

Citar como:

Sarmiento, L., Acea, M.J., Barrios, E., Bowen, W., Herrera, R., Llambí, L.D., Ortuño, N., Sivila, R., Varela, A. 2001. Un marco conceptual y metodológico para estudios de fertilidad del suelo en los andes tropicales. Memorias del IV Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable en los Andes: La estrategia para el siglo XXI. Edición en CD-ROM.

## **UN MARCO CONCEPTUAL Y METODOLOGICO PARA ESTUDIOS DE FERTILIDAD DEL SUELO EN LOS ANDES TROPICALES**

### *A CONCEPTUAL AND METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR SOIL FERTILITY STUDIES IN THE TROPICAL ANDES*

**Lina Sarmiento<sup>1</sup>, María José Acea<sup>2</sup>, Edmundo Barrios<sup>3</sup>, Walter Bowen<sup>4</sup>, Ricardo Herrera<sup>5</sup>, Luis Daniel Llambí<sup>1</sup>, Noel Ortuño<sup>6</sup>, Ruth Sivila<sup>7</sup>, Amanda Varela<sup>8</sup>**

#### **RESUMEN**

Se presenta un marco de trabajo conceptual para unificar enfoques e integrar esfuerzos de investigación en torno al tema de la fertilidad del suelo en agroecosistemas de los Andes tropicales. El objetivo es avanzar hacia una comprensión más amplia y completa de como funcionan y como pueden manejarse los diversos agroecosistemas de la región andina. El énfasis está puesto en los procesos que regulan la disponibilidad de nutrientes y de agua para las plantas cultivadas, buscando definir estrategias para una modernización racional y sustentable de la agricultura en los Andes. La propuesta se estructura en base a un juego de escalas espaciales que van desde los Andes tropicales como conjunto hasta la parcela o agroecosistema como escala de mayor detalle. A escala interregional se busca abarcar comparativamente la gran variabilidad climática, edáfica y de tipos de manejo existentes. A escala regional o local se consideran otros ejes de variabilidad como los gradientes altitudinales y la heterogeneidad topográfica, factores determinantes del funcionamiento del suelo en ambientes de montaña. El enfoque propuesto consiste por una parte en estimar los requerimientos potenciales de los cultivos (principalmente papa pero también trigo, maíz, frijol y yuca) en cada área de estudio a través del uso de modelos de simulación. Estos modelos estiman el crecimiento potencial de los cultivos y su dinámica de absorción de nutrientes utilizando información de radiación solar y temperatura y considerando que no hay limitaciones hídricas ni nutricionales. Los requerimientos potenciales así calculados se comparan con la absorción real del cultivo, detectándose los períodos en que ocurre déficit de nutrientes y la magnitud de este déficit bajo diferentes sistemas de manejo. Simultáneamente se estudian los procesos que regulan la disponibilidad de nutrientes, tales como la actividad microbiana, la inmovilización-mineralización, el lavado de nutrientes, la dinámica de descomposición de abonos orgánicos, las asociaciones micorrizas, etc. Se propone abordar con esta metodología cinco grandes temas que son: 1) el manejo integrado de nutrientes, 2) los sistemas agrícolas con descansos largos, 3) la rotación de cultivos, 4) el reemplazo de sistemas (vegetación natural por cultivos o sistemas tradicionales por intensivos) y 5) el desarrollo de ecotecnologías (biofertilizantes, barbechos mejorados, biorremediación, biopesticidas). Los resultados obtenidos con este enfoque pueden ser utilizados para el diseño de mejores alternativas de manejo agrícola que sean transferibles a los productores locales. La producción de biomejoradores puede ser de interés para el sector empresarial.

**Palabras Clave:** agroecosistemas, modelización, micorrizas, nutrientes, rotación de cultivos, biofertilizantes, biorremediación.

<sup>1</sup> ICAE, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia, CSIC, España

<sup>3</sup> CIAT, Cali, Colombia

<sup>4</sup> CIP, Lima, Perú

<sup>5</sup> IES, La Habana, Cuba

<sup>6</sup> Proinpa, Cochabamba, Bolivia.

<sup>7</sup> Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

<sup>8</sup> Departamento de microbiología, Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

**SUMMARY**

A conceptual framework is developed to unify different approaches and integrate research efforts in soil fertility studies in tropical Andean agroecosystems. The main goal is to increase the existing knowledge on the functioning and management of Andean agroecosystems. The emphasis is on processes that regulate soil nutrient and water availability to the crops, in order to define strategies for a more rational modernization and a more sustainable agriculture. The proposal includes several spatial scales, taking into account the ecological and cultural diversity of the Andes. An inter-regional scale of analysis includes the large climatic, edaphic and management variability of the Andean mountains. A regional scale considers local gradients of altitude and topographical heterogeneity, both factors of high importance in mountain environments. The proposed approach consists in estimating the potential requirements of the crops (mainly potato but also wheat, maize, beans and manioc) in each of the study areas through the use of simulation models. These models estimate the potential growth of the crops and their nutrient uptake dynamics using the information of daily solar radiation and temperature, and considering that there are neither water nor nutrient limitations. These potential requirements are compared with the real uptake of the crop, detecting the magnitude and the periods when nutrient deficit occurs and the extent of this deficit under several management systems. Simultaneously, some of the processes that regulate nutrient availability can be studied, like microbial activity, immobilization-mineralization, nutrient leaching, decomposition dynamics of organic manures, micorrizal associations, etc. Five main topics are defined: long fallow agricultural systems, crop rotation, integrated nutrient management (organic manures and mineral fertilizers), substitution of systems (natural vegetation by crops or traditional by intensive management) and development of ecotechnologies (biofertilizers, improved fallow, bioremediation, biopesticides). The results can be used for the design of better alternatives of agricultural management that can be transferred to the local technicians and farmers. The production of biofertilizers, biopesticides, biofumigants and bioremediators can be of interest to the industry.

