

MODELOS DE SIMULACIÓN Y SOSTENIBILIDAD PREDIAL. APLICACIÓN EN CARCHI, ECUADOR*

Claudio Aguilar, Rodrigo Allende y Víctor Barrera**

Resumen

Se presenta el concepto de sustentabilidad a través de su relación con los recursos naturales, ecosistema y sistemas productivos. Se hace una descripción de las variables para analizar y describir sistemas de producción a nivel predial y la forma en que se pueden incluir en modelos de simulación. Esto se ejemplifica a través del desarrollo y validación de un modelo de simulación dinámico diseñado para estudiar los factores que afectan la sostenibilidad de los sistemas de producción de la zona de Carchi, Ecuador. Este modelo permite evaluar alternativas de manejo de sistemas productivos cuyos rubros principales son leche y papa.

Para evaluar la producción del hato lechero se consideró el efecto de disponibilidad y digestibilidad de la pradera y del uso de concentrado sobre consumo de materia seca y producción de leche. La evaluación de la pradera incluyó efectos de rezago, pluviometría, temperatura y nutrientes del suelo; la de la producción de papas incluyó los de clima y nutrientes del suelo.

Finalmente, se analiza la utilización de los modelos de simulación como herramienta de análisis al incorporar aspectos de sustentabilidad de los sistemas productivos.

Palabras claves: simulación, sostenibilidad, gestión.

CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	249
PROBLEMAS ASOCIADOS A LA SOSTENIBILIDAD.....	250
EL DESARROLLO SUSTENTABLE.....	250
SUSTENTABILIDAD Y RECURSOS NATURALES.....	251
SUSTENTABILIDAD Y ECOSISTEMA.....	251
SUSTENTABILIDAD Y SISTEMAS AGROPECUARIOS.....	252
MODELACIÓN DE SISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD.....	252
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE PEQUEÑOS PRODUCTORES DE LA ZONA DE CARCHI.....	253
ANÁLISIS DEL SISTEMA.....	253
CLIMA.....	253
SUELO.....	254
PASTIZAL.....	254
ANIMAL.....	254
CULTIVO DE PAPA (<i>SOLANUM TUBEROSUM</i>).....	254
SISTEMA LECHE – PAPA.....	254
SÍNTESIS DEL MODELO.....	254
SUBRRUTINA DE CONSUMO.....	255
Consumo potencial.....	255
Factor de corrección del consumo potencial por disponibilidad.....	255
Factor de corrección del consumo potencial por digestibilidad.....	255
Consumo Voluntario.....	255
Corrección de la selectividad por digestibilidad.....	255
Corrección de la selectividad por disponibilidad.....	255
Índice de selectividad.....	255
Digestibilidad de la MS consumida.....	255
CONSUMO VACAS EN PRODUCCIÓN A PASTOREO.....	256
Subrutina de partición de energía.....	256
Requerimiento de mantención.....	257
Requerimiento costo de cosecha.....	257
Requerimiento de gestación.....	257
Requerimiento producción de leche.....	258
Producción potencial de leche.....	258
SUBRRUTINA DE MANEJO DE PRADERAS.....	258
Efecto de la disponibilidad de la MS.....	258
Efecto de la precipitación.....	258
Efecto de la temperatura.....	258

Efecto de la fertilización.....	258
SUBRRUTINA DE CLIMA.....	259
SUBRRUTINA DE LA DINÁMICA DE NUTRIENTES EN EL SUELO.....	260
Ciclo del Nitrógeno.....	260
Ciclo del Fósforo.....	261
Ciclo del Potasio.....	263
Ciclo del Carbono de la Materia Orgánica.....	265
SUBRRUTINA DE LA PRODUCCIÓN DE PAPA.....	265
Rendimiento potencial de papa.....	265
VALIDACIÓN.....	265
VALIDACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE Y PAPA.....	266
CONCLUSIONES.....	266
BIBLIOGRAFÍA.....	267

INTRODUCCIÓN

El concepto de sustentabilidad y su principal paradigma, el desarrollo sustentable, se ha incorporado en los últimos años, fundamentalmente a partir de la publicación del informe “Nuestro futuro común” de la Comisión Brundtland, en todos los movimientos sociales y, por ende en el discurso de los principales actores del área política, técnica y científica de la sociedad (García, 1993).

La carencia de una disciplina o de un sistema de conocimientos globalmente conocidos y aceptados, que permita a la sociedad valorizar económicamente el mantenimiento de la calidad de los recursos naturales, ha sido uno de los factores que más ha influido en el desarrollo de sistemas que degradan o destruyen los recursos naturales o el medio ambiente, que se engloban en el concepto de sistemas no sustentables.

Sin embargo, en los últimos años se han producido también avances importantes en la evaluación económica de ecosistemas y su inclusión en la formulación

* Aguilar, C., Allende, R. y Barrera V. 2002. Modelos de simulación y sustentabilidad predial. Aplicación en Carchi, Ecuador. En: Gastó, J., P. Rodrigo e I. Aránguiz. Ordenación Territorial, Desarrollo de Predios y Comunas Rurales. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

** Documento preparado dentro del desarrollo del proyecto FONDEF D00-T1064 “ ”.

de políticas. Asimismo, han aparecido nuevos enfoques en economía de recursos naturales y tendencias hacia la incorporación de los nuevos desarrollos teóricos en sistemas de monitoreo y evaluación de la sustentabilidad que incorporen aspectos económicos adicionales a los convencionales (Viglizzo *et al.*, 1992).

Del mismo modo, a nivel de predio, existe una creciente discusión e investigación en la búsqueda de sistemas de producción agrícolas sustentables, que sean capaces de mantener a través del tiempo niveles aceptables de productividad biológica y económica, preservando el ambiente y los recursos naturales. Algunos trabajos de investigación han incorporado elementos de sustentabilidad al nivel de predio, utilizando modelos de simulación donde es posible monitorear el comportamiento de algunos indicadores a través del tiempo (Barrera y Aguilar, 1996; Aguilar y Barrera, 1997; Brito *et al.*, 1998a; Brito *et al.*, 1998b; Magri *et al.*, 1996).

La sustentabilidad y el desarrollo sustentable abren una infinidad de interrogantes en aspectos sociales, económicos, biológicos y físicos de tal modo que el análisis de los sistemas en estudio, así como la evaluación de las aplicaciones, adquiere una complejidad tal que hace necesario integrar elementos y conocimiento de diferentes áreas como ecología, economía, agronomía, sociología e ingeniería.

PROBLEMAS ASOCIADOS A LA SOSTENIBILIDAD

El deterioro ambiental constituye en la actualidad uno de los temas de mayor discusión en círculos académicos, intelectuales y políticos. La razón es simple, el crecimiento demográfico junto con el desarrollo y expansión de las capacidades técnicas para producir, han puesto de manifiesto que los recursos naturales y los servicios medio ambientales no son ilimitados y que su agotamiento o escasez presentan una seria amenaza al bienestar presente y futuro de la humanidad (Boyzoglu, 1998).

Algunos autores han señalado que durante mucho tiempo han estado alejados de la economía y el desarrollo por un lado y, la ecología y el medio ambiente por otro. La desaparición, en los últimos años, de esta distancia ha dado lugar a nuevos desarrollos teóricos acerca de las relaciones entre desarrollo económico y recursos naturales (Viglizzo *et al.*, 1992).

El concepto tradicional de crecimiento económico ha sido señalado como uno de los principales factores que causan deterioro ambiental (Ruttan, 1997), destacando varios hechos que pueden apoyar dicha premisa, como son:

- a Un aumento de la producción tiene asociado mayores requerimientos de insumos energéticos y materiales, con el consecuente incremento de los

desechos sólidos, líquidos y gaseosos, que pueden provocar contaminación ambiental.

- b Los requerimientos de recursos renovables y no renovables aumentan, lo que implica un incremento del riesgo de sobreexplotación de los recursos renovables y de agotamiento de los recursos no renovables.
- c Asociado al crecimiento económico, la migración rural hacia las urbes con la consiguiente expansión de las grandes ciudades, tiende a agravar los problemas ambientales en los centros urbanos.

Por otra parte, se ha señalado que la duplicación de la población mundial, en los últimos 40 años, junto con la vigencia de los actuales modelos de desarrollo, ha conducido a una sobreexplotación de los recursos naturales. La perspectiva se agrava si se considera que las estimaciones existentes señalan que en los próximos 40 años se necesita duplicar la producción actual de alimentos para satisfacer la demanda de la población mundial. Así, la problemática se centra en la construcción de un modelo de desarrollo que asegure la equidad intra e intergeneracional, la conservación de la base ecológica del desarrollo y, como consecuencia, la persistencia de la humanidad (Vosti y Reardon, 1997).

EL DESARROLLO SUSTENTABLE

La palabra sustentar viene del latín *sustenerere*, que significa sostener o mantener en alto. En el contexto de los recursos naturales y del medio ambiente, sustentar significaría mantener o prolongar el uso productivo de los recursos y la integridad de la base de esos recursos. Ello implica, entre otras cosas, que existen restricciones físicas y de otra índole al uso productivo de los recursos (Munasinghe y Shearer, 1995).

Algunos ambientalistas y científicos sostienen que la vía correcta hacia la sustentabilidad se basa en conservar las reservas físicas. Sin embargo, desde una perspectiva socioeconómica y como consecuencia del crecimiento de la población, tanto la conservación como la reducción de las reservas físicas conduce a una disponibilidad *per cápita* en disminución a través del tiempo. La única diferencia entre las dos opciones señaladas está en la pendiente de la caída (Dixon y Fallon, 1989). De tal modo que para mantener la disponibilidad *per cápita* constante o en crecimiento habría que considerar un aumento proporcional en la producción del sistema, considerando las reservas físicas junto con la eficiencia con que se usan los recursos. En este último aspecto, el cambio tecnológico y las políticas que lo fomenten, juegan un papel muy importante.

La Comisión Brundtland (World Commission on Environment and Development, 1987) definió el desarrollo sustentable como la capacidad de satisfacer las

necesidades del presente sin comprometer la capacidad que tendrán las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. El informe realizado por esta comisión señala, además, que el concepto de desarrollo sustentable implica limitaciones impuestas por el estado actual de la tecnología y la organización social sobre los recursos del medio ambiente y por la capacidad de la biosfera para absorber los efectos de la actividad humana. Se ha definido también desarrollo sustentable como aquel que distribuye más equitativamente los beneficios del progreso económico, protege el medio ambiente nacional y mundial en beneficio de las generaciones futuras y mejora genuinamente la calidad de vida (Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, 1990).

SUSTENTABILIDAD Y RECURSOS NATURALES

Los recursos naturales se clasifican generalmente en renovables y no renovables. Los no renovables comprenden los minerales y los combustibles fósiles. Se acepta que suelo, agua y la biota, base de la producción agropecuaria, son los recursos naturales renovables (Surís y Varela, 1995). Los problemas ambientales están casi siempre asociados al uso y disponibilidad de los recursos naturales renovables, usualmente en peligro de agotamiento debido a su sobreexplotación (Dasgupta y Maler, 1991).

En el contexto señalado, se ignora generalmente las tasas de renovación de suelos, que son muy lentas con relación a su eventual tasa de destrucción y la imposibilidad de regenerar la biodiversidad. Por lo mismo, es conveniente destacar que recursos como biomasa y agua pueden mantener su reserva en el planeta, pero sufrir profundas alteraciones en los balances en el ámbito de la región o del agroecosistema, con efectos negativos en la sustentabilidad de la producción agropecuaria (Viglizzo *et al.*, 1992). Por ello, cuando se limita el concepto de sustentabilidad al contexto de los recursos biológicamente renovables, considerados por separado, es aceptable decir que la sustentabilidad significa la utilización de no más del crecimiento anual de los recursos, con lo cual se evita reducir la reserva física (Thompson y Nardone, 1999).

