

# Simulación de un Modelo de Balance de Nitrógeno en el Sistema Suelo - Caña de Azúcar

<sup>1</sup>*Alessandra F. Bergamasco*, <sup>2</sup>*Luis H. A. Rodrigues*, <sup>3</sup>*Fabio C. da Silva*, <sup>4</sup>*Paulo C.O. Trivelin*

<sup>1</sup>*Becario de Maestría CAPES, Facultad de Ingeniería Agrícola/UNICAMP, Campiñas/SP*

<sup>2</sup>*Prof. Dr., FEAGRI/UNICAMP, Campiñas/SP*

<sup>3</sup>*Investigador Dr., CNPTIA/Embrapa, Campiñas/SP*

<sup>4</sup>*Prof. Dr., CENA/USP, Piracicaba/SP*

La caña de azúcar, cultivo de importancia en toda la región y en el mundo, todavía sufre la práctica de la quema de los rastrojos antes de la cosecha, lo que está siendo cuestionado por la alta emisión de gases (carbónico, de nitrógeno y azufre), además de provocar pérdidas significativas de nutrientes para las plantas, facilitar la emergencia de malezas y, de la erosión debido a la reducción de la protección del suelo.

Manteniendo las hojas y paja de la caña en el campo, luego del corte, se permite la conservación de la humedad, temperatura y principalmente la materia orgánica en el suelo, condiciones ideales para el desarrollo de la planta y de la población de microorganismos asociados al sistema.

La cobertura del suelo por la paja provocará cambios significativos en el manejo del cultivo y la dinámica del N, influyendo directamente en las prácticas de fertilización de las cañas socas, principalmente con relación a la fertilización nitrogenada, ya que el N es el nutriente que más limita la productividad de los cañaverales.

El objetivo de este estudio es utilizar el Modelo de Balance de Nitrógeno realizado en base al modelo CERES N, para el sistema suelo – caña de azúcar en un manejo sin quema. Los modelos de dinámica del nitrógeno pueden servir como un sistema de orientación para la recomendación de fertilizante nitrogenado en diferentes condiciones a través de distintos escenarios y orientación del manejo adecuado de los cañaverales, con el objetivo de obtener la máxima productividad del cultivo y el mejor uso de los recursos naturales e insumos.

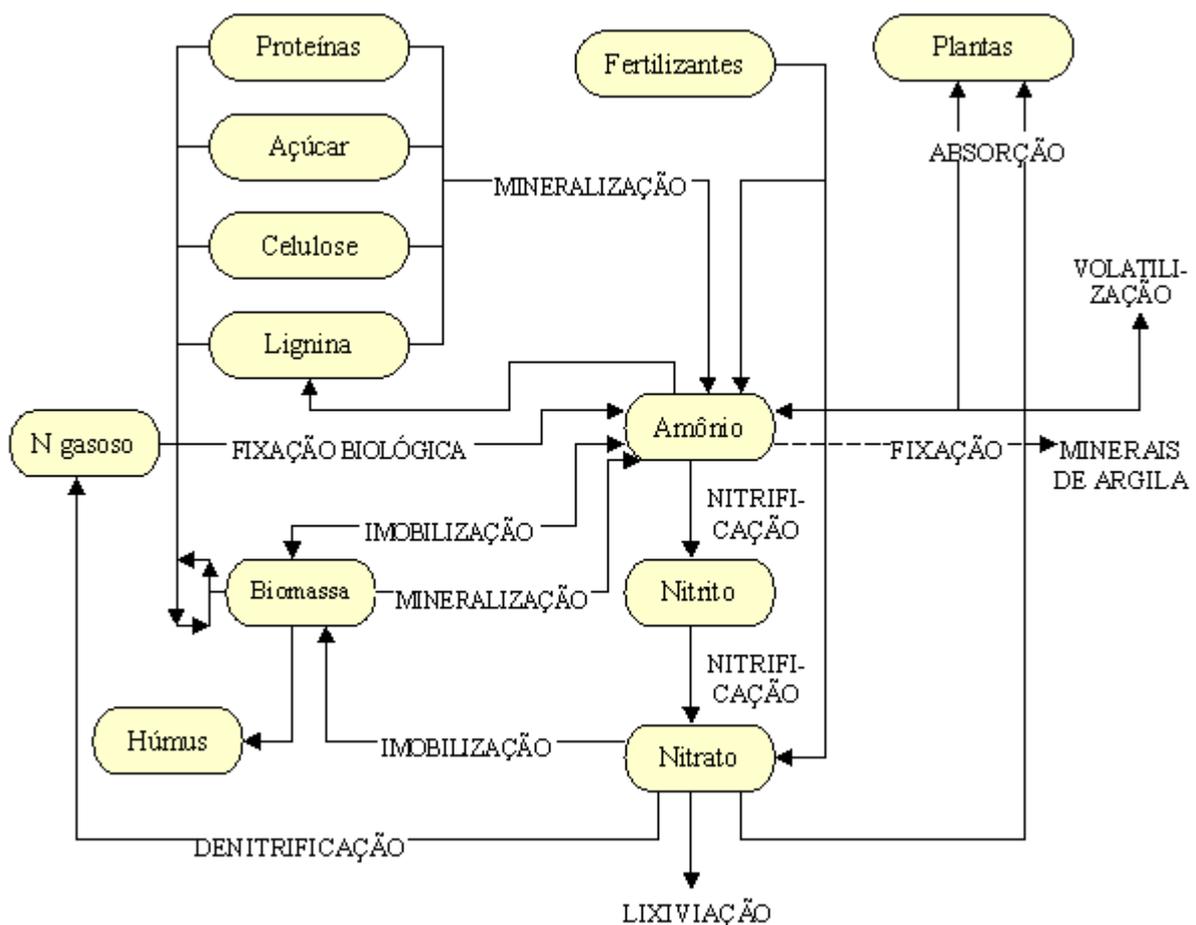
## Fertilización Nitrogenada en el Cultivo de Caña de azúcar