Key Words: Soil, fertility, Andes, diversity, agroecosystems, organic matter, modelization, microbiology, mycorrhiza, nutrients, fertilization, crop rotation, biofertilizers, bioremediation, biopesticides.

## **INTRODUCCIÓN**

Las montañas tropicales tienen un papel primordial en la producción de alimentos debido a que muchos rubros agrícolas de interés nacional solo pueden cultivarse en sus climas más temperados. Al mismo tiempo constituyen ambientes frágiles, cuya degradación no sólo tiene un efecto local sino también consecuencias sobre las zonas bajas aledañas y sobre el ciclo hidrológico de grandes regiones. Prácticamente toda la zona andina está densamente poblada, ya sea por campesinos que practican una agricultura tradicional o semi-tradicional o por pequeños y medianos productores que practican una agricultura de mayores insumos. Por otra parte, en las montañas andinas se encuentra una parte muy significativa de la diversidad del planeta, tanto en lo que se refiere a tipos de ecosistemas, diversidad de especies y también diversidad genética de algunas plantas cultivadas de gran importancia. Por todo lo anterior, consideramos que es de carácter prioritario encontrar formas de hacer más sustentable la agricultura en estos ambientes y así evitar que continúen los procesos de degradación del suelo y de desertificación. Para cumplir con este objetivo es necesario entender mejor los procesos que regulan la fertilidad del suelo, evaluar la eficiencia de los sistemas agrícolas actuales y encontrar alternativas de manejo más sustentables y ecológicas.

A pesar de que la agricultura andina tradicional ha permitido mantener la gran diversidad de cultivos que caracteriza a uno de los grandes centros de domesticación de plantas y animales (Brush, 1995; Altieri, 1996) y sus prácticas de conservación de suelos (terrazas, sistemas de labranza y de riego) han demostrado ser altamente sustentables (Erickson & Chandler, 1989; Treacey, 1989), las bases agroecológicas de su funcionamiento son poco conocidas, en especial en lo que se refiere a la fertilidad del suelo.

El marco conceptual y metodológico que presentamos a continuación fue elaborado dentro del proyecto MOSAndes (CYTED-Proyecto XII.4) que es una red de fertilidad del suelo, integrada por investigadores de cinco países andinos (Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela) con la colaboración de especialistas de Cuba y España. Se hizo necesario formular este marco para integrar de manera coherente el trabajo de diversos especialistas, incluyendo modelizadores, microbiólogos, agrónomos y ecólogos, con experiencia en distintos campos y escalas, de forma que al poner junto este conocimiento se ganara en la comprensión de como funcionan los sistemas agrícolas y cuales son los factores más importantes que los regulan o modulan.

El estudio de los agroecosistemas, por ser sistemas altamente complejos, requiere de enfoques holísticos y multidisciplinarios. Para que la investigación en este campo sea exitosa la condición principal es que el conocimiento adquirido por distintos especialistas trascienda las disciplinas respectivas y pueda ser integrado en un modelo conceptual unificado, en el cual las partes adquieren una nueva dimensión.

Un antecedente clave para la formulación de este marco es el proyecto TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) patrocinado por la Unión Biológica Internacional y MAB-UNESCO, en el marco del Programa Década de los Trópicos. El proyecto TSBF estableció de una manera muy elegante sus bases conceptuales, líneas y estrategias de investigación, hipótesis y diseños experimentales (Swift, 1984, 1985, 1987, 1991; Ingram & Swift, 1989), dando origen a un marco conceptual de excepcional calidad y produciendo un manual de métodos que es de uso obligado para los estudios de fertilidad del suelo (Anderson y Ingram, 1993). Sin embargo, es importante resaltar que el proyecto TSBF fue implementado en el trópico de baja altitud y no consideró entre sus sitios pilotos, ni dentro

de su marco conceptual, a las montañas tropicales. La presente propuesta intenta extender y adaptar el proyecto TSBF a la región andina, considerando las especificidades de los sistemas montañosos, como son su gran diversidad ecológica, la existencia de marcados gradientes altitudinales y topográficos, las bajas temperaturas, etc. Para realizar esta adaptación seguimos los lineamientos del proyecto “Comparative Studies on Tropical Mountain Ecosystems” también del programa Década de los Trópicos (Monasterio *et al*), 1984, 1987).