Las poblaciones de mamíferos, aves, plantas y peces, son también ejemplos típicos de recursos naturales renovables. Hay una gran variedad de estudios que examinan el comportamiento reproductivo de diferentes especies bajo una amplia variedad de condiciones ambientales. La tierra es también un producto de este tipo, ya que la calidad de los suelos de cultivo y de las praderas puede ser preservada con una utilización cuidadosa. A su vez, la sobreutilización del suelo puede empobrecerlo y, eventualmente transformarlo en totalmente improductivo.

Las napas de agua subterránea suelen tener esta misma característica. En este caso se requiere un análisis más

complejo, ya que preocupa tanto su calidad como cantidad. En circunstancias normales, una fuente de agua experimenta un proceso de autopurificación a medida que los contaminantes se depositan en ella. Muchas fuentes de agua se recargan en el ciclo anual. Pero, si la tasa de extracción excede la tasa de recarga en el ciclo, el nivel freático de las fuentes descienden, con lo que suben los costos de extracción. Las fuentes acuíferas tienen además otra característica, a veces el problema respecto de ellas no es solamente el de la carga de contaminantes que soportan. Así por ejemplo, en el caso de fuentes acuíferas situadas cerca de la costa, si como consecuencia de una extracción excesiva de agua se permite que el nivel freático de la fuente baje demasiado, puede darse una intrusión de agua salina que ocasiona la destrucción de la napa.

Desde el prisma de economía ambiental se presentan complicaciones adicionales, entre las que se encuentra el impacto sobre la tasa de regeneración de los recursos ambientales de una amplia variedad de decisiones de inversión. El conflicto ocurre debido a que el impacto no es completamente reversible y, en algunos casos, es en alto grado irreversible.

En teoría, la meta de manejo del cultivo sustentable se puede alcanzar si se comprende bien la biología del recurso en cuestión (Dixon y Fallon, 1989). Finalmente, no hay que olvidar que los problemas del ambiente asumen la forma de imágenes diferentes para diversos grupos de personas (Ostrom *et al.*, 1999).

SUSTENTABILIDAD Y ECOSISTEMA

Como resultado de las interacciones que se producen en el sistema, aquello que podría haberse considerado como manejo sustentable para un recurso individual, puede resultar en la práctica insostenible para un ecosistema en conjunto. Según Dixon y Fallon (1989), la naturaleza y complejidad de las interacciones que se producen entre los componentes del ecosistema, plantean el problema de la compensación, asociada a las alternativas de desarrollo. Cuando en una actividad económica se usan reservas físicas, éstas pueden mantenerse en su nivel actual, aumentar (mejorar), disminuir (degradarse), o pasar de un uso a otro (destruirse). Esto último ocurre cuando se talan los bosques para dar un uso agrícola a la tierra, tal como sucede en el caso del sistema forestal, ya que no siempre es posible manejar todas las piezas de un ecosistema en forma armónica. Por un lado, puede que algunos recursos mejoren, mientras otros pueden mantenerse en los niveles anteriores al uso y, finalmente, otros que se degradan.

Dado que existen compensaciones, hay costos de oportunidad asociados a la búsqueda de sustentabilidad física de un recurso individual, o de un ecosistema. La magnitud de las oportunidades a las cuales se renuncia en términos del uso de los recursos productivos, debe

ser sopesada contra los beneficios que representa asegurar la sustentabilidad del ecosistema original. Para llevar a cabo este cálculo de decisiones, deberán valorarse de alguna manera, los beneficios y costos de las acciones alternativas (Conesa, 1997).

Los activos creados por el hombre son valorados como capital productivo y se amortizan contra el valor de la producción a medida que se deprecian. Los activos de recursos naturales no son valorados del mismo modo; y la pérdida de los mismos, no implica un débito contra el ingreso corriente que pudiera explicar la disminución de la producción potencial a futuro. Este elemento se basa en el supuesto implícito de que los recursos naturales son tan abundantes que carecen de valor marginal. Independiente de que los recursos estén o no en el mercado, ellos hacen un aporte significativo a la productividad económica de largo plazo. En términos rigurosos, los recursos naturales son activos económicos (Conesa, 1997).

SUSTENTABILIDAD Y SISTEMAS AGROPECUARIOS

Los sistemas agropecuarios son ecosistemas modificados por el hombre para satisfacer necesidades socioeconómicas. La concepción implícita de la tierra y agua como factores de producción infinitos y renovables, además de ser sustituibles por tecnología, ha sido una de las fuerzas motrices del desarrollo agrícola no sustentable (Viglizzo *et al.*, 1992).

El gran aumento de producción de granos en las últimas décadas, estuvo basado en el desarrollo y transferencia de tecnología generados a partir de la denominada revolución verde. La tecnología fue desarrollada, en general, para los sitios de mayor potencial productivo. Dada una cierta correlación entre ocupación de las tierras de mayor calidad y capacidad empresarial, los sectores más favorecidos fueron los que estuvieron ubicados en las mejores tierras (Ruttan, 1997). Los centros internacionales e instituciones locales, intentaron extender los beneficios de la revolución verde a zonas consideradas marginales y otros grupos sociales. Este enfoque contribuyó, en gran medida, a través del desmonte y reconversión productiva, al deterioro de grandes áreas en el mundo, comprometiendo, en algunos casos, las posibilidades del desarrollo futuro (Viglizzo *et al.*, 1992).

Se puede hacer una comparación de los sistemas de producción confrontando las estrategias opuestas de los sistemas de producción convencional y los sistemas de producción que en teoría deben tender a ser sustentables (integrado/ecológico). En estos últimos se considera una rotación de cultivos multifuncional y la incorporación de insumos orgánicos, en vez de los insumos físicos y químicos y aporte de energía.

Conway y Barbier (1990) definen sustentabilidad desde el punto de vista agropecuario, como la capacidad de mantener la productividad en condiciones de campo, predio o nación, en situaciones de estrés o shock. Sustentabilidad agrícola para el TAC (1989), citado por Nene (1993), involucra el manejo exitoso de los recursos de la agricultura, satisfaciendo los cambios en las necesidades humanas, manteniendo o mejorando la calidad del ambiente y conservando los recursos naturales. El término sustentabilidad determina, de esta forma, la persistencia o durabilidad de la productividad de un sistema en condiciones conocidas o posibles. Esta es una función de las características intrínsecas del sistema, de la naturaleza y dimensión de las situaciones de estrés a las que está sometido y, de los insumos humanos que pueden ser introducidos a contar de aquellas situaciones de estrés (Conway y Barbier, 1990).

La conservación de los recursos naturales exige la necesidad de mantener sus existencias. La perdurabilidad de las funciones esenciales de los ecosistemas, tales como circulación de nutrientes, productividad, mantenimiento de la calidad de aguas y otros, garantizan la sustentabilidad de la producción agropecuaria. El desafío presente debe contemplar tanto la recuperación de la base de recursos naturales de las áreas de mayor potencial productivo, como también la de las zonas marginales deterioradas (Viglizzo *et al.*, 1992).

Existen varias opciones para diversificar agroecosistemas. Así por ejemplo, se pueden reducir los costos de producción considerando reciclaje orgánico y, con ello reduciendo el uso de insumos y dando un valor agregado al producto. La tendencia hacia el desarrollo de sistemas de producción sustentables, sugiere reconocer las oportunidades y limitaciones que ofrece cada región ecológica, especialmente en lo que a recursos naturales disponibles concierne. De acuerdo con ello, es necesario diseñar los sistemas productivos adaptados a estas condiciones ecológicas, teniendo en cuenta su viabilidad desde una perspectiva socioeconómica (Viglizzo *et al.*, 1992; Thompson y Nardone, 1999).

MODELACIÓN DE SISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD

La evaluación de sustentabilidad de los sistemas agropecuarios mediante modelos matemáticos presenta una serie de ventajas, entre las que se pueden mencionar las cuatro siguientes:

- a Se realiza un manejo más eficiente de los recursos, ya que se hace evaluación de diferentes opciones de monitoreo no destructivo (simulación computacional).
- b Se pueden realizar evaluaciones de opciones de manejo que son demasiado costosas físicamente, o peligrosas, tales como la influencia de un invierno

con lluvia ácida sobre la producción de trigo de una región.

- c Es posible evaluar opciones de manejo que no pueden calificarse inmediatamente con experimentación física, por su requerimiento de escala de tiempo de muy largo plazo, como por ejemplo, la influencia de 100 años de irrigación con agua salina sobre un sitio dado.
- d Se puede obtener respuestas cuantitativas más precisas y en un menor plazo acerca de los efectos que pudiera tener un sistema de producción agrícola sobre su propia sustentabilidad y la de los recursos que se están utilizando.

Teniendo como marco las ventajas señaladas, se han diseñado y construido modelos de simulación que incorporan como componentes plantas, suelo o animales, las relaciones entre ellos y los factores externos como clima, para cuantificar la dinámica de las variables que incidan sobre la sustentabilidad del sistema estudiado. Una característica común de los modelos desarrollados es su aproximación a efectos secundarios unidos a la producción, que podemos considerar como parte de la idea global de sustentabilidad.

Debe distinguirse un modelo de simulación de una ecuación de regresión o un modelo de investigación operacional, cuya estructura obliga a adaptarse al modelo (Aguilar, 1997). De este modo, el modelo que se analizará tiene la característica de ser un conjunto de ecuaciones matemáticas que representan una hipótesis particular de funcionamiento, característica que diferencia a los modelos de simulación de cualquier otro modelo.

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE PEQUEÑOS PRODUCTORES DE LA ZONA DE CARCHI

La tendencia a integrar en un todo los componentes de estructuras complejas se ha ido incrementando en los últimos tiempos constituyéndose en toda una disciplina llamada Teoría General de Sistemas. El análisis de sistemas es un método que permite conceptualizar un sistema y organizar el conocimiento y los resultados de la investigación, con el objetivo de predecir o estudiar su funcionamiento.

Disponer de una herramienta que ofrezca la posibilidad de integrar la información sobre un sistema de producción determinado, la información experimental y los conceptos dentro de una lógica y una descripción cuantitativa de los procesos involucrados en el sistema, aparece como una buena alternativa que permitirá explorar los factores que en mayor o menor grado afectan un sistema de producción. Los modelos de simulación reúnen esas características y posibilitan orientar la respuesta a las interrogantes sobre los pro-

cesos del sistema en forma dinámica y rápida con la ayuda del computador.

Así tomando como base de apoyo la información disponible sobre el sistema de producción de pequeños productores de Carchi-Ecuador y la información de la investigación realizada y disponible, este estudio se plantea la hipótesis que es posible construir un modelo de simulación que permita determinar la importancia relativa de los factores que afectan la sostenibilidad del sistema de producción de pequeños productores de Carchi-Ecuador.

El objetivo general de este estudio es: “Analizar, mediante un modelo de simulación, los factores que afectan la sostenibilidad del sistema de producción de pequeños productores del Carchi-Ecuador”; y, los objetivos específicos son: 1) identificar las variables externas e internas que tienen mayor efecto sobre el sistema de producción; 2) estimar el desempeño económico del sistema de producción en relación con las variables externas e internas que lo afectan; y, 3) evaluar alternativas de manejo del sistema de producción sobre la base de las variables externas e internas que más afectan la sostenibilidad.

