. Considerando que una fracción importante del N aplicado permanece en el suelo al final del ciclo de cultivo, la evaluación de un nuevo ciclo permitiría conocer el destino final del N aplicado por fertilización y los procesos que actúan en la dinámica del N, pudiendo así afirmarse con una mayor precisión la manera como se pierde el fertilizante aplicado y así sugerir recomendaciones para lograr un mejor aprovechamiento de este recurso y minimizar el impacto del mismo en los agroecosistemas y sistemas de la zona de estudio. Tomando en cuenta el valor que tienen los páramos en el ciclo hidrológico es de vital importancia manejar esta información para evitar posibles efectos de contaminación de los fertilizantes residuales sobre los cuerpos de agua de los páramos.

Se puso también en evidencia la importancia de la fertilización en una mayor producción, mayor absorción del N nativo del suelo y una mayor recuperación de las plantas del efecto de las heladas. La fertilización estimuló la biomasa microbiana del suelo observándose un posible rol protector de los microorganismos, quienes al inmovilizar parte del N agregado por fertilización

durante las primeras fases de desarrollo del cultivo, lo protegen de posibles pérdidas. Posteriormente durante la fase de llenado de tubérculos, la biomasa microbiana disminuye y el nitrógeno inmovilizado es nuevamente mineralizado. Otro aspecto importante del balance de nitrógeno durante el cultivo es la baja eficiencia en el uso del fertilizante, la cual puede estar ligada a algunos factores como el impacto de la helada ocurrida, el uso de semilla no certificada y el hecho de realizar una sola aplicación del fertilizante. Sin embargo, aunque un porcentaje muy bajo del N del fertilizante es absorbido por el cultivo, éste representa la principal fuente de nitrógeno, ya que la absorción del N nativo equivale únicamente al 30% del total utilizado. La baja absorción del N nativo en la parcela fertilizada y la baja producción en la parcela control, ponen en evidencia la poca disponibilidad del N nativo del suelo, pese a que las cantidades de nitrógeno orgánico contenidas en el mismo son considerables. Este aspecto puesto en evidencia gracias al uso de trazadores isotópicos, es analizado durante los periodos de descanso, donde se estudió la variación sucesional del nitrógeno potencialmente disponible y los factores que lo regulan.

Un último aspecto a mencionar concerniente al ciclado del nitrógeno durante el periodo de cultivo es que un porcentaje relativamente grande del fertilizante agregado se encuentra en formas orgánicas al momento de la cosecha (13%). Esta fracción del nitrógeno agregado, que experimenta un proceso de "organización", probablemente pasa a formas más estables y menos susceptibles de perderse tanto por vía gaseosa como por lixiviación. La pregunta que se plantea es cual sería la disponibilidad de esta fracción para cultivos posteriores. Podemos observar como el uso de trazadores permite obtener una información

muy detallada y valiosa sobre el destino del fertilizante agregado y las posibles causas de su baja utilización por los cultivos. Dada la importancia del tema para la agricultura en estos ambientes y la ocurrencia de una helada severa, que afectó el desarrollo del cultivo, proponemos que se realicen otras experiencias de este tipo en la zona de estudio.

La información aportada por este estudio no nos permite determinar las causas de la pérdida de la fertilidad durante el periodo de cultivo pero nos da una idea de cómo pudiera ocurrir ésta disminución. Tomando en cuenta que tenemos un agroecosistema con una fuerte dependencia del N agregado por fertilización y que a pesar del uso de estos fertilizantes minerales los rendimientos en el tiempo disminuyen se pudiera decir que a medida que transcurren los ciclos de cultivo el suelo, al parecer, va perdiendo la capacidad de retención del N del fertilizante por lo que se podría esperar, a forma de hipótesis que las pérdidas del N se vayan también incrementando en cultivo posteriores. Esto evidencia el papel crucial que juega la vegetación sucesional que es incorporada al suelo en el primer ciclo de cultivo, en el aporte de N para las plantas. Este aporte también disminuye en el tiempo explicando en parte la obtención de rendimientos significativos en el primer ciclo de producción.