Una herramienta importante que fue incorporada en este marco conceptual y metodológico son los modelos de simulación de cultivos, los cuales no solo permiten organizar el conocimiento disponible dentro de un marco dinámico y cuantitativo sino también explorar nuevos escenarios y predecir la respuesta de los agroecosistemas a cambios en el manejo o en las condiciones ambientales. De esta forma los modelos son al mismo tiempo herramientas para la investigación y para el manejo. En investigación proveen una plataforma para la integración de los conocimientos y para priorizar las nuevas investigaciones y formular nuevas hipótesis. En el manejo de cultivos pueden ser herramientas muy poderosas para optimizar la aplicación de insumos, las fechas de siembra y las rotaciones según las características específicas de los suelos, variedades cultivadas, clima y tecnologías disponibles.

El aspecto más innovador de esta propuesta es que al combinar tres escalas espaciales (interregional, regional y agroecosistémica) con tres niveles de complejidad (detalle en el análisis) y con cinco temas prioritarios de trabajo pueden formularse un gran número de proyectos concretos.

El objetivo final que se persigue es desarrollar las bases teóricas y el conocimiento empírico necesarios para entender los mecanismos ecológicos que regulan la fertilidad de los suelos andinos tropicales y entender como éstos mecanismos son modulados por los ejes de variación propios de la región (gradientes climáticos, altitudinales, edáficos, topográficos, de intensidad y tipo de manejo, etc.) para mejorar la gestión de la fertilidad y lograr la satisfacción de las necesidades de los habitantes andinos dentro de un contexto de sustentabilidad y protección de la biodiversidad. Pero no hay que olvidar que los campesinos andinos poseen sabidurías ancestrales cuyas bases ecológicas deben ser analizadas, para comprender sus fundamentos agronómicos y valorizarlos en su justa medida.

## **ESCALAS DE TRABAJO**

Se proponen tres escalas espaciales de análisis (Figura 1): interregional, regional y agroecosistémica. Las dos primeras permiten la selección de las áreas de trabajo utilizando criterios adaptados a las zonas andinas y permitiendo interpretar los resultados obtenidos a escala agroecosistémica dentro de un marco comparativo.

### ***Escala interregional***

Se busca comparar situaciones contrastantes dentro de los Andes Tropicales. El área de estudio abarcaría desde los 20° de latitud Sur hasta los 10° de latitud Norte, incluyendo una gran diversidad de condiciones naturales y de estrategias de manejo. Se plantea

escoger los sitios de trabajo para las comparaciones interregionales en función de tres ejes:

Eje Interregional 1: Clima (Andes secos→ Andes húmedos): Una de las principales diferencias entre los Andes del Norte y los Centrales es climática, siendo estos últimos más secos. Por consiguiente difieren también la biomasa y la diversidad vegetal, así como la cantidad de materia orgánica del suelo y la dinámica de los procesos edáficos. Todos estos aspectos pueden determinar diferencias importantes en la regulación de la fertilidad del suelo. Por ejemplo, la menor cantidad de materia orgánica asociada a condiciones de bajas precipitaciones influye sobre la capacidad de retener nutrientes y sobre otras propiedades del suelo relacionadas con la fertilidad y la susceptibilidad a la erosión.

Eje Interregional 2: Tipo de suelo (volcánicos → no volcánicos): En el área de estudio existen ecosistemas y agroecosistemas sobre andosoles y sobre suelos de otros ordenes. El origen volcánico tiene una gran influencia sobre los procesos que regulan la fertilidad del suelo por lo que consideramos importante realizar un análisis comparativo. Una de sus características es la presencia de alófono, componente mineral que interactúa fuertemente con las moléculas orgánicas del suelo y por lo tanto también afecta la dinámica de la materia orgánica..

Eje Interregional 3: Sistema productivo (ancestral endógeno → moderno exógeno). Existen diferentes modalidades de gestión de la fertilidad en el mundo andino tropical, las cuales están determinadas por diferencias históricas, ecológicas y socio-económicas. En los Andes Centrales la actividad agrícola es mucho más antigua y en consecuencia las prácticas tradicionales de manejo son más elaboradas, incluyendo rotaciones más complejas, mayor número de especies cultivadas, mayor integración entre la agricultura y el pastoreo, prácticas ancestrales de irrigación y terráceo, etc. En los Andes Colombianos y Venezolanos la ocupación de los ambientes de mayor altitud, sobre todo de los páramos, es reciente. Las diferencias de manejo plantean la posibilidad de efectuar intercambios tecnológicos interregionales, algunos de los cuales podrían ser evaluados en el marco de este proyecto.

### ***Escala regional o local***

Se propone que a escala regional los problemas sean planteados utilizando al menos alguno de los siguientes ejes:

Eje regional 1: Altura (1000 m → 4000 m): Una característica fundamental de las montañas es la presencia de gradientes altitudinales con variaciones continuas de temperatura. Como los procesos biológicos que regulan la dinámica de los nutrientes están íntimamente relacionados con la temperatura es posible plantear muchas hipótesis sobre como adaptar el manejo de la fertilidad a estos gradientes (ej.: la velocidad de descomposición de los abonos orgánicos varía con la altitud y el manejo de estos abonos debería considerar este efecto).

Eje regional 2: Topografía (Valle→Ladera): La gran heterogeneidad topográfica, que genera a su vez variabilidad microclimática y edáfica, es otra de las características de los sistemas montañosos. Esta heterogeneidad tiene mucha influencia sobre la fertilidad y el

funcionamiento del suelo. Conocer el efecto de la heterogeneidad y saber manejarla es un tema ineludible en las montañas.