ANÁLISIS DEL SISTEMA

Los primeros estudios y adquisición sistemática de información en el Carchi, aplicando la Metodología del Análisis de Sistemas, se realizan a partir de 1991 en el marco del proyecto “Análisis del Sistema de Producción de Pequeños Productores de la Zona del Carchi-Ecuador”. Dicho proyecto es ejecutado por el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) y la Fundación para el Desarrollo Agropecuario (FUNDAGRO). El área de trabajo está conformada por las parroquias La Libertad, San Isidro, 27 de Septiembre y, El Ángel, pertenecientes al cantón Espejo, el que se encuentra ubicado entre los 0° 57' latitud norte y 77° 56' longitud oeste (Arce *et al.*, 1993). Con la información de base se hizo un diagrama conceptual del sistema de producción de Carchi-Ecuador que, junto con la información señalada, son la base del diseño del modelo de simulación.

El análisis del sistema comprende la tarea de entender las partes del sistema real y sus relaciones. En éste pueden detectarse aquellos factores más relevantes que afectan el problema en estudio, y que influyen en el objetivo especificado. Los grandes componentes considerados en el estudio son: clima, suelos, alternativa pecuaria, alternativa agrícola, alternativa forrajera (pastos), insumos agropecuarios y, mercado.

CLIMA

La zona en estudio se encuentra en altitudes que van desde 2.700 a 3.500 m, presenta una precipitación

media anual de 1012,90 mm y una media mensual de 81,4 mm. El déficit hídrico en esta área es entre 50 y 150 mm anuales y el número de meses secos está entre junio, julio, agosto y septiembre. La temperatura ambiental media anual es de 11,8° C y la humedad relativa, 78%.

El efecto del clima mediante la precipitación y la temperatura, con respecto a la pradera, se refleja a través de la tasa de crecimiento del pastizal. El clima también afecta el cultivo de papa, debido a que temperaturas bajas del suelo son determinantes de una débil actividad microbiológica, que no permite obtener los nutrientes necesarios.

SUELO

Los suelos predominantes de la zona en estudio son negro andinos, derivados de cenizas volcánicas del tipo Andepts o Andisoles. Son ricos en materia orgánica, profundos, buena retención de agua y de buena textura (arena arcillosos a arcillosos) (Uquillas, 1987; Hernández y Urriola, 1993).

El contenido de nitrógeno en los suelos de la sierra ecuatoriana es bajo. El fósforo es deficiente, ya que proviene de suelos de cenizas volcánicas y por lo tanto poseen una alta capacidad de fijación del elemento (INIAP, 1991). La mayoría de los suelos del Carchi tienen un alto contenido de potasio asimilable (Cáceres, 1991).

PASTIZAL

Las especies forrajeras de pastoreo existentes incluyen pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), festuca alta (*Festuca arundinacea*), holco (*Holcus lannatus*), rye grass perenne (*Lolium perenne*), rye grass anual (*Lolium multiflorum*) y trébol blanco (*Trifolium repens*). Las pasturas compuestas de gramíneas y leguminosas, contienen del 10 al 17 % de proteína cruda y entre 1,8 y 2,4 Mcal de energía metabolizable por kilogramo de materia seca.

ANIMAL

Según Arce *et al.* (1993) y PROTECA (1988), el 62 % de explotaciones tienen un promedio de 7 animales bovinos. Los animales con que cuentan en el sistema son de tipo mestizo, cruzado a niveles indeterminados de raza *Holstein*. La producción promedio de leche es de 7,5 litros/animal/día. Las categorías de animales con que cuentan los productores son: vacas en producción, vacas secas, vaconas vientre, vaconas fierro (>12 y <=18 meses), vaconas de media (>6 y <=12 meses), terneras (<=6 meses) y toro, básicamente.

CULTIVO DE PAPA (*SOLANUM TUBEROSUM*)

En Carchi, la producción de papa se realiza en altitudes que van desde 2.700 a 3.500 m. La mayor parte de cultivos de papa se encuentran en las laderas que circundan los valles y, en menor escala, en el páramo (Uquillas *et al.*, 1992). El área adecuada para el cultivo de papa es aquella cuya temperatura media anual está entre 6 y 14° C, con una disponibilidad de lluvia de alrededor de 700 a 1.200 mm. por año (FUNDAGRO, 1991a). En la provincia del Carchi, se siembra durante todo el año, pero con mayor frecuencia noviembre, diciembre y enero; junio y julio (Uquillas, 1987).

SISTEMA LECHE – PAPA

Los precios de la papa, tradicionalmente han estado influenciados por la oferta cíclica del tubérculo, pues los productores han disminuido el área de siembras cuando el precio ha estado por debajo de sus costos unitarios y han incrementado cuando este ha subido en el mercado. Cabe anotar que no sólo el fenómeno de la oferta y demanda intervienen en la formación de precios, sino también participan otros factores importantes tales como el nivel donde se comercializa (finca, mayorista, minorista), agentes que intervienen, variedad y calidad del producto, entre los principales (Mora, 1993).

Información del MAG-PRSA (1994) indica que durante el período de 1980 a 1993, el precio de la papa en el ámbito de productor tuvo variación, la cual presenta uno, dos y tres años de precios relativamente bajos, debido al incremento de la superficie sembrada de papa y por lo tanto una excesiva oferta del producto; y, un año donde los precios se incrementan, debido a que la superficie disminuye y por lo tanto también la oferta.

En respuesta a los precios bajos de la papa, los productores del Carchi reemplazan las áreas de cultivo con pastizales y viceversa si los precios del cultivo de papa se encuentran altos. Ésta es una de las principales razones por las cuales la ganadería de leche ha tomado gran importancia en una zona que por historia era únicamente papera (Uquillas *et al.*, 1992).

SÍNTESIS DEL MODELO

Una vez definidos los componentes relevantes del sistema a estudiar, éstos se organizaron en un sistema lógico. Esto implicó la elaboración de diagramas de flujo o algoritmos y la especificación de la forma en que las variables del sistema se relacionan, expresadas en forma matemática.

SUBROUTINA DE CONSUMO

En este modelo se estima el consumo de terneras, vaconas de media, vaconas fierro, vaconas vientre en gestación y, vacas secas en pastoreo, utilizando el índice de selección planteado por Aguilar (1997). En cambio, para el consumo de vacas en producción en pastoreo, se utiliza como base, el modelo propuesto por Durán (1983).

CONSUMO POTENCIAL

Tomando en consideración que el consumo potencial es función del peso vivo, se estableció una ecuación que determina que a medida que se incrementa el peso de los animales se incrementa el consumo como porcentaje del peso vivo.

$$CP = \left(\frac{2 + 0,002 \times W}{100} \right) \times W$$

donde:

CP: consumo potencial (kg MS/animal/día).

W: peso vivo, (kg/animal).

El consumo potencial de MS para las vacas secas se estima en un 2% del peso vivo. Este valor es propuesto por Paladines (1985) y García (1992), quienes consideran que ésta es una cifra estándar y que toma en cuenta el peso de la vaca más el peso del feto y del conceptus.

FACTOR DE CORRECCIÓN DEL CONSUMO POTENCIAL POR DISPONIBILIDAD

El factor de corrección por disponibilidad tiende a la unidad a medida que la disponibilidad aumenta, con lo que el consumo voluntario sería igual al consumo potencial si la digestibilidad no fuera limitante. Por otro lado, se aproxima a cero cuando la disponibilidad tiende a cero, es decir, el consumo voluntario disminuye, desde el consumo potencial, a medida que la disponibilidad disminuye.

$$FCDP = 1 - e^{(-0,001664 \times DS)}$$

donde:

FCDP: factor de corrección por disponibilidad.

DS: disponibilidad de forraje en el potrero, (kg MS/ha).

FACTOR DE CORRECCIÓN DEL CONSUMO POTENCIAL POR DIGESTIBILIDAD

En el modelo planteado se ajusta linealmente un factor de corrección para un rango de digestibilidad entre 40 y 80%.

$$FCDG = 1,675 \times DC - 0,34$$

donde:

FCDG: factor de corrección por digestibilidad.

DC: digestibilidad de la MS consumida, (%).

CONSUMO VOLUNTARIO

El consumo voluntario del forraje se calcula a partir del consumo potencial, corregido por factores de disponibilidad y digestibilidad.

$$CV = CP \times FCDP \times FCDG$$

donde:

CV: consumo voluntario de forraje (kg MS/animal/día).

CORRECCIÓN DE LA SELECTIVIDAD POR DIGESTIBILIDAD

Este factor se estima considerando los dos puntos extremos de selección por digestibilidad. Esta corrección permite relacionar la digestibilidad del material ofrecido con la digestibilidad del material consumido.

$$ISDG = 0,5 - 0,625 \times DG$$

donde:

ISDG: corrección de la selectividad por digestibilidad.

DG: digestibilidad de la MS ofrecida, (%).

CORRECCIÓN DE LA SELECTIVIDAD POR DISPONIBILIDAD

La relación entre selectividad y disponibilidad se hace tomando en cuenta el efecto de la disponibilidad por hectárea y la carga animal diaria; esto es:

$$PU = \frac{CP \times FCDP \times CA}{DS}$$

donde:

PU: porcentaje de utilización de la pradera.

CA: carga animal (UBA/ha).

DS: disponibilidad diaria de forraje (kg MS/ha).

Luego:

Si $PU > 0,5$ entonces $ISDP = 0$

Si $PU < 0,1$ entonces $ISDP = 1$

Si $PU < 0,5$ y $PU > 0,1$

entonces $ISDP = 1,25 - 2,5 \times PU$

donde:

ISDP: corrección de la selectividad por disponibilidad.

ÍNDICE DE SELECTIVIDAD

El índice de selección es igual a 1,25 (25%) cuando la digestibilidad es 40% y, si la digestibilidad es muy alta (80%), la selección será mínima alcanzando 0% cuando $SI=1$.

$$SI = 1 + ISDG \times ISDP$$

donde:

SI: índice de selectividad.

DIGESTIBILIDAD DE LA MS CONSUMIDA

La diferencia de digestibilidad entre lo ofrecido y lo consumido se debe a la selectividad que hace el animal en pastoreo.

$$DC = DG \times SI$$

donde:

DC: digestibilidad de la MS consumida, (%).

DG: digestibilidad de la MS ofrecida en el potrero, (%).

CONSUMO VACAS EN PRODUCCIÓN A PASTOREO

En el modelo el consumo potencial de forraje para vacas en producción se estima mediante la siguiente relación:

$$CPF = FEL \times \left(\frac{W \times FADIG}{1000} + FRP \right)$$

donde:

CPF: consumo potencial de forraje, (kg MS/animal/día).

W: peso vivo, (kg/animal).

FEL: factor de corrección del consumo por etapa de lactancia.

FADIG: factor de corrección por digestibilidad, (g MS/kg de peso).

FRP: factor de corrección del consumo por rendimiento de leche.

El consumo de materia seca en el ciclo lactación-gestación presenta una variación casi igual al de una curva de lactancia, excepto por el desfase de los puntos máximos, en donde el rendimiento máximo se produce varias semanas antes que el máximo consumo.

$$FEL = e^{(-1,9526+0,5121 \times \ln(X+20)-0,00397 \times X)}$$

donde:

FEL: factor de ajuste de consumo por lactancia.

X: días de la lactancia.

ln: logaritmo natural.

Para determinar el factor de corrección de consumo por digestibilidad se usa una relación entre el consumo de materia orgánica y la digestibilidad del forraje.

$$FADIG = 0,504 \times DG - 7,67$$

donde:

FADIG: factor de corrección por digestibilidad, (gr MS/kg de peso).

DG: digestibilidad de la MS, (%).