Durante la fase de descanso nuestros resultados no permitieron identificar ninguna tendencia sucesional clara en 12 años de descanso para ninguna de las características físico-químicas evaluadas, a excepción del pH y del contenido de Mg que mostraron un aparente aumento sucesional. Esto coincide con lo reportado por otros autores en el páramo de Gavidia (Sarmiento y Monasterio, 1993; Aranguren y Monasterio, 1997; Llambí y Sarmiento, 1998; Abadín *et al.*,

2002), confirmándose nuevamente que la recuperación de la fertilidad en estos ecosistemas de montaña no parece estar asociada con el aumento en el tiempo de las principales variables edáficas. Por lo que la recuperación de la fertilidad pareciera estar asociada con la distribución de nutrientes en otros compartimientos del sistema como por ejemplo la vegetación (Montilla, 1993; Llambí y Sarmiento, 1998; Jaimes, 2000)

El efecto de la alta heterogeneidad espacial no logró eliminarse con la combinación de los enfoques sincrónico y diacrónico. En base a nuestros resultados se puede concluir que el N-BM, el N y C potencialmente mineralizables no son indicadores sensibles en estas condiciones de alta variabilidad. Es importante destacar la influencia del clima sobre las variables biológicas consideradas que sumada a la variabilidad espacial pudo haber contribuido a enmascarar alguna tendencia.

Como lo mencionamos anteriormente no se detectaron diferencias significativas de la biomasa microbiana entre 0 a 12 años de descanso, contradiciendo la hipótesis de un aumento sucesional de este compartimiento como posible explicación de la recuperación de la fertilidad. Al igual que los resultados reportados por Llambí y Sarmiento (1998) la biomasa microbiana en el páramo natural fue significativamente mayor en comparación a las parcelas en descanso, estos autores señalan que esta disminución pudiera ser un buen indicador de la perturbación agrícola en estos sistemas agrícolas tradicionales.

No se detectó un aumento sucesional del N y C potencialmente mineralizables por lo que no se pudo comprobar la hipótesis planteada por Sarmiento y Bottner (2002) de un incremento en el tiempo de estas variables. Por otra parte se

corroboró la hipótesis de que las tasas de mineralización de los suelos del páramo son muy bajas y de que esto pudiera ser una de las causas de la baja fertilidad intrínseca de estos suelos. La alta correlación encontrada entre la Bm con el No y Co confirman que la biomasa microbiana representa en si misma un reservorio de C y N potencialmente mineralizables.

Los cambios temporales observados en las parcelas mediante el análisis diacrónico, parecieran asociarse con una disminución en la intensidad del pastoreo. Este resultado que se evidencia en el análisis multivariado, nos indica la importancia de esta actividad y sugiere que la respuesta de cada parcela pudo haber estado condicionada por la intensidad de pastoreo, independientemente del tiempo de descanso. También se observó una posible asociación del pastoreo con aumentos de algunos parámetros relacionados con la restauración de la fertilidad del suelo como son: el No, Co, CIC, Bm y la saturación de bases. En el páramo de Gavidia se han realizado trabajos con parcelas pastoreadas y no pastoreadas, (Sarmiento, datos sin publicar) que pudieran aportar a futuro una mayor información sobre la importancia de esta práctica en la restauración de la fertilidad del suelo.

Tratando de integrar los resultados se tiene que al parecer el descanso si juega un rol importante en la restauración de la fertilidad, y esta afirmación estaría basada en el hecho de que la biomasa microbiana, el pH y el contenido de Mg fueron significativamente mayores en el páramo natural lo que pudiera estar indicando que estas variables sufren un aumento sucesional coherente con la recuperación de la fertilidad en el descanso pero considerando tiempos de descanso mayores a los evaluados. La respuesta de cada parcela al parecer está muy relacionada con

la presión de manejo, principalmente el pastoreo, y con la historia de uso relacionada con el número de ciclos cultivo-descanso al que ha estado sometida, lo que dificulta aun más el análisis ya que sería necesario indagar sobre esta información para cada una de las parcelas evaluadas. Al igual que lo señalan Llambí y Sarmiento (1998), el tema de la recuperación de la fertilidad es un problema complejo donde resulta difícil identificar medidas de manejo de los agroecosistemas basados en consideraciones ecológicas, creemos que sólo se pueden sugerir recomendaciones sobre el mejoramiento de algunas prácticas agrícolas que se realizan para tratar de hacer más eficiente el uso de los recursos y disminuir el impacto sobre dichos sistemas.