Eje regional 3: Estrategias de manejo (Tradicional → Intensivo): La coexistencia de sistemas agrícolas de tipo tradicional, que utilizan bajos insumos, con otros más intensivos, de mayores insumos y rentabilidad es común en los Andes. Se propone comparar sistemas con diferente intensidad de manejo, analizando los mecanismos que intervienen en la regulación de la fertilidad del suelo. Se propone así mismo hacer una valoración de diferentes sistemas de manejo en términos de su sustentabilidad.

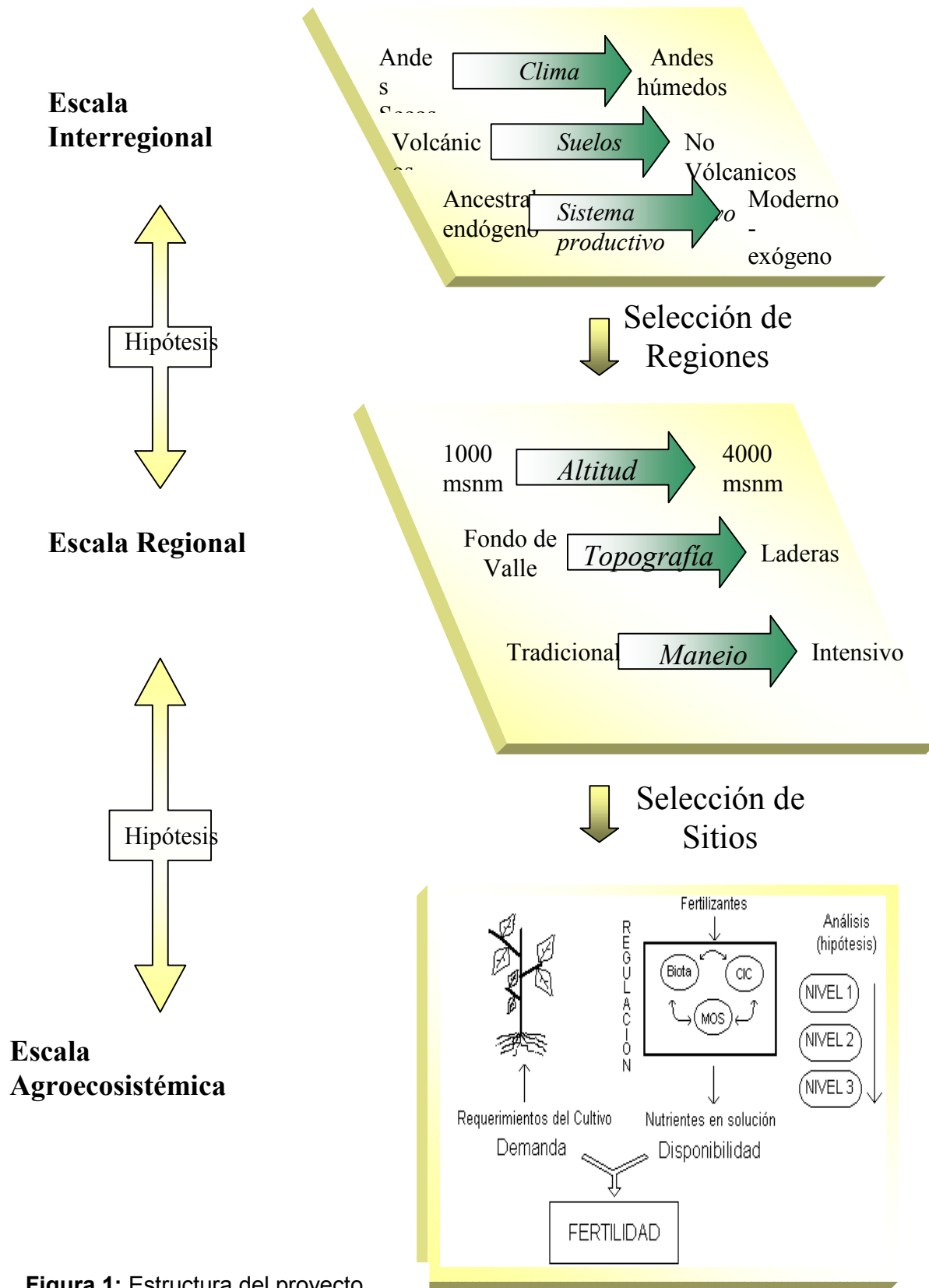


Figura 1: Estructura del proyecto



### **Escala agroecosistémica**

A esta escala se analizarán las bases ecológicas de la regulación de la fertilidad y su modulación por los ejes de variación identificados a las otras dos escalas. Se considera que la fertilidad es la capacidad del suelo, bajo un sistema de manejo dado, de proveer nutrientes al cultivo de acuerdo a sus requerimientos (Figura 1). Esta capacidad va a estar determinada por las interacciones entre los componentes bióticos, la materia orgánica del suelo y su matriz mineral o física. Se analizarán los requerimientos potenciales de nutrientes por los cultivos y como estos requerimientos varían en función de las coordenadas ecológica (altitud, clima). Al mismo tiempo se analizará la disponibilidad de nutrientes y los procesos edáficos que la regulan. A continuación se especifica la metodología que se utilizará a escala agroecosistémica.