Del total del nitrógeno encontrado en la capa superficial del suelo, el 90 % está combinado orgánicamente y el resto es el nitrógeno inorgánico que puede ser aprovechado por las plantas. En la Figura 1, STEVENSON (1986) presenta un resumen de las transformaciones del nitrógeno del suelo como resultado del proceso de descomposición que sufren los materiales orgánicos. En esta figura es posible constatar la importancia de la actividad de los microorganismos en la inmovilización y mineralización, la fijación de nitrógeno en el humus y en los minerales de arcilla, las pérdidas por volatilización y lixiviación, las entradas de N del material orgánico y de los fertilizantes y, finalmente, la absorción por las plantas.

## Un modelo de simulación de escenarios

En el estudio del ciclo del N en agro ecosistemas, para fines de modelaje matemático, además del conocimiento de las vías internas de transferencia de nitrógeno y de sus tasas, debe conocerse las formas de entrada de N al sistema, que son las fuentes, y las salidas, o drenajes, del modelo, y la intensidad con que ocurren. En este modelo matemático que describe la dinámica del N en el sistema suelo - caña-de-azúcar, se utilizaron como entradas: fertilizante nitrogenado, paja remanente, materia orgánica ya existente en el suelo, amonio atmosférico y reserva biológica de N. Como salidas de nitrógeno, el modelo considera: remoción por la cosecha del N contenido en los tallos; lixiviación del nitrato en el suelo, fuera de alcance de exploración del sistema radicular; Perdidas gaseosas de NO, N<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub> del suelo (microorganismos desnitrificadores) y Volatilización del amonio.

**Figura 1.** Transformaciones del nitrógeno en el sistema suelo proveniente de residuos agrícolas y abonos (STEVENSON, 1986).



El Modelo de Balance de Nitrógeno completo (Figura 2) está dividido en colores, conforme a los caminos que el nitrógeno recorre en el sistema. Los compartimentos y relaciones que están en negro indican las pérdidas de nitrógeno del sistema; en azul están las entradas de N; en gris, el N en el suelo y los procesos que sufre; el verde indica la caña-de-azúcar, son los procesos que ocurren dentro de la planta, y en rojo, el resultado final del modelo, esto es, la cantidad de N en la caña soca.