CONCLUSIONES

1. La historia de uso con respecto al número de ciclos cultivo-descanso y de pastoreo es al parecer muy diferente en las parcelas evaluadas, aumentándose la variabilidad en el grupo de parámetros físico-químicos considerados.
2. No se observaron tendencias sucesionales claras para ninguna de las variables físico-químicas analizadas, ni al comparar las parcelas de páramo con las que se encuentran en descanso. Sólo se logró detectar que las parcelas de páramo tenían valores significativamente más altos de Mg y pH pudiendo estar indicando una reducción en la disponibilidad de los nutrientes como efecto de la perturbación agrícola.

3. En base a nuestros resultados se sugiere que no hay una tendencia sucesional de acumulación de la biomasa microbiana ni del N y C potencialmente mineralizables, durante los primeros 12 años de descanso.
4. El N de la biomasa microbiana fue significativamente mayor en las parcelas del páramo natural en comparación a las parcelas en descanso, lo que pudiera estar indicando la importancia de esta variable en la medición del grado de perturbación de los agroecosistemas.
5. Los tiempos de descanso utilizados al parecer no permiten la recuperación de las condiciones microbiológicas del suelo debido a que no se alcanzan los valores de biomasa microbiana y de N y C potencialmente mineralizables encontrados en el páramo natural.
6. El efecto de la alta heterogeneidad espacial no se eliminó con la combinación de los análisis sincrónico y diacrónico, contribuyendo esto a no encontrar tendencias sucesionales claras en las variables biológicas consideradas que son al parecer de poca sensibilidad en estas condiciones de alta variabilidad.
7. El pastoreo parece estar ligado positivamente al aumento de variables relacionadas con la restauración de la fertilidad del suelo como por ejemplo la biomasa microbiana, el N y C potencialmente mineralizables, la CIC, las bases cambiables. Esto podrá ser mejor conocido teniéndose los resultados de las experiencias realizadas sobre la influencia del pastoreo en las principales características físico-químicas del suelo.
8. Las salidas más relevantes del N aplicado durante la fase de cultivo parecieran ser las pérdidas por vía gaseosa (volatilización+denitrificación),

las pérdidas por lixiviación durante un ciclo de producción al parecer son bajas pero sería necesario proseguir con estas evaluaciones.

9. Las recomendaciones para lograr una mayor eficiencia en el uso de los recursos estarían orientadas al uso de mejor calidad de la semilla lo que permitiría un mejor aprovechamiento del N agregado y al fraccionamiento de las aplicaciones del fertilizante.

BIBLIOGRAFÍA

- Abadín, J. González-Prieto, S. J. Sarmiento, L. Villar, M. C. y T. Carballas. 2002. Successional dynamics of soil characteristics in a long fallow agricultural system of the high tropical Andes. *Soil Biology and Biochemistry* 34(11): 1739-1748.
- Aranguren, A. y M. Monasterio. 1997. Aspectos de la Dinámica del nitrógeno de parcelas con diferentes tiempos de descanso en el Páramo de Gavidia (Andes Venezolanos). En: Liberman, M. y C. Baied. (Eds). *Desarrollo sostenible de ecosistema de montañas: Manejo de Áreas Frágiles en los Andes*. UNU-PL-880. Pp 171-179.
- Jaimes, V. 2000. Estudio ecológico de una sucesión secundaria y mecanismos de recuperación de la fertilidad en un ecosistema de páramo. Tesis de Maestría. Postgrado de Ecología Tropical. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Llambí, L. D. y L. Sarmiento. 1998. Biomasa microbiana y otros parámetros edáficos en una sucesión secundaria de los páramos venezolanos. *Ecotrópicos* 11(1): 1-14.
- Montilla, M. 1993. Procesos ecológicos en el manejo del suelo. Seminario Internacional de Agricultura Tropical. Centro de Investigaciones Ecológicas de los Andes Tropicales (CIELAT). Mérida. Venezuela.
- Sarmiento, L. y Monasterio, M. 1993. Elementos para la interpretación ecológica de un sistema agrícola campesino de los páramos venezolanos. En: Rabey, M. (Ed.). *El uso tradicional de los recursos en montañas: tradición y transformación*. UNESCO-ORCYT. Montevideo, Uruguay.
- Sarmiento, L. y P. Bottner. 2002. Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration. *Applied Soil Ecology* 19 (1):79-89.