### **TEMAS DE TRABAJO**

Se han seleccionado cinco grandes temas de trabajo que consideramos prioritarios en la región andina y que pueden ser abordados con el enfoque propuesto. Estos cinco temas se plantean sólo con fines orientativos, sin cerrar la posibilidad de otros temas importantes. También hay que tener en cuenta que existen relaciones transversales entre los temas propuestos.

- 1) Manejo integrado de nutrientes: En algunas regiones de los Andes, como por ejemplo en buena parte de la zona andina venezolana, se realiza un uso masivo de abonos orgánicos y minerales, en el contexto de una agricultura intensiva de altos insumos. Este uso creciente de fertilizantes se ha hecho sin una buena base científica, generando problemas de uso excesivo y contaminación, además de un bajo aprovechamiento por los cultivos, lo que incide negativamente en la rentabilidad económica. Contrariamente, en otras regiones de los Andes, como en muchos sitios del Altiplano, los sistemas de producción campesinos se ven muy limitados por el alto costo de los fertilizantes y la escasez de abonos orgánicos, que han impedido un aumento importante de los rendimientos. En ambas situaciones es prioritario desarrollar estrategias para un manejo eficiente de los nutrientes, que permita optimizar el uso de los fertilizantes y minimizar sus efectos negativos. El mejor enfoque en este sentido es el de un manejo integrado de nutrientes que considere estrategias de optimización basadas en el conocimiento de los procesos que tienen lugar en el agroecosistema. Por ejemplo, la combinación de fertilizantes minerales con abonos orgánicos de diferentes calidades puede permitir sincronizar de manera más eficiente la disponibilidad de nutrientes en el suelo con los requerimientos de los cultivos, favoreciendo la absorción y reduciendo las pérdidas por lavado. En este caso se buscaría manejar a la microbiota del suelo de manera que inmovilice nutrientes en momentos de bajo requerimientos por los cultivos y los mineralice cuando los requerimientos aumentan. La inmovilización se lograría aplicando un material orgánico de baja calidad (relación C/N alta). El momento en que se inicia la mineralización estaría determinado por el momento de aplicación de dicho material y por su tasa de descomposición. Para un manejo integrado de nutrientes es también primordial considerar el efecto del clima sobre la dinámica de descomposición, mineralización y lavado de nutrientes. En el caso de ambientes de montaña, donde el clima es altamente variable espacial y temporalmente, hay que disponer de una buena base experimental para poder adaptar los sistemas de manejo a las particularidades climáticas de cada sitio. Esto solo puede conseguirse con

experimentos bien planificados, que sirvan de base para la validación y construcción de modelos de simulación. Otros aspectos que deben ser considerados para un manejo integrado de nutrientes son los cambios en cantidad y calidad de la MOS, el manejo de los residuos de cultivo, la actividad de diferentes grupos taxonómicos y funcionales de la microbiota edáfica y la abundancia y diversidad de micorrizas vesículo-arbusculares.

- 2) Sistemas agrícolas con descansos: La agricultura con descansos largos está todavía ampliamente difundida en la región andina. Este tipo de agricultura se basa en la recuperación espontánea de la fertilidad del suelo durante los procesos de sucesión ecológica que se desencadenan durante los descansos de varios años a que son sometidas las parcelas. Diversos autores han analizado los mecanismos que permiten la recuperación de la fertilidad durante estos periodos largos de descansos (Ferwerda, 1987; Montilla et al., 1992; De Robert, 1993; Hervé, 1993, 1994; Sarmiento *et al.*, 1990, 1993; Sarmiento, 1995; Sivila & Hervé, 1994; Blanco, 1994; Llambí & Sarmiento, 1998, 1999; Abadín et al. 2002). Sin embargo, estos estudios no han permitido aclarar completamente cuales son los mecanismos de recuperación de la fertilidad, por lo cual se requieren nuevos estudios que enfatizan en el análisis de la ecología y microbiología del suelo y que consideren la heterogeneidad espacial característica de los ambientes montañosos. Se requiere analizar las variaciones de la cantidad y calidad de residuos incorporados al suelo a lo largo de los periodos de descanso, las tasas de descomposición de esos residuos, la actividad de diferentes grupos microbianos, la abundancia y diversidad de micorrizas vesículo-arbusculares, etc. Por otra parte, los sistemas tradicionales con descansos largos han entrado en crisis por presión poblacional y/o fraccionamiento de las propiedades, lo cual hace que el tamaño y número de parcelas tienda a disminuir y por lo tanto el tiempo de barbecho también, promoviéndose una degradación acelerada del recurso suelo. En este sentido se hace importante desarrollar las posibles formas de prevenir esta degradación, acortando el tiempo de regeneración de la fertilidad con sistemas que incorporan plantas de crecimiento rápido, tanto leguminosas como no leguminosas.
- 3) Rotación de cultivos: La rotación de cultivos es una practica tradicional en la agricultura andina. Las rotaciones son muy ricas e incluyen especies como papa (*Solanum tuberosum*) / quinoa (*Chenopodium quinoa*) / oca (*Oxalis tuberosa*) / ulluco (*Ullucus tuberosum*) / chocho (*Lupinus mutabilis*) / maíz (*Zea mays*) y otras como cebada, habas y arvejas, que se rotan en diversas secuencias, en periodos de 4 a 5 años, seguidos por descansos largos o intermedios. En sistemas más intensivos se realizan rotaciones papa/ajo/zanahoria, la cual es muy utilizada en los Andes venezolanos. En un trabajo reciente, Nieto *et al.* (1997) demuestran la importancia de la rotación de cuatro cultivos andinos para mantener el rendimiento y controlar la producción de malezas. En general, el problema de la rotación ha sido analizado utilizando un enfoque agronómico clásico, sin hacer énfasis en la comprensión de los mecanismos ecológicos que permiten optimizar la utilización de los recursos del suelo a lo largo de la rotación. La investigación en este tema debería centrarse en analizar las secuencias de rotaciones de cultivos características (maíz, frijol, yuca en las laderas del Cauca, papa-cereales-quinoa en los Andes centrales, ajo/zanahoria/papa en los Andes venezolanos) y evaluando en cada caso los requerimientos de nutrientes de cada cultivo y su disponibilidad en el suelo. Alternativamente es necesario investigar la posibilidad de alterar estas rotaciones para mejorar la sincronización entre disponibilidad y demandas de nutrientes.