Para corregir el consumo por rendimiento de leche se usa el valor de 0,4 kg extra de MS consumida por kg extra producido sobre los 5.000 kg de leche, o que se deje de producir por debajo de este valor.

$$FRP = \left(\frac{RENDIPO - 5.000}{305} \right) \times 0,4$$

donde:

FRP: factor de rendimiento potencial.

RENDIPO: rendimiento potencial de leche durante la lactancia.

Se estima el consumo real de forraje, corrigiendo el consumo potencial por un factor de disponibilidad.

$$CVF = CPF \times FCDP$$

donde:

CVF: consumo real de forraje, (kg MS/animal).

El efecto del consumo de concentrado sobre el consumo de forraje en animales a pastoreo, muestra que a disponibilidades de forraje que no limita el consumo, inevitablemente se produce sustitución de MS del forraje por MS del concentrado, de manera que el efecto esperado de la suplementación no es totalmente aditivo. Según Holmes y Jones (1964), citados por Aguilar (1997), el grado de sustitución es aparentemente proporcional a la digestibilidad del forraje, y la ecuación que mejor representa la relación es:

$$CF = 1,27 - DG \times 0,0154$$

donde:

CF: efecto aditivo neto en consumo de MS por kg de consumo de concentrado.

DG: digestibilidad de la MS ofrecida en el potrero, (%).

Para efectos del modelo se consideró las relaciones estimadas por Aguilar (1997) en un modelo de consumo de vacas lecheras a pastoreo. Se asume que la disponibilidad es limitante cuando el factor de corrección por disponibilidad es menor que 0,984. En este caso se tiene que:

$$DI = CPF - CVF$$

donde:

DI: efecto complementario del concentrado.

SUBROUTINA DE PARTICIÓN DE ENERGÍA

La relación EM/ED para una serie de pastos provenientes de zonas templadas es de 0,81. La materia orgánica digestible (MOD) y EM pueden entonces relacionarse, asumiendo un valor calórico constante de 4,4 Mcal/kg de MOD para estimar la energía digestible (Cañas y Aguilar, 1992).

$$EMF = 4,4 \times DG \times 0,81$$

donde:

EMF: energía metabolizable del forraje, (Mcal/kg de MS).

DG: digestibilidad, (%).

Para el caso de los animales que se encuentran en crecimiento, el consumo de energía metabolizable que proporciona el forraje está dado por:

$$CEM = CRF \times EMF$$

donde:

CEM: consumo de energía metabolizable del forraje, (Mcal).

Para el caso de los animales que se encuentran en producción y gestación, así como para terneros, el consumo de energía metabolizable total es:

$$CEMTO = CVF \times EMF + MSC \times EMC$$

donde:

CEMTO: consumo de energía metabolizable del forraje, (Mcal).

MSC: materia seca del concentrado, (kg).

EMC: energía metabolizable concentrado (Mcal/kg MS).

La concentración energética de la ración está dada entre la energía metabolizable y la energía bruta. Se admite el supuesto que el valor calórico de la materia seca de los alimentos más utilizados por rumiantes sea 4,4 Mcal/kg MS.

$$CEMT = \frac{EMF}{4,4} \times 100$$

donde:

CEMT: Concentración energética de la ración (Mcal).

REQUERIMIENTO DE MANTENCIÓN

En este modelo se calcula el requerimiento de mantención sobre la base de la eficiencia de utilización de la energía metabolizable de mantención.

$$KM = \frac{(54,6 + 0,3 \times CEMT)}{100}$$

donde:

KM: eficiencia de utilización de la energía metabolizable para mantención.

Para el cálculo del requerimiento de mantención se tomó en consideración el valor del metabolismo de ayuno informado por el ARC (1980), que es:

$$MA = 0,1267 \times W^{0,67}$$

donde:

MA: metabolismo de ayuno, (Mcal).

W: peso vivo, (kg).

El requerimiento para mantención se estima de la forma:

$$RM = \left(\frac{MA}{KM} \right) + 0,00103 \times W$$

donde:

RM: requerimiento de mantención, (Mcal de EM/día).

W: peso vivo, (kg).

El valor de 0,00103 Mcal de EM/kg de peso vivo equivale a un gasto normal de actividades corporales (ARC, 1980). El requerimiento de mantención para las vacas secas y animales en crecimiento se establece con la ecuación informada por Lofgreen y Garrett (1968), citados por Aguilar (1997).

$$RM = \frac{\left(\frac{80 \times W^{0,75}}{KM} \right)}{1000}$$

donde:

RM: requerimiento de mantención, (Mcal de EM/día).

W: peso vivo, (kg).

REQUERIMIENTO COSTO DE COSECHA

Se utiliza el término de disponibilidad calórica de la pradera, que corresponde a la cantidad de forraje existente en la pradera multiplicado por la energía metabolizable del forraje.

$$DISC = DIS \times EMF$$

donde:

DISC: disponibilidad calórica de la pradera (Mcal/ha).

DIS: disponibilidad de MS/ha.

Se considera costo de cosecha como el gasto de energía que hace el animal al procurar el alimento (Cañas y Gastó, 1974), entonces:

$$RCC = W \times 0,18267 \times (DISC - 922,66)^{(-0,40017)}$$

donde:

RCC: requerimiento costo de cosecha, (Mcal de EM/día).

W: peso vivo (kg).

REQUERIMIENTO DE GESTACIÓN

Durante la preñez, una parte del consumo de energía metabolizable debe destinarse para gestación, independiente del requerimiento de mantención y cambio de peso.

$$RG = 0,27 \times e^{(0,0106 \times T)}$$

donde:

RG: requerimiento de gestación, (Mcal de EM/día).

T: número de días de gestación

Utilizando la ecuación estimada por Hazard (1984) para estimar el peso del útero en la etapa de gestación, se construyó una ecuación que calcula la ganancia de peso diario durante la gestación, producto del incremento del peso del útero.

$$PURVS = 0,016532 - 0,000028 \times T + 0,00000939 \times T^2$$

donde:

PURVS: ganancia de peso del útero, (kg/día).

T: número de días de gestación.

REQUERIMIENTO PRODUCCIÓN DE LECHE

Aguilar (1997) plantea un modelo para producción de leche, en el cual consideran tres períodos, en los cuales se produce una variación en el valor calórico de la leche. Los valores de energía neta (ENPL) considerados son:

Período de Lactancia (días)	Valor Calórico (ENPL/kg)
141 a 305	0,730
29 a 140	0,703
1 a 28	0,725

El ARC (1980) señala que la variación en la eficiencia de utilización de la energía para leche (KPL) se encontraría afectada por la metabolizabilidad de la dieta, de la siguiente forma:

$$KLP = \left(\frac{0,35 \times EMF}{4,4} \right) + 0,42$$

donde:

KPL: eficiencia de utilización de la energía para leche.

Conociendo el KPL es posible calcular el requerimiento de EM necesario para producir un kg de leche, según la siguiente expresión:

$$RPL = \frac{ENPL}{KPL}$$

donde:

RPL: requerimiento producción de leche, (Mcal de EM/kg de leche).

PRODUCCIÓN POTENCIAL DE LECHE

La ecuación utilizada se obtuvo parametrizando la curva de lactancia, de modo que el rendimiento diario potencial de leche se estima como porcentaje del rendimiento total, calculado a los 305 días de lactancia.

$$PP = RP \times e^{(-5,7499 + 0,1027 \times \text{LOG}(DLL) - 0,003 \times DLL)}$$

donde:

PP: producción potencial del día, (kg).

RP: producción potencial total, (kg).

DLL: día de la lactancia.

SUBROUTINA DE MANEJO DE PRADERAS

En el modelo, la tasa de crecimiento potencial diaria del pastizal se ve afectada por algunos factores, entre los que se encuentran: la disponibilidad de MS que lo afecta diariamente, el clima con las precipitaciones y la temperatura que lo afecta mensualmente y, el suelo descrito por el contenido de nutrientes, que lo afectan anualmente.

EFEECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE LA MS

Se estableció un factor de corrección del crecimiento sobre la base de la disponibilidad, asumiendo un crecimiento máximo cuando la disponibilidad se encuentra entre los 2.000 y 3.000 kg MS/ha. El $R^2=0,98$ y la relación es:

$$FCCD = -0,175 + 0,000875 \times DS - 0,00000016 \times DS^2$$

donde:

FCCD: factor de corrección del crecimiento por disponibilidad.

DS: disponibilidad diaria de MS, (kg/ha).

EFEECTO DE LA PRECIPITACIÓN

Paladines (1985) considera que precipitaciones anuales entre 300 y 800 mm (25 y 66 mm mensuales), son deficientes para el crecimiento de las pasturas en la sierra ecuatoriana. Tomando en consideración estos valores, se construyó un factor de corrección, asumiendo que cuando las precipitaciones mensuales son mayores a 80 mm, el crecimiento no se ve afectado. La ecuación establecida y que tiene un $R^2=0,98$, es la siguiente:

$$FCPR = 0,131704 + 0,015616 \times PRE - 0,000069 \times PRE^2$$

donde:

FCPR: factor de corrección del crecimiento por precipitación.

PRE: precipitación promedio mensual, (mm).

EFEECTO DE LA TEMPERATURA

Según Pearson e Ison (1989), las temperaturas óptimas para el crecimiento de gramíneas y leguminosas de clima templado son entre 18 y 22° C. Estos autores encontraron factores de corrección para el crecimiento de las pasturas con respecto a la temperatura. Sobre la base de esta información se estableció para el modelo la siguiente ecuación, cuyo $R^2=0,98$:

$$FCCT = -0,4397 + 0,0854 \times TEM - 0,00091 \times TEM^2$$

donde:

FCCT: factor de corrección del crecimiento por temperatura.

TEM: temperatura promedio mensual, (°C).

EFEECTO DE LA FERTILIZACIÓN

Los nutrientes tomados en consideración son el nitrógeno, fósforo y potasio. El factor de corrección debido a estos elementos tiene relación con la cantidad total de MS/ha/año de forraje de la pradera, que se puede conseguir cuando ésta ha sido manejada en condiciones óptimas de fertilización. Según datos informados por REPAAN (1993), en la sierra ecuatoriana se consigue de 12.000 a 14.000 kg MS/ha/año de forraje; sin embargo, se estima que se pudieran conseguir entre 16.000 y 18.000 kg MS/ha/año de forraje, si las condiciones de manejo fueran intensivas (fertilización y agua). Tomando en consideración un valor promedio de 15.000 kg MS/ha/año de forraje, se corrigió el crecimiento de la siguiente forma:

Nitrógeno

Se asume un contenido de proteína en el forraje de 12%, con el que se obtiene el máximo contenido de nitrógeno que requieren las plantas que es de 288 kg/ha. La ecuación encontrada para este factor, con $R^2=0,99$, es la siguiente:

$$FCCN = 0,003472 \times NIT$$

donde:

FCCN: factor de corrección del crecimiento por nitrógeno.

NIT: cantidad de nitrógeno disponible para la planta, (kg/ha)

Fósforo

Asumiendo un contenido promedio de fósforo en el forraje de 0,325% (Guerrero, 1989), se obtuvo que el máximo contenido de fósforo que requieren las plantas es de 48,75 kg/ha. La ecuación establecida para este factor, con $R^2=0,98$, es la siguiente:

$$FCCF = 0,000211 + 0,020508 \times FOS$$

donde:

FCCF: factor de corrección del crecimiento por fósforo.

FOS: cantidad de fósforo disponible para la planta, (kg/ha)

Potasio

Se asume un contenido promedio de potasio en el forraje de 2,5% (Guerrero, 1989). Con este valor, se obtuvo que el máximo contenido de potasio que requieren las plantas es de 375 kg/ha. La ecuación encontrada para este factor, con $R^2=0,99$, es:

$$FCCP = 0,002667 \times POT$$

donde:

FCCP: factor de corrección del crecimiento por potasio.