En la simulación de situaciones que puedan ocurrir, o que son comunes a los productores, se buscan respuestas y auxilio en la toma de decisión en relación al mejor manejo de los fertilizantes nitrogenados en la obtención del mejor resultado en producción de sacarosa del cultivo de caña, con el menor costo posible y menor riesgo ambiental por contaminación.

### El balance del Nitrógeno en cada situación

Fueron creados escenarios con situaciones que pueden ocurrir en el campo, y simulaciones con el modelo, los resultados de los parámetros de salida, los cuales están presentados en las Tablas 1, 2 y 3.

En el escenario 1 (Tabla 1), ocurrieron diferencias significativas en las pérdidas de N en las tres dosis simuladas de N (0, 50 y 100 kg/ha), siendo que con la dosis de 100 kg/ha, (actualmente recomendada para el cultivo), las pérdidas suman 10% del tenor total de N en el sistema; en la dosis de 50 kg/ha, en 5%; y en la dosis de cero, no llegan a 0,5%.

**Tabla 1.** Escenario 1: Aplicación de N, fuente urea, incorporada al suelo, entre los meses de noviembre a febrero, con precipitación debajo de 10 mm.

Parámetros	N aplicado al suelo		
	0 kg/ha de N	50 kg/ha de N	100 kg/ha de N
	----- kg/ha -----		
Parámetros de entrada de N:			
1. Paja	50,00	50,00	50,00
2. MO del suelo	100,00	100,00	100,00
3. Fertilizante	0	50,00	100,00
4. Atmósfera	37,28	37,28	37,28
5. Reserva de la caña	10,00	10,00	10,00
Total de entrada	197,28	247,28	297,28
Parámetros de pérdida de N:			
1. N Desnitrificado	0,09	2,06	4,82
2. Pérdida de amonio	0	0	0
3. Pérdida de nitrato	0,48	10,76	25,24
Total perdido	0,57	12,82	30,06
Parámetro de N en el suelo:			
1. Humus	27,08	28,19	29,31
2. MO	43,67	46,17	48,67
3. Nitrato	0	0	6,59
4. N mineral	9,35	9,90	10,44
Total de N en el suelo	80,10	84,26	95,01
Parámetro de N en la planta:			
1. N en la caña-de-azúcar	116,61	150,20	172,21
Total de N en el sistema	197,28	247,28	297,28

En cuanto al contenido de N en la caña, para la dosis de 100 kg/ha de N, llego a 172 kg/ha, para la dosis de 50 kg/ha de N fue de 150, y para la del testigo, fue 116 kg/ha, luego de un período de 360 días. Según estudios de GAVA et al. (2001), el tenor de N en la caña soca, después de 299 días, para la dosis de 100 kg/ha de N, usando urea, fue de 172 kg/ha, valor próximo al encontrado por COALE et al. (1993).

A través del análisis del comportamiento del N en el suelo durante el ciclo del cultivo, se puede observar que existe influencia de la cantidad de fertilizante agregado al suelo en el tenor de N como MO, ya que al agregarse N al sistema la actividad de los microorganismos aumenta, además ese N agregado como fertilizante puede sufrir inmovilización y pasar a formar parte de la MO, sin embargo, esa influencia es pequeña. En el final del ciclo de la caña, quedará en el suelo, como MO, 16% del N que entró en el sistema para la aplicación de 100 kg/ha de N; y 22% del N que entró en el sistema cuando no hay aplicación de fertilizante. Eso indica que la adición de N en el sistema activa la mineralización de la MO. Así, la paja y otros vegetales celulósicos, si no fueran suplidos con nutrientes esenciales, deben ser considerados más una fuente de humus que como material fertilizante para las plantas.

La formación de humus es prácticamente igual en los tres casos (0, 50 y 100 kg/ha de N), sin embargo, en la dosis cero representa 14% y en la de 100 kg/ha de N, 10% del N total del sistema. El tenor de N mineral en la dosis cero permanece prácticamente constante del 3° mes hasta el final del ciclo, sin alcanzar un pico, en cuanto al tenor de nitrato queda abajo del N mineral y del humus. En la dosis de 100 kg/ha de N, el N mineral tiene una caída mas acentuada que cuando se aplican 50 kg/ha de N.