- 4) Reemplazo de sistemas: En muchas áreas andinas los ecosistemas naturales están siendo progresiva y aceleradamente reemplazados por sistemas agrícolas y en algunos casos por plantaciones forestales de pinos o eucaliptos. Así mismo, sistemas tradicionales de manejo son reemplazados por sistemas de mayores insumos. Es importante analizar el impacto de estas transformaciones sobre los compartimientos y procesos edáficos y su efecto sobre el funcionamiento y la estabilidad del sistema. Las consecuencias de estos reemplazos son también importantes desde el punto de vista del cambio global, al afectar positiva o negativamente a los reservorios de carbono en el suelo
- 5) Desarrollo de ecotecnologías: Resulta cada vez más claro que el mejoramiento de muchos de los problemas de la agricultura y del ambiente reside en el uso de ecotecnologías, las cuales pueden constituir herramientas accesibles y de menor costo para optimizar el manejo agronómico de los cultivos. Entre las ecotecnologías que pueden ser promisorias en el caso de la región andina podemos mencionar el uso de barbechos mejorados ya sea por la introducción de leguminosas o especies de crecimiento rápido, los biofertilizantes (micorrizas y cianobacterias) desarrollados a partir de la enorme biodiversidad de estos microorganismos en los suelos andinos, la biorremediación (uso de microorganismos para degradar sustancias contaminantes), los biopesticidas y biofumigantes. Un importante reto sería desarrollar sistemas supresores, donde un adecuado manejo de la fertilización y de los microorganismos controle el desarrollo de patógenos.

## **NIVELES DE ANÁLISIS**

No todos los investigadores o laboratorios llamados a realizar investigación en la temática de fertilidad en suelos andinos tendrán las mismas capacidades técnicas ni la misma infraestructura o acceso a financiamientos. Por esta razón se proponen tres niveles de análisis de complejidad creciente, para facilitar la integración de los diferentes investigadores en este marco conceptual común (Figura 1).

Nivel 1: Paquete mínimo. El nivel 1 consiste en las mediciones mínimas que sería recomendable realizar en cada área de estudio. A este nivel se analizan los sistemas agrícolas tal como son practicados por los productores, pudiendo realizarse el trabajo directamente en sus parcelas. El paquete mínimo incluye la estimación de la producción y requerimientos de nutrientes potenciales del cultivo y la medición de la producción y absorción real. El cociente entre producción real y potencial puede ser utilizado como medida de la fertilidad. Se propone trabajar siempre con nitrógeno y de ser posible también con fósforo y otros macronutrientes. Dada la dificultad metodológica de medir los valores potenciales de absorción y producción, éstos pueden ser estimados utilizando los modelos de cultivos de la serie DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), que tiene modelos específicos para papa, maíz, frijol, trigo y yuca entre otros cultivos. La estimación se basa en simular el crecimiento del cultivo y la absorción de nutrientes en las condiciones de radiación y temperatura de cada sitio pero suponiendo que no hay limitaciones de nutrientes ni de agua. A este nivel el modelo requiere, además de datos climáticos, información referente a la variedad cultivada (características genéticas principalmente). Los valores potenciales así calculados pueden compararse con el crecimiento real de los cultivos y con la acumulación de nutrientes en su biomasa, utilizando esta última medición como indicadora de la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Comparando los valores potenciales con los reales se puede hacer una evaluación

de la fertilidad en cada uno de los sitios de estudio y evaluar la magnitud y tiempo de ocurrencia del déficit nutricional, en caso de que lo hubiese. En forma complementaria puede simularse, utilizando los mismos modelos, el crecimiento del cultivo considerando la disponibilidad de agua y de nutrientes. Con este fin se requiere de datos adicionales de entrada, referentes al balance hídrico, al nitrógeno mineral inicial del suelo y a otras variables edáficas. De esta forma el paquete mínimo permitiría no solo evaluar la fertilidad en cada sistema estudiado sino también poner a prueba los modelos DSSAT bajo una serie de condiciones ambientales diferentes.