POT: cantidad de potasio disponible para la planta, (kg/ha)

Una vez que se han establecido los factores que corrigen el crecimiento por los tres nutrientes que determinan la fertilización, el crecimiento es corregido por el nutriente que se encuentre en menor cantidad (ley del mínimo).

Tasa de Crecimiento Real

El cálculo del crecimiento real, se establece como:

$$CREAL = CPOT \times FCPR \times FCCT \times FCCD \times FCCFERT$$

donde:

CREAL: crecimiento real de la pastura, (kg MS/ha/día).

CPOT: crecimiento potencial de la pastura, (kg MS/ha/día).

Senescencia

Hunt (1971) sugiere que las tasas de senescencia se encontrarían establecidas entre el 0,3 y 0,8% del total de la disponibilidad del pastizal existente. Para efectos del modelo se consideró una senescencia constante de 0,5%.

$$SENE = DS \times PSE$$

donde:

SENE: senescencia del pastizal, (kg MS/ha/día).

DS: disponibilidad diaria de MS, (kg/ha).

PSE: senescencia, (%).

Con el cálculo del crecimiento real de la pastura, el consumo voluntario de los animales y la senescencia, se puede establecer la disponibilidad de la MS de un potrero para un día cualquiera, dependiendo de si está o no en pastoreo. Si el potrero se encuentra en pastoreo el cálculo es:

$$DS = DS + CREAL - CV - SENE$$

donde:

DS: disponibilidad diaria de MS, (kg/ha).

Si el potrero no se encuentra en pastoreo, el cálculo es:

$$DS = DS + CREAL$$

SUBROUTINA DE CLIMA

Para este estudio se utiliza la información de la temperatura y precipitación informada por el Proyecto Carchi y la recolectada para un período de 14 años (1980–1993), en forma mensual. Con esta información por mes, se establecieron ecuaciones de periodicidad cíclica asociadas a la curva de Fourier (Little y Hills, 1978), la cual tiene las características de una curva polinomial; por lo tanto, permite la obtención de los parámetros mediante regresión múltiple. Para la zona en estudio, se pudo observar la ciclicidad del clima afectando la producción de los cultivos.

Las ecuaciones de periodicidad establecidas, únicamente permiten encontrar los diferentes valores para cada mes dentro de un año, pero no permite establecer la variación de temperaturas y precipitación que se presentan entre años. Para establecer esta diferencia se decidió utilizar una distribución de probabilidad, que para este caso es la uniforme, ya que ésta permite describir procesos estocásticos caracterizados por tener una probabilidad de ocurrencia constante e igual a un intervalo, e igual a cero fuera de ese intervalo (Shannon, 1988; Aguilar y Cañas, 1992; Naylor *et al.*, 1973).

SUBROUTINA DE LA DINÁMICA DE NUTRIENTES EN EL SUELO

Se utilizó un esquema simple de los nutrientes en la interacción suelo-planta-animal, basado en el "Método Racional", propuesto por Rodríguez (1993). Las entradas al sistema están dadas por el reciclaje de los residuos orgánicos provenientes de cultivos o de animales y por la fertilización orgánica e inorgánica. Las salidas del sistema son las pérdidas de nutrientes por lixiviación, volatilización o desnitrificación y, por la extracción de nutrientes en el producto cosechado.

En el modelo, el ciclo del nitrógeno, fósforo y potasio, parten estableciendo una comparación entre las fechas de la fertilización de establecimiento del pastizal y la última fertilización de mantenimiento, con la fecha de inicio de la simulación, para establecer la cantidad de nutrientes que quedan disponibles para el pastizal en el siguiente período.

CICLO DEL NITRÓGENO

Una vez establecida la comparación de fechas se calcula el nitrógeno total en el suelo.

$$NTOTAL = NICI \times DENAPA \times 20.000$$

donde:

NTOTAL: nitrógeno total, (kg/ha).

NICI: nitrógeno inicial, (%).

DENAPA: densidad aparente (kg/m³).

20.000: factor que determina la profundidad a la cual se establece el nitrógeno total, (m³).

El nitrógeno estabilizado y lábil iniciales, se estiman en un 21% y 2% del nitrógeno total, respectivamente. El nitrógeno inorgánico aportado por la fertilización constituye una de las entradas más importantes de nitrógeno al sistema. De éste, un 5% queda inmovilizado en la masa microbiana formando parte del suelo y un 15% es protegido en la matriz del suelo, incrementando así el nitrógeno estabilizado. El 80% restante del fertilizante pasa a formar parte del nitrógeno lábil. Debido a la eficiencia de la fertilización, que se considera para este caso en un 65%, las pérdidas de nitrógeno lábil se consideran en un 15%.

La tasa de mineralización del nitrógeno estabilizado que se hace disponible para la planta en el inicio de la simulación es del 9% y constituye un valor intermedio de los informados en la literatura que consideran entre 6 y 12%, (Matus, 1988). El nitrógeno lábil de iniciación se establece de la siguiente forma:

$$NLS_t = NES_t \times K_1 + NFER_{(t-1)} \times 0,15$$

donde:

NLS_t: nitrógeno lábil, (kg/ha).

NES_t: nitrógeno estabilizado, (kg/ha).

K₁:= tasa de mineralización del nitrógeno estabilizado, (%).

NFER_(t-1): nitrógeno de la fertilización, (kg/ha).

El nitrógeno disponible inicial para la planta, se calcula como:

$$NDIS_t = (NLS_t + NFER_t \times 0,85 + LEG) \times (1 - PERD)$$

donde:

NDIS_t: nitrógeno disponible para la planta, (kg/ha).

NFER_t: nitrógeno de la fertilización, (kg/ha).

PERD: pérdidas por desnitrificación y lixiviación, (%).

LEG: aporte de nitrógeno por la fijación simbiótica de las leguminosas, (kg/ha).

El aporte de las leguminosas debido a la fijación simbiótica, se considera en 90 kg, debido a que se asume que es el aporte cuando se encuentra entre un 10 a 15% en la pradera.

La cantidad de nitrógeno que la planta necesita para realizar sus actividades de desarrollo y crecimiento es:

$$NCRE_t = \frac{\left(\frac{CREA_t \times PRO}{6,25} \right)}{100}$$

donde:

NCRE_t: nitrógeno para crecimiento, (kg/ha).

CREA_t: crecimiento real de la pradera, (kg MS/ha).

PRO: contenido proteína del pastizal, (%).

6,25: constante de transformación de proteína a nitrógeno

El nitrógeno del pastizal es aprovechado para el consumo animal. El nitrógeno para consumo animal es:

$$NCON_t = \frac{\left(\frac{CVT_t \times PRO}{6,25} \right)}{100}$$

donde:

NCON_t: nitrógeno necesario para consumo animal, (kg/ha).

CVT_t: consumo voluntario total, (kg MS/ha).

PRO: contenido proteína del pastizal, (%).

Parte del consumo de nitrógeno por los animales va destinado a la producción de leche y carne, la misma que se establece como:

$$NGAN_t = \frac{\left(\frac{LECHE_t \times PROL}{6,25} + PESO \times \frac{PROP}{6,25} \right)}{100}$$

donde:

NGAN_t: nitrógeno destinado para producción animal, (kg/ha).

LECHE_t: producción de leche, (kg/ha).

PROL: contenido de proteína de la leche, (%).

PESO_t: ganancia de peso total, (kg/ha).

PROP: contenido de proteína de la carne, (%).

Obtenido el consumo y la ganancia de nitrógeno en los animales, se estima el nitrógeno que no es aprovechada por los animales y se pierde en las excretas.

$$NVOL_t = (NCON_t - NGAN_t) \times 0,4$$

$$NEES_t = (NCON_t - NGAN_t) \times 0,3$$

$$NELA_t = (NCON_t - NGAN_t) \times 0,3$$

donde:

NVOL_t: nitrógeno de la excretas que se volatiliza, (kg/ha).

NEES_t: nitrógeno de las excretas que se estabiliza, (kg/ha).

NELA_t: nitrógeno de las excretas que se labiliza, (kg/ha).

El porcentaje de utilización del nitrógeno de las praderas por parte de los animales considera el consumo de nitrógeno, como porcentaje de la cantidad necesaria de nitrógeno para el crecimiento de las plantas.

$$UTPR_t = \frac{NCON_t}{NCRE_t} \times 100$$

donde:

UTPR_t: porcentaje de utilización de la pradera

El porcentaje de utilización de la pradera permite establecer una relación inversa con el nitrógeno lábil de las excretas, el mismo que sirve para encontrar el contenido de nitrógeno en la hojarasca. La ecuación establecida es:

$$RUT_t = 29,12 \times e^{UTPR_t \times (-0,054)}$$

donde:

RUT_t: relación de utilización de la pradera con el nitrógeno lábil de las excretas, (%).

La relación encontrada para el contenido de nitrógeno en hojarasca es:

$$NHOJ_t = NELA_t \times RUT_t$$

donde:

NHOJ_t: contenido de nitrógeno en hojarasca (kg/ha).

Del nitrógeno de la hojarasca, un 50% pasa al nitrógeno estable y el otro 50% pasa al nitrógeno lábil.

El reciclaje interno de nitrógeno, que es aquella proporción del nitrógeno que no ha sido utilizado ni por los animales ni por las plantas, se establece de la siguiente forma:

$$RECI_t = NCRE_t - (NCON_t + NHOJ_t)$$

donde:

RECI_t: reciclaje interno, (kg/ha).

El nitrógeno estabilizado para el siguiente período es:

$$NES_{(t+1)} = NES_t + NFER_t \times 0,15 + NEES_t + NHOJ_t \times 0,5 + DIF \times 0,8$$

donde:

NES_(t+1): nitrógeno estabilizado, (kg/ha).

NES_t: nitrógeno estabilizado, (kg/ha).

NFER_t: nitrógeno de la fertilización anterior (kg/ha).

DIF: diferencia entre el nitrógeno disponible t y el nitrógeno para crecimiento t (kg/ha).

El nitrógeno lábil para el siguiente año es:

$$NLS_{(t+1)} = NHOJ_t \times 0,5 + NELA + NFER_{(t+1)} \times 0,15 + NES_t \times 0,09$$

donde:

NLS_(t+1): nitrógeno lábil, (kg/ha).

NFER_(t): nitrógeno de la fertilización, (kg/ha).

NES_t: nitrógeno estabilizado, (kg/ha).

El nitrógeno disponible para el siguiente año para la planta se establece como:

$$NDIS_{(t+1)} = (NLS_t + NFER_{(t+1)} \times 0,85 + LEG + RECI_t) \times (1 - PERD)$$

donde:

NDIS_(t+1): nitrógeno disponible, (kg/ha).

PERD: pérdidas por desnitrificación y lixiviación, (%).

LEG: aporte de nitrógeno por la fijación simbiótica de las leguminosas, (kg/ha).

NFER_(t+1): nitrógeno de la fertilización, (kg/ha).

CICLO DEL FÓSFORO

Para efectos del modelo se considera que son cuatro los componentes del sistema del fósforo en el suelo: el fósforo disponible para la planta, el fósforo orgánico, el fósforo inorgánico y el fósforo fijado.

Para calcular la fracción del fósforo del fertilizante aplicado, que permanece lábil en el tiempo después de la reacción rápida, se establece la siguiente relación:

$$ER = (1 + 0,2987 \times TEM)^{-0,15}$$

donde:

ER: efectividad residual.
 TEM: 365 * años.
 0,2987: coeficiente de temperatura.
 0,15: tasa de reducción del fósforo lábil.