La dinámica de crecimiento y de acumulación de nutrientes por los cultivos deberá medirse en un mínimo de 3 parcelas, de tamaño suficiente para que las cosechas sucesivas no modifiquen la densidad del cultivo. Por lo menos cuatro cosechas sucesivas deberán realizarse a intervalos regulares a lo largo del crecimiento del cultivo. En las parcelas deberá garantizarse un adecuado suministro de agua y un buen control de plagas, de forma que pueda evaluarse únicamente el aspecto nutricional de la fertilidad.

Nivel 2: Prueba experimental de hipótesis. A este nivel se ubica el trabajo que requiere de una manipulación experimental para probar hipótesis referentes a la regulación de la fertilidad.

### **Ejemplo de hipótesis**

*La sincronización entre requerimientos de nutrientes del cultivo y disponibilidad de nutrientes en el suelo puede lograrse mezclando abonos orgánicos de diferentes calidades.*

Para probar esta hipótesis se trabajaría al menos con dos abonos orgánicos, uno de alta y otro de baja relación C/N, utilizando un diseño de bloques con los siguientes tratamientos: cada abono por separado, mezcla de ambos, ningún abono. Esto deberá hacerse con abonos disponibles en la zona, de forma que los resultados puedan fácilmente convertirse en recomendaciones agronómicas viables.

Nivel 3: Análisis de procesos y compartimientos edáficos. Este nivel consiste en analizar en detalle aspectos del subsistema edáfico que se consideren claves para la regulación de la fertilidad, como por ejemplo el tamaño, la estructura y la actividad de la comunidad microbiana, la descomposición de los abonos orgánicos, el lavado de fertilizantes, la fijación de nitrógeno, la nitrificación, la inmovilización-mineralización, la infección micorrízica, etc. En este nivel se incluye también la realización de incubaciones de los suelos en el laboratorio. Estas incubaciones, de diferente duración, permiten determinar la actividad metabólica específica para determinados substratos y los factores operativos de la actividad microbiana (temperatura, humedad, pH, fuente de energía, etc.).

## **CONCLUSIONES**

Se ha expuesto brevemente un marco conceptual que puede ser utilizado para unificar las investigaciones sobre fertilidad del suelo en la región andina. Para utilizar este marco es necesario plantear el problema de estudio en un juego de escalas espaciales. La escala interregional permitirá integrar los resultados de todos los investigadores participantes en lo que podría ser una agroecología comparada de la región andina, que permitiría ver como diferentes factores del ambiente y estrategias de manejo modulan y regulan la

fertilidad del suelo. A escala regional o local se pretende comenzar a dilucidar la gran diversidad y heterogeneidad de los sistemas agrícolas montañosos, donde pequeñas distancias pueden involucran grandes diferencias de funcionamiento y requerir distintas estrategias de manejo. Los experimentos deben ser realizados a escala del agroecosistema, con un enfoque holístico de compartimientos y procesos. Una vez planteado el problema en cada una de las escalas, se proponen tres niveles de análisis de complejidad creciente. La implementación de este marco conceptual podría permitir potenciar el esfuerzo necesario para mejorar el manejo de nuestros frágiles agroecosistemas andinos.

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo fue realizado en el marco del proyecto MOSAndes (cyted-proyecto XII. 4). Quisiéramos agradecer a la Dra. Maximina Monasterio, quien motorizó la formación de MOSAndes en el marco de la Red de Montañas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- ABADIN, J., GONZALEZ-PRIETO, S., 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*: en prensa.
- ALTIERI, M. 1996. Enfoque agroecológico para el desarrollo de sistemas de producción sostenibles en los Andes. CIED. Perú.
- ANDERSON, J., INGRAM, J. 1993. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. CAB International.
- BOWEN, W.T. AND S. MOREAU. 1998. Integrating Remote Sensing, GIS, and Modeling for Land-Use Monitoring in the Arid/Semi-Arid Andes. In *Proceedings of the ISNAR Methodological Research at the Eco-regional Level Review Workshop*, April 20-22. p. 74-81.
- BOWEN, W., H. CABRERA, V. BARRERA, AND G. BAIGORRIA. 1999a. Simulating the Response of Potato to Applied Nitrogen. CIP Program Report 1997-98. p. 381-386.
- BOWEN, W., G. BAIGORRIA, V. BARRERA, J. CORDOVA, P. MUCK, AND R. PASTOR. 1999B. A Process-Based Model (WEPP) for Simulating Soil Erosion in the Andes. CIP Program Report 1997-98. p. 403-408.
- BLANCO, O. 1994. Efecto del descanso del suelo sobre el número y la viabilidad de quistes de *Globodera* SPP. de la papa. En: *Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes*. (Eds: Hervé,D; Genin,D; Riviere,G) IBTA-ORSTOM, La Paz, 171-174.
- BRUSH, S. 1995. In situ conservation of landraces in centers of crop diversity. *Crop. Sci.* 35: 346-354.
- CRISSMAN, C., J. ANTLE, J. STOOBVOGEL, AND W. BOWEN. 1998. Tradeoffs in Sustainable Agriculture and the Environment in the Andes: A Decision Support System for Policy Makers. In *Proceedings of the ISNAR Methodological Research at the Eco-regional Level Review Workshop*, April 20-22. p. 38-63.
- 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, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