El fósforo del fertilizante que puede ser aprovechada en el tiempo, se establece como:

$$PFRR = PFER \times ER$$

donde:

PFRR: fósforo residual del fertilizante, (kg/ha).
 PFER: fósforo de la fertilización, (kg/ha).

La efectividad inicial, la cual representa a la fracción del fósforo del fertilizante que permanece inicialmente lábil, se calcula con la derivada en el tiempo cero de la función de efectividad residual.

La cantidad de fósforo que se encuentra en el suelo disponible para el pastizal al iniciar la simulación, se establece como:

$$PD_t = PPM \times 2 \times DENAPA$$

donde:

PDt: fósforo disponible, (kg/ha).
 PPM: contenido de fósforo disponible, (ppm).
 2: factor que determina la profundidad a la cual se establece el fósforo disponible, (m³).
 DENAPA: densidad aparente, (kg/m³).

El fósforo total que queda en el suelo se establece como:

$$PTOT = PPMT \times 2 \times DENAPA - PD_t$$

donde:

PTOT: fósforo total en el suelo, (kg/ha).
 DENAPA: densidad aparente, (kg).
 PPMT: contenido de fósforo total del suelo, (ppm).
 2: factor que determina la profundidad a la cual se establece el fósforo total, (m³).

Para la zona en estudio, la capacidad de fijación del fósforo como fosfatos es elevada, presentando como promedio un 70% del fósforo total en el suelo. El fósforo inorgánico en el suelo es entre el 18 y 20% del fósforo total del suelo. La cantidad de fósforo que queda disponible para la planta al inicio de la simulación, se establece como:

$$PPL_t = PD + PFRR + PFER_t \times 0,3$$

donde:

PPL_t: fósforo disponible total, (kg/ha).
 PFER_t: fósforo del fertilizante, (kg/ha).

El fósforo orgánico, inorgánico y fijado, se calculan inicialmente para establecer las relaciones de pérdida y ganancia que ellos sufren. Así, se tiene que el fósforo orgánico para empezar el período está constituido por el 75% del fósforo orgánico inicial, ya que el 5% de

éste se fija y el 20% se hace inorgánico. La relación establecida es:

$$POR_t = POR_i \times 0,75$$

donde:

POR_t: fósforo orgánico, (kg/ha).
 POR_i: fósforo orgánico inicial, (kg/ha).

El fósforo inorgánico para empezar el período se establece sobre la base del 92% del fósforo inorgánico inicial, ya que el 8% de este fósforo se fija. La relación establecida es:

$$PIN_t = (PIN_i \times 0,92 + POR_i \times 0,2 + PFI_i \times 0,02) - PD_t$$

donde:

PIN_t: fósforo inorgánico, (kg/ha).
 PIN_i: fósforo inorgánico inicial, (kg/ha).
 POR_i: fósforo orgánico inicial, (kg/ha).
 PFI_i: fósforo fijado inicial, (kg/ha).

El fósforo fijado para empezar el período es el 98% del fósforo fijado inicial, mientras el 2% restante pasa al fósforo inorgánico. La relación es:

$$PFI_t = PFI_i \times 0,98 + POR_i \times 0,05 + PIN_i \times 0,08$$

donde:

PFI_t: fósforo fijado, (kg/ha).
 PFI_i: fósforo fijado inicial, (kg/ha).
 POR_i: fósforo orgánico inicial, (kg/ha).
 PIN_i: fósforo inorgánico inicial, (kg/ha).

La cantidad de fósforo que la planta necesita para sus actividades de desarrollo y crecimiento, se estima como:

$$PCRE_t = CREA_t \times FOS$$

donde:

PCRE_t: fósforo para crecimiento, (kg/ha).
 CREA_t: crecimiento real de la pradera, (kg MS/ha).
 FOS: contenido fósforo del pastizal, (%).

El fósforo del pastizal consumido por los animales es:

$$PCON_t = CVT_t \times FOS$$

donde:

PCON_t: fósforo necesario para consumo animal (kg/ha).
 CVT_t: consumo voluntario total, (kg MS/ha).
 FOS: contenido fósforo del pastizal (%).

No todo el fósforo que consumen los animales es aprovechado para la producción de leche y carne, ya que una buena parte del consumo se elimina vía excretas. La ecuación establecida es:

$$PGAN_t = LECHE_t \times FOSL + PESO_t \times FOSP$$

donde:

PGAN_t: fósforo destinado para producción animal, (kg/ha).

LECHE_t: producción de leche, (kg/ha).
 FOSL: contenido de fósforo de la leche, (%).
 PESO_t: ganancia de peso total, (kg/ha).
 FOSP: contenido de fósforo de la carne, (%).

El fósforo que no es aprovechado por los animales y se pierde en las excretas, pasa a formar parte del fósforo orgánico. La relación encontrada es:

$$PORE_t = PCON_t - PGAN_t$$

donde:

PORE_t: fósforo de las excretas, (kg/ha).

Para establecer la cantidad de fósforo que se elimina en la hojarasca, se toma en consideración el material senescente.

$$PHOJ_t = SEN_t \times FOS$$

donde:

PHOJ_t: fósforo de la hojarasca, (kg/ha).
 SEN_t: forraje senescente, (kg/ha).
 FOS: contenido fósforo del pastizal, (%).

El reciclaje interno de fósforo se establece como:

$$RECP_t = PCRE_t - (PCON_t + PHOJ_t)$$

donde:

RECP_t: reciclaje interno de fósforo, (kg/ha).

El fósforo fijado para un nuevo período, se estima como:

$$PFI_{(t+1)} = PFI_t \times 0,98 + PFRR + PDIF \times 0,3 + POR_t \times 0,06$$

donde:

PFI_(t+1): fósforo fijado, (kg/ha).
 PFI_t: fósforo fijado, (kg/ha).
 PDIF: diferencia entre el fósforo disponible t y el fósforo para crecimiento t, (kg/ha).

El fósforo orgánico para un nuevo período se establece como:

$$POR_{(t+1)} = POR_t \times 0,9 + PORE_t + PHOJ_t$$

donde:

POR_(t+1): fósforo orgánico, (kg/ha).

El fósforo inorgánico para un nuevo período es:

$$PIN_{(t+1)} = PIN_t \times 0,92 + PFI_t \times 0,02 + POR_t \times 0,04 + PDIF \times 0,7 + PFRR$$

donde:

PIN_(t+1): fósforo inorgánico, (kg/ha).
 PDIF: diferencia entre el fósforo disponible y el fósforo para crecimiento, (kg/ha).

El fósforo disponible para el siguiente año tiene relación con el fósforo disponible y el fósforo inorgánico.

$$PD_{(t+1)} = PD_t + (0,019 \times (PIN_{(t+1)} - PIN_t))$$

donde:

PD_(t+1): fósforo disponible, (kg/ha).

El fósforo total que queda disponible para la planta en el siguiente período está dado por:

$$PPL_{(t+1)} = PD_{(t+1)} + PFRR + PFER_{(t+1)} \times 0,3 + RECP_t$$

donde:

PPL_(t+1): fósforo disponible total, (kg/ha).
 PFER_(t+1): fósforo del fertilizante, (kg/ha).

CICLO DEL POTASIO

Una vez establecida la comparación de fechas se procede a calcular la cantidad de potasio disponible en el suelo, mediante:

$$KD_i = MEQ \times 390 \times 2 \times DENAPA$$

donde:

KD_i: potasio disponible, (kg/ha).
 MEQ: cantidad de potasio, (meq/100 g).
 390: peso molecular del potasio
 2: factor que determina la profundidad a la cual se establece el potasio disponible, (m³).
 DENAPA: densidad aparente, (kg/m³).

Con el valor establecido del potasio por análisis de suelo, se calcula el potasio de la solución mediante:

$$KSO_t = KD_i + KFER_{(t-1)} + KFER_t \times 0,45$$

donde:

KSO_t: potasio de la solución, (kg/ha).
 KFER_(t-1): potasio de la fertilización, (kg/ha).
 KFER_t: potasio de la fertilización, (kg/ha).

Con un dato inicial del potasio no intercambiable y el potasio de las fertilizaciones, se establece el potasio no intercambiable para el período, mediante:

$$KNI_t = KNI_i \times 0,945 + KFER_{(t-1)} + KFER_t \times 0,25$$

donde:

KNI_t: potasio no intercambiable, (kg/ha).
 KNI_i: potasio no intercambiable, (kg/ha).
 KFER_(t-1): potasio de la fertilización, (kg/ha).
 KFER_t: potasio de la fertilización, (kg/ha).

El potasio intercambiable del período se establece con el potasio inicial intercambiable, el potasio de las fertilizaciones y el 5,5% del potasio no intercambiable.

$$KIN_t = KIN_i \times 0,835 + KNI_i \times 0,055 + KFER_{(t-1)} + KFER_t \times 0,3$$

donde:

KIN_t: potasio intercambiable, (kg/ha).
 KIN_i: potasio intercambiable, (kg/ha).
 KFER_(t-1): potasio de la fertilización, (kg/h).

KFER_t: potasio de la fertilización, (kg/ha).

La cantidad de potasio total que queda disponible en la solución para ser aprovechado por la planta en su desarrollo, se establece como:

$$KDT_t = KSO_t + KIN_t \times 0,165$$

donde:

KDT_t: potasio disponible total, (kg/ha).

KIN_t: potasio intercambiable, (kg/ha).

La cantidad de potasio que la planta necesita para sus actividades de desarrollo y crecimiento, se establece como:

$$KCRE_t = CREA_t \times POT$$

donde:

KCRE_t: potasio para crecimiento, (kg/ha).

CREA_t: crecimiento real de la pradera, (kg MS/ha).

POT: contenido potasio del pastizal, (%).

El potasio utilizado por las plantas y que es aprovechado por los animales para su consumo, se estima como:

$$KCON_t = CVT_t \times POT$$

donde:

KCON_t: potasio necesario para consumo animal (kg/ha).

CVT_t: consumo voluntario total, (kg MS/ha).

POT: contenido potasio del pastizal, (%).

El potasio del pastizal que consumen los animales, es utilizado para la producción de leche y carne y el resto se elimina vía excretas. La ecuación es:

$$KGAN_t = LECHE_t \times POTL + PESO_t \times POTP$$

donde:

KGAN_t: potasio destinado para producción animal, (kg/ha).

LECHE_t: producción de leche, (kg/ha).

POTL: contenido potasio de la leche, (%).

PESO_t: ganancia de peso total, (kg/ha).

POTP: contenido potasio de la carne, (%).

El potasio que se pierde en las excretas, se estima como:

$$KEX_t = KCON_t - KGAN_t$$

donde:

KEX_t: potasio de las excretas, (kg/ha).

Una vez determinado el potasio que se elimina en las excretas, éste se distribuye en los diferentes compartimientos del potasio en el suelo. Así se tiene que:

$$KNIE_t = KEX_t \times 0,25$$

$$KINE_t = KEX_t \times 0,30$$

$$KSOE_t = KEX_t \times 0,45$$

donde:

KNIE_t: potasio no intercambiable de las excretas (kg/ha).

KINE_t: potasio intercambiable de las excretas (kg/ha).

KSOE_t: potasio de la solución de las excretas (kg/ha).

La cantidad de potasio de la hojarasca, se obtiene tomando en consideración el material senescente del pastizal. La función que representa esta relación es:

$$KHOJ_t = SEN_t \times POT$$

donde:

KHOJ_t: potasio de la hojarasca, (kg/ha).

SEN_t: forraje senescente, (kg/ha)

POT: contenido potasio del pastizal, (%).

De forma similar a lo que acontece con las excretas, el potasio de la hojarasca se distribuye en los compartimientos establecidos para el potasio en el suelo. Las relaciones son:

$$KNIH_t = KHOJ_t \times 0,25$$

$$KINH_t = KHOJ_t \times 0,30$$

$$KSOH_t = KHOJ_t \times 0,45$$

donde:

KNIH_t: potasio no intercambiable de la hojarasca, (kg/ha).

KINH_t: potasio intercambiable de la hojarasca, (kg/ha).

KSOH_t: potasio de la solución de la hojarasca, (kg/ha).

Con el potasio para crecimiento de las plantas, consumo de los animales y hojarasca, se calcula el reciclaje interno de potasio. Este reciclaje se establece como:

$$RECK_t = KCRE_t - (KCON_t + KHOJ_t)$$

donde:

RECK_t: reciclaje interno de potasio, (kg/ha).

Para establecer el potasio no intercambiable en el suelo para un nuevo período, se toma en consideración la relación:

$$KNI_{(t+1)} = KNI_t \times 0,12 + KNIH_t + KNIE_t + PDIF \times 0,7 + KFER_t \times 0,25$$

donde:

KNI_(t+1): potasio no intercambiable, (kg/ha).

KNI_t: potasio no intercambiable, (kg/ha).

KFER_t: potasio de la fertilización, (kg/ha).

PDIF: diferencia entre el potasio disponible y el potasio para crecimiento, (kg/ha).

El potasio intercambiable para un nuevo período se establece de la siguiente forma:

$$KIN_{(t+1)} = KIN_t \times 0,85 + KINH_t + KINE_t + PDIF \times 0,3 + KFER_t \times 0,30$$

donde:

- KIN_(t+1): potasio intercambiable, (kg/ha).
- KIN_t: potasio intercambiable, (kg/ha).
- KFER_t: potasio de la fertilización, (kg/ha).
- PDIF: diferencia entre el potasio disponible y el potasio para crecimiento, (kg/ha).

El 12% del potasio intercambiable inicial pasa a formar parte del potasio disponible total para la planta y el 3% se considera que se lixivia.

El potasio de la solución para un nuevo período se encuentra con la siguiente relación:

$$KSO_{(t+1)} = KSO_t \times 0,98 + KSOE_t + KSOH_t + KFER_{(t+1)} \times 0,45$$

donde:

- KSO_(t+1): potasio de la solución, (kg/ha).
- KFER_(t+1): potasio de la fertilización, (kg/ha).

Se considera que se pierde el 2% del potasio de la solución por lixiviación.

Con toda la información hasta aquí calculada, se procede a estimar la cantidad de potasio total que queda disponible para la planta en el siguiente período. La relación encontrada es:

$$KDT_{(t+1)} = KSO_{(t+1)} + KIN_t \times 0,12 + RECK_t$$

donde:

- KDT_(t+1): potasio disponible total, (kg/ha).

CICLO DEL CARBONO DE LA MATERIA ORGÁNICA

La dinámica de la materia orgánica en el suelo, se basa específicamente en el modelo propuesto por Alonso (1993) y García (1995).

SUBROUTINA DE LA PRODUCCIÓN DE PAPA

Esta subrutina estima la producción real de papa en kg/ha, partiendo de un rendimiento potencial que se calcula sobre la base de una ecuación lineal simple estructurada con información de fertilizaciones y rendimientos, informados por el Departamento de Suelos (INIAP, 1991), el Programa de Investigación en Producción Carchi (INIAP, 1992) y, Programa de Papa (INIAP, 1992) del Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador. Este rendimiento potencial es corregido por el tipo de variedades que utiliza el productor y, posteriormente por factores que afectan la producción como son: tipo de suelos, precipitaciones, temperaturas, control de male-

zas y aporques, control de plagas y enfermedades y, tamaño del tubérculo para la siembra.

RENDIMIENTO POTENCIAL DE PAPA

Tomando en consideración que las dosis de NPK se establecieron en rangos crecientes positivos, se estimó los coeficientes (b₀ y b₁), de las regresiones lineales independientes para cada elemento. Con los coeficientes (b₀), se obtuvieron los mínimos rendimientos que se pueden alcanzar cuando no existe aplicación de estos elementos; y con los coeficientes (b₁), se establecieron los incrementos que se pueden producir en el rendimiento, por cada unidad que se incrementen estos elementos. Esto permitió encontrar un pool de coeficientes (b₀) para establecer un rendimiento promedio conjunto cuando no exista fertilización y el incremento en la producción a base del Nitrógeno. Este elemento se tomó en consideración por tratarse de un mineral del cual se tiene mayor conocimiento en cuanto a su comportamiento en el suelo y su relación con la planta. La relación establecida es:

$$REN P = 9.096 + 114,42 \times NIT$$

donde:

- REN P: rendimiento potencial de papa, (kg/ha).
- NIT: fertilización nitrogenada, (kg/ha).

VALIDACIÓN

La validación es la aceptación, a través de procedimientos estadísticos adecuados, de un nivel aceptable de confianza, de tal modo que sean correctas las extrapolaciones al sistema real hechas desde las inferencias obtenidas con el modelo (Aguilar, 1997). En cambio, para Mertens (1977), la validación consiste básicamente en comparar los resultados que entrega el modelo respecto de los obtenidos en un experimento físico.

Los dos conceptos vertidos por los autores mencionados anteriormente, llevan implícitos el término comparación, de lo simulado y lo obtenido, mediante experimentos físicos. Por lo que el proceso de determinar en qué medida se ajusta el modelo a la representación de la realidad, es un proceso fundamental de comparación, la cual podría tener dos componentes básicos. Por una parte, aquella que permita la cuantificación previa conceptualización del sistema a estudiar y por otro lado, que permita determinar la bondad de ajuste del modelo con respecto a la realidad.

Dado que los modelos son una simplificación deliberada de la realidad, debe considerarse en la etapa de validación, que sólo tiene sentido realizarlo, respecto de los objetivos para los cuales fue planteado el problema (Brockington, 1979).

Debe resaltarse el hecho que este modelo permite seguir la evolución de los principales componentes del sistema y, puede predecir el funcionamiento de los

diferentes factores que lo afectan y conocer a través de ellos cuál es él o los efectos en el resultado final. Desde el punto de vista que se persigue, en cuanto a determinar los diferentes factores que afectan el sistema, éste puede ser un importante instrumento en la toma de decisiones del productor.

Según Brockington (1979) y Shannon (1988), el hecho que un modelo no puede ser validado en su totalidad, no lo limita en cuanto a la veracidad de los resultados que entregue. Señalan que la validación por partes de un modelo es generalmente más poderosa y confiable que la validación de resultados finales. Tomando en consideración este criterio, se decidió validar el modelo con la información de base sobre el sistema de producción en estudio informada por Arce *et al.* (1993), Valdivia (1993) y León-Velarde (1993). Esta validación se plantea el propósito de comparar aquellas subrutinas que se consideran más importantes y de las cuales se tienen información que permite ver el comportamiento del sistema en su conjunto. Las subrutinas tomadas en consideración son las de producción de leche y producción de papa.

Para el caso de la producción de leche, no se debe olvidar que las diferentes relaciones utilizadas para elaborar la subrutina de producción de leche, son aquellas establecidas por Durán (1983) y Aguilar (1997), que han sido validadas con diferentes trabajos de la literatura mundial. Por lo que a priori en este caso, se considera el buen funcionamiento de esta subrutina. Para la subrutina de papa a validar, se cuenta con información capaz de permitir comparar los valores obtenidos en el sistema y los informados por el modelo.

Para la validación de un modelo, se pueden utilizar diferentes procedimientos de comparación, entre ellos se encuentran el error porcentual del modelo, la comparación gráfica de resultados, la comparación de promedios y regresión.

VALIDACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE Y PAPA

Se toma en consideración que el sistema inicia su funcionamiento el 1 de enero de 1992 y, su período de producción sobre el cual se basa los beneficios del sistema es de 7 meses. Esta fecha determina la cantidad de lluvias y la temperatura establecidas durante el período en estudio.

El componente animal está compuesto por un hato lechero en donde se toma en cuenta un animal con su respectivo peso para cada una de las siguientes categorías: toro (420 kg), vacas en producción (400 kg) y secas (420 kg), vaconas vientre (320 kg), vaconas fierro (210 kg), vaconas de media (150 kg) y terneras (50 kg). Estos animales se encuentran pastoreando continuamente una pradera compuesta principalmente

por pastos naturales como holco (*Holcus lanatus*), kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y trébol blanco (*Trifolium repens*) y, en pequeñas cantidades un pasto artificial como el rye grass anual (*Lolium multiflorum*). La disponibilidad inicial instantánea es de 1.800 kg MS/ha, digestibilidad de 65%, energía metabolizable de 2,21 Mcal/kg MS y un crecimiento potencial de 50 kg/ha/día. La superficie establecida para el pastizal se estima en 3,31ha. Solamente se considera como alimentación suplementaria, la leche entera suministrada a los terneros y, pequeñas cantidades de concentrado durante los primeros días de destete.

En lo que respecta a la producción de papa, se considera un ciclo de producción de 6 meses, en el cual se utiliza la variedad denominada INIAP-Esperanza, una fertilización con 185 kg/ha de N, 421 kg de P₂O₅ y 117 kg de K₂O. Se establece que el tipo de terreno utilizado para la producción de papa es fértil; y que el control de plagas y enfermedades, así como el control de malezas y aporque, es regular.

Con esta información se procedió a realizar la simulación del sistema durante el período de 7 meses. La información de salida que entrega el modelo es amplia; sin embargo, como ya se explicó anteriormente, sólo es posible validar algunas variables de las cuales se conoce el promedio y la desviación estándar. Con estos valores es posible comparar simplemente a través de un test estadístico si los promedios del sistema físico y los calculados por el modelo pertenecen a una misma población. Para este efecto se utilizó la prueba de "t" de Student (González, 1985).

Las variables consideradas para la validación de la producción de leche son: la carga animal, la producción de leche promedio por día y promedio por hectárea, la venta de la producción de leche, el crecimiento del pasto promedio, día y la digestibilidad del pasto y, para la producción de papa son: el rendimiento potencial y el rendimiento real, obtenidos durante el período en estudio. Para estas variables se establecieron valores de "t" de Student con una probabilidad ($P > 0,05$), lo que significa que tanto los valores entregados por el modelo como los proporcionados por la información del sistema físico en estudio, pertenecen a la misma población.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de la modelación, la sustentabilidad de un sistema productivo tiene una relación más fuerte y fina con el sistema agroecológico en que está inserto, que con conceptos agronómicos generales. Es decir, un modelo de simulación se aproxima mejor al concepto de sustentabilidad de un sistema productivo en tanto sea más particular, ya que incluye el concepto en su objetivo y estructura del modelo. Por lo tanto, el desarrollo de modelos de simulación de sistemas de producción que incluyan el concepto de

sustentabilidad necesitan reconocer cada región ecológica y de acuerdo con ello diseñar los sistemas productivos específicamente adaptados, considerando su viabilidad socioeconómica.

La realización de una evaluación de un sistema productivo agrícola mediante un modelo de simulación debe considerar que los recursos naturales hacen un aporte significativo a la producción, por lo que constituyen activos económicos. Por lo tanto, es necesario incorporarlo como componente en la descripción del sistema, ya que si se deterioran como producto de la actividad económica, deben ser depreciados, con lo que afectarán los resultados económicos del sistema.