- ERICKSON, CL. & CHANDLER, KL. 1989. Raised fields and sustainable agriculture in the Lake Titicaca basin of Perú. In: *Fragile lands of Latin America*. pp:230-243. J.O. Bowder (ed). Westview Press, Boulder.
- 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. University of Amsterdam. 83 p.
- HERVÉ, D. 1993. Dynamique de la pratique des jachères longues paturées dans les Andes. In: *La jachère en Afrique de l'Ouest*. (Atelier International, Montpellier, du 2 au 5 decembre 1991) (Eds: Floret, C; Serpantie, G) Editions de l'ORSTOM, Paris, 193-206.
- HERVÉ, D. 1994. Respuesta de los componentes de la fertilidad del suelo a la duración del descanso. En: *Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes*. (Eds: Herve, D; Genin, D; Riviere, G) IBTA-ORSTOM, La Paz, 155-169.
- INGRAM, J.S.I. & SWIFT, M.J. 1989. Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) programme: Report of the fourth TSBF interregional workshop. *Biology International*. Special Issue 20.
- LESCANO, R.J. & ZEBALLOS, J.A. 1982. Secuencia de rotación de cultivos andinos. *Memorias del 3er Congreso Internacional de Cultivos Andinos*. La Paz, Bolivia, pp. 93-99.
- LLAMBÍ, LD. & SARMIENTO, L. 1998. Dinámica sucesional de la biomasa microbiana y de otros parámetros edáficos en un agroecosistema con descansos largos de los páramos venezolanos. *Ecotrópicos*, 11:1-14.
- LLAMBÍ, LD. & SARMIENTO, L. 1999. Ecosystem restoration during the long fallow periods in the traditional potato agriculture of the Venezuelan High Andes. In Price, M. (Ed): *Global Change in the Mountains: proceeding of the European Conference of Environmental and Societal Change in Mountain Regions*. Parthenon Publishing. New York. 190-193.
- MONASTERIO, M., SARMIENTO, G. & SOLBRIG, O. 1984. Comparative studies on tropical mountain ecosystems: a proposal for a collaborative programme of research. *Biology International*. Special Issue 8.
- MONASTERIO, M., SARMIENTO, G. & SOLBRIG, O. 1987. Comparative studies on tropical mountain ecosystems: Planning for research. *Biology International*. Special Issue 12.
- MONTILLA, M., HERRERA, R. & MONASTERIO, M. 1992. Micorrizas vesículo-arbusculares en parcelas que se encuentran en sucesión-regeneración en los Andes tropicales. *Suelo y Planta*, 2:59-70.
- NIETO-CABRERA, C., FRANCIS, C., CAICEDO, C., GUTIERREZ, P. & RIVERA, M. 1997. Response of four andean crops to rotation and fertilization. *Mountain Research and development* 17: 273-282.
- RITCHIE, J.T. 1995. International consortium for agricultural systems applications (ICASA): establishment and purpose. *Agricultural Systems* 49:329-335.
- SARMIENTO, L. 1995. Restauración de la fertilidad en un sistema agrícola a jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Tesis de doctorado, Université de Paris XI. 237 p.
- SARMIENTO, L.; MONASTERIO, M.; MONTILLA, M. 1990. Succession, regeneration and stability in high andean ecosystems and agroecosystems: The rest-fallow strategy in the Paramo de Gavidia, Mérida, Venezuela. *Geographica Bernesia, African Studies Series A8*, 151-157.
- SARMIENTO, L.; MONASTERIO, M.; 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*: In press.

- SIVILA,R; HERVÉ,D. 1994. El estado microbiológico del suelo, indicador de la restauración de la fertilidad. En: *Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes*. (Eds: Hervé,D; Genin,D; Riviere,G) IBTA-ORSTOM, La Paz, 185-197.
- SWIFT, M.J. (Ed). 1991. Soil fertility and global change: the role of TSBF studies in the IGBP. *Biology International*. Special Issue 25.
- SWIFT, M.J. (Ed). 1984. Soil Biological processes and tropical soil fertility: a proposal for a collaborative programme of research. *Biology International*. Special Issue 5.
- SWIFT, M.J. (Ed). 1985. TSBF, Tropical Soil Biology and Fertility: Planning for research. *Biology International*. Special Issue 9.
- SWIFT, M.J. (Ed). 1987. Tropical Soil biology and Fertility (TSBF). Inter-regional research planning workshop. *Biology International*. Special Issue 13.
- TAPIA, M. 1994. Rotación de cultivos y su manejo en los Andes del Perú. En: *Dinámicas del descanso de la tierra en los Andes*. (Eds: Herve,D; Genin,D; Riviere,G) IBTA-ORSTOM, La Paz, 37-53.
- TREACEY, JM. 1989. Agricultural terraces in Peru's Colca Valley: promises and problems of an ancient technology. In: *Fragile lands of Latin America*. pp:209-229. J.O. Bowder (ed). Westview Press, Boulder.
- WOOMER, P.L & SWIFT, M.J. 1994. *The biological Management of Tropical Soil Fertility*. Jhon Wiley and Sons.