Se debe considerar la importancia de la modelación de sistemas como una disciplina que, utilizando la información que existe, puede ayudar a la resolución y evaluación cuantitativa de las alternativas de manejo de los sistemas productivos y su impacto sobre la sustentabilidad del sistema. El uso de la simulación podría ayudar a proponer políticas eficientes para corregir los problemas generados por diferentes estilos de agricultura junto con la evaluación de soluciones.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, C. 1997. Simulación de sistemas. Aplicaciones en producción animal. Colección en Agricultura. Facultad de Agronomía en Ing. Forestal, P. Universidad Católica de Chile. 241p.
- AGUILAR, C. y V. BARRERA. 1997. Evaluación de la sostenibilidad de una alternativa de manejo en el sistema de producción de pequeños productores de Carchi, Ecuador. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, 5(1): 1–20.
- ALONSO, M. 1993. Planteamiento de un modelo de simulación que permite el estudio de la dinámica de la materia orgánica en el suelo. Seminario presentado en el Departamento de Zootecnia. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Diciembre de 1993. 20 p.
- ARCE, B., V. BARRERA y J. SUQUILLO. 1993. Caracterización del Sistema de Producción del Pequeño Productor del Cantón Espejo, Provincia del Carchi: Resultados de la Encuesta Estática. Quito, Ecuador. 46 p.
- AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL (ARC). 1980. The nutrient requirements of ruminant livestock. London, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Slough, Gresham Press. 335 p.
- BARRERA, V. y C. AGUILAR. 1996. Modelo de simulación para el estudio de la sostenibilidad del sistema de producción de pequeños productores de Carchi, Ecuador. I Desarrollo del modelo y validación. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, 4(2): 135–166.
- BOYAZOGLU, J. 1998. Livestock farming as a factor of environmental, social and economic stability with special reference to research. Livestock Pro. Sci. 57: 1–14.
- BRITO, E., C. AGUILAR, R. CAÑAS y R. VERA. 1998a. Modelo de simulación para evaluar la sostenibilidad de las pasturas a través del tiempo en la altillanura colombiana. I Desarrollo y validación del modelo. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, 6(1):1–38.
- BRITO, E., C. AGUILAR, R. CAÑAS y R. VERA. 1998b. Sostenibilidad del *Brachiaria Dictyoneura* en tres suelos contrastantes de la altillanura colombiana. II Experimentación con un modelo de simulación. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, 6(1):39–58.
- BROCKINGTON, N. 1979. Computer Modeling in Agriculture. Oxford University Press. 155 p.
- CÁCERES, J. 1991. Fertilización. Aspectos tecnológicos del cultivo de papa en Ecuador. FUNDAGRO. Quito, Ecuador. pp. 89–105.
- CAÑAS, R. Y C. AGUILAR. 1992. Uso de la Bioenergética en producción de bovinos. In Simulación de Sistemas Pecuarios. RISPAL. San José, Costa Rica. pp. 9–100.
- CAÑAS, R. Y J. GASTO. 1974. Costo de cosecha y eficiencia de producción de ecosistemas ganaderos. Ciencia e Investigación Agraria (Chile) 1(4):177–185.
- COMISIÓN DE DESARROLLO Y MEDIO AMBIENTE DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. 1990. Nuestra propia agenda. Banco Interamericano de Desarrollo, Programa de las naciones unidas para el desarrollo.
- CONESA, V. 1997. Auditorías Medioambientales: Guía Metodológica 2ª Edición. Editorial Mundi Prensa. Madrid, España. 552 pp.
- CONWAY, G y E. BARBIER. 1990. Indicators for agricultural performance. En: After the green revolution. Southscan Publications, London.
- DASGUPTA, P. Y KG. MALER. 1991. El ambiente y los nuevos temas del desarrollo. En: Desarrollo y medio ambiente, un enfoque integrador. Compilado por J. Vial. 1991. CIEPLAN, Santiago, Chile. 228p.
- DIXON, J. y L. FALLON. 1989. El concepto de sustentabilidad: sus orígenes, alcances y utilidad en la formulación de políticas. En: Desarrollo y medio ambiente, un enfoque integrador. Compilado por J. Vial. 1991. CIEPLAN, Santiago, Chile. 228p.
- DURAN, H. 1983. Modelo de simulación para el estudio del manejo de sistemas pastoriles de producción de leche. Tesis Mag. Sc. en Producción

- Animal. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. 200 p.
- FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO AGROPECUARIO (FUNDAGRO). 1991a. Cómo cultivar mejor la papa. Cañar, Ecuador. 28 p.
- GARCÍA, A. 1993. El Concepto de Sustentabilidad y su Evaluación en Recursos Naturales y Sistemas Agropecuarios. Seminario III Programa de Magister en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- GARCÍA, A. 1995. A simulation model to predict the sustainability of soil resource in the agricultural production systems in Chile. *Revista IAAS, Bélgica* (en impresión).
- GARCÍA, F. 1992. Requerimiento de proteína en ganado lechero. En *Simulación de Sistemas Pecuarios*. Editado por Ruiz Manuel. RISPAL, San José, Costa Rica. pp. 101–131.
- GONZÁLEZ, G. 1985. *Métodos Estadísticos y Principios de Diseño Experimental*. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador. 371 p.
- GUERRERO, R. 1989. Fertilización de pastos mejorados. **In** *Fertilización de cultivos en clima frío*. Serie divulgativa No. 3. Bogotá, Colombia. pp. 157–175.
- HAZARD, S. 1984. Desarrollo de un Modelo de Simulación del Comportamiento de vacas lecheras a pastoreo con fines de transferencia de tecnología. Tesis Mag. Sc. en Producción Animal. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. 273 p.
- HERNÁNDEZ, C. y R. URRIOLOA. 1993. Los pequeños productores agropecuarios y la apertura comercial. IICA, ILDIS. CIGETRONIC Ltda., Quito, Ecuador. 116 p.
- HUNT, W. 1971. Leaf death and decomposition during pasture regrowth. *New Zelanda. Journal Agriculture Research*. 14:208–218.
- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS (INIAP). 1991. Informe anual del Departamento de Suelos. Quito, Ecuador. 35 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS (INIAP). 1992. Tecnologías disponibles de los principales cultivos del Ecuador. Coeficientes técnicos, costos. Editado por Juan Vega, Germán Diener y Vicente Novoa. Quito, Ecuador.
- LEÓN VELARDE, C. 1993. Planeamiento y acciones de seguimiento en el desarrollo de sistemas agropecuarios de la zona del Carchi. Informe de Consultoría REPAAN. Quito, Ecuador. 31 p.
- LITTLE, T. y F. JACKSON. 1978. *Agricultural experimentation design and analysis*, John Wiley and sons, New York. 350 p.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA PROYECTO PARA LA REORIENTACIÓN DEL SECTOR AGROPECUARIO (MAG–PRSA) 1994. Compendio estadístico agropecuario 1965–1993. Primer compendio estadístico agropecuario del Ecuador. Quito, Ecuador. 612 p.
- MAGRI, A., G. DONOSO y F. BAS. 1996. Cuantificación de la sustentabilidad productiva de un predio lechero en la zona central de Chile: una simulación con EPIC. *Ciencia e Investigación Agraria* 23 (2–3): 99–112.
- MATUS, F. 1988. Un modelo simplificado del Nitrógeno en la estimación de la fertilización nitrogenada. Tesis Magister Sc. Pontificia Universidad Católica de Chile. 98 p.
- MERTENS, D. 1977. Principles of modeling and simulation in teaching and research. *J. Dairy Sci.* 60(7): 1176
- MORA, X. 1993. Situación, perspectivas y alternativas de la papa en el Ecuador (1991–1993). MAG. Proyecto para la reorientación del sector agropecuario. Quito, Ecuador. 35 p.
- MUNASINGHE, M. y W. SHEARER. 1995. *Defining and measuring sustainability*. The Biogeophysical Foundations, World Bank and United Nations University, Washington D.C.
- NAYLOR, T., J. BALINTFY, D. BURDICK y K. CHU. 1973. *Técnicas de simulación en computadoras*. Sunderland, M and Karp, Trans. México. Editorial Limusa. 390 p.
- NENE, Y.L. 1993. Sustainable agriculture: future hope for developing countries. Glen Anderson Lecture. ICRISAT, Andhra Pradesh, India.
- OSTROM, E., J. BURGER, C. FIELD, R. NORGAARD y D. POLICANSKY. 1999. SUSTAINABLE: Revisiting the Commons: Local Lessons, Global Challenges. *Science* Vol 284 (5412) p 278–282.
- PALADINES, O. 1985. Manejo de praderas de clima templado. **In** *Producción lechera en la sierra ecuatoriana*. Ed. Caballero H. y Hervas, T. Quito, Ecuador. pp. 107–131.
- PALADINES, O. 1992. Metodología de pastizales para trabajar en fincas y proyectos de desarrollo agropecuario. PROFOGAN–MAG. Ediciones PROFOGAN. Quito, Ecuador. 219p.
- PEARSON, C. y R. ISON. 1989. *Agronomy of grassland systems*. Cambridge University Press. Great Britain. 169 p.
- PROGRAMA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO AGROPECUARIO (PROTECA). 1988. Diag-

- nóstico de la Provincia del Carchi. Ediciones PROTECA. Quito, Ecuador. 96 p.
- RED DE PASTIZALES ANDINOS (REPAAN). 1993. Producción y utilización de los pastizales de la zona altoandina: Compendio. Editado por León-Velarde, C. e Izquierdo, F. Quito, Ecuador. 228 p.
- RODRÍGUEZ, J. 1993. La fertilización de los cultivos: Un método racional. Colección en agricultura. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 291 p.
- RUTTAN, V. 1997. Sustainable Growth in Agricultural Production: Poetry, Policy, and Science. **In:** VOSTI, S., and REARDON, T. (eds). Sustainability, Growth, and Poverty Alleviation. A Policy and Agroecological Perspective. International Food Policy Research Institute. The Johns Hopkins University Press. London, Great Britain. p.19–33
- SHANNON, R. 1988. Simulación de Sistemas: Diseño, desarrollo e implantación. Editorial Trillas, México. 387 p.
- SURÍS, J. y M. VARELA. 1995. Introducción a la Economía de los Recursos Naturales. Editorial Civitas. Madrid, España. 133 pp.
- THOMPSON P. y A. NARDONE. 1999. Sustainable livestock production: methodological and ethical challenges. *Livestock Pro. Sci.* 61: 111–119.
- UQUILLAS, J. 1987. Informe del trabajo de campo de zonas de productores de papa. Carchi. FUNDAGRO. Documento provisional PRO. ASE.3. Quito, Ecuador. 32 p.
- UQUILLAS, J., Ch. CRISSMAN, W. PETERSON y K. DE WALT. 1992. La papa en los sistemas de producción agropecuaria de la sierra ecuatoriana. FUNDAGRO. Documento Técnico No. 2. Quito, Ecuador. 38 p.
- VALDIVIA, R. 1993. Visita de sondeo: Informe de entrevistas a productores del Cantón Espejo, Provincia del Carchi–Ecuador. Consultoría FUNDAGRO. Quito, Ecuador. 30 p.
- VIGLIZZO, E., T. SCHLICHTER y M. WINOGRAD. 1992. El INTA y el desarrollo agropecuario sustentable. Composición por E. Roberto. INTA, Argentina.
- VOSTI, S. y T. REARDON. 1997. Introduction: The Critical Triangle of Links among Sustainability, Growth, and Poverty Alleviation. **In:** VOSTI, S., and REARDON, T. (eds). Sustainability, Growth, and Poverty Alleviation. A Policy and Agroecological Perspective. International Food Policy Research Institute. The Johns Hopkins University Press. London, Great Britain. p.1–18
- WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. 1987. Our common future. Oxford University Press.