Otro escenario, donde se comparan tres fuentes diferentes de N, urea, UAN y nitrato de amonio (NA), en aplicación en cobertura, siendo que esta última fuente (NA), en el modelo, es considerada igual al sulfato de amonio (SA), y los resultados de ese escenario son presentados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Escenario 2: Aplicación de 100 kg/ha de N, en cobertura, entre los meses de noviembre a febrero, con precipitación debajo de 10 mm.

Parámetros	Fertilizante nitrogenado		
	Urea	UAN	NA y SA <sup>(1)</sup>
	----- kg/ha -----		
Parámetros de entrada de N:			
1. Paja	50,00	50,00	50,00
2. MO del suelo	100,00	100,00	100,00
3. Fertilizante	100,00	100,00	100,00
4. Atmósfera	37,28	37,28	37,28
5. Reserva de la caña	10,00	10,00	10,00
Total de entrada	297,28	297,28	297,28
Parámetros de pérdida de N:			
1. N Desnitrificado	1,95	3,07	3,94
2. Pérdida de amonio	82,44	48,34	22,8
3. Pérdida de nitrato	10,21	16,07	20,64
Total perdido	94,60	67,48	47,38
Parámetro de N en el suelo :			
1. Humus	27,99	28,56	28,97
2. MO	43,21	45,39	47,10
3. Nitrato	0	0	0
4. N mineral	4,76	6,85	8,66
Total de N en el suelo	75,96	80,80	84,73
Parámetro de N en la planta:			
1. N en la caña de azúcar	126,72	149,00	165,17
Total de N en el sistema	297,28	297,28	297,28

(1) NA = Nitrato de Amonio y AS = Sulfato de Amonio

En el escenario 2 (Tabla 2), se estimó a través del modelo, pérdidas de 32% para la Urea, 23% para el UAN y 16% para el Nitrato de Amonio o Sulfato de amonio. Otros autores encontraron pérdidas de N, utilizando como fuente urea, que variaron de 43 a 56% del N total del sistema.

Analizándose los resultados de las simulaciones del escenario 2 (Tabla 2), se nota que el comportamiento de la MO es prácticamente igual para los fertilizantes analizados. El tenor de N mineral mostró una caída acentuada luego de la aplicación de urea, y más lenta para la aplicación de UAN, sulfato de amonio (SA) y nitrato de amonio (NA).

El nitrato alcanzó mayores valores cuando se utilizó nitrato o sulfato de amonio, donde ocurrió también el mayor tenor de N total en la caña, debido a menores pérdidas cuando se utilizan esos fertilizantes (NA y SA) comparados con urea y UAN en cobertura. La urea en cobertura volatiliza más fácil en el primer mes después de la aplicación por eso observamos que es más acentuada el N mineral un mes después de la aplicación, conforme también observó TRIVELIN (2000), extrayendo pérdidas aun mayores de amonio cuando utilizó urea en cobertura en experimento. El UAN, a pesar de volatilizar bastante menos que la urea, también tiene una pérdida considerable de amonio. Cuando son incorporados al suelo esos fertilizantes, la pérdida por volatilización es prácticamente cero. La formación de humus fue semejante para los tres fertilizantes (alrededor de 10% del total de N en el sistema).

En la Tabla 3 fue simulado otro escenario, donde fueron comparados los efectos de la precipitación y de la temperatura en el momento de la aplicación del fertilizante nitrogenado.

**Tabla 3.** Escenario 3: Aplicación de 100 kg/ha de N, en cobertura, fuente urea.

Parámetros	Prec <sup>(1)</sup> < 10 mm		Prec de 10 a 30 mm		Prec > 30 mm	
	T1 <sup>(2)</sup>	T2	T1	T2	T1	T2
----- kg/ha -----						
Parámetros entrada de N:						
1. Paja	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
2. MO del suelo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3. Fertilizante	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4. Atmósfera	37,28	37,28	37,28	37,28	37,28	37,28
5. Reserva de la caña	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Total de entrada	297,28	297,28	297,28	297,28	297,28	297,28
Parámetros de pérdida de N:						
1. N Desnitrificado	1,95	4,87	2,83	5,31	4,82	5,79
2. pérdida de amonio	82,44	22,8	56,81	12,12	0	0
3. pérdida de nitrato	10,21	2,55	14,82	2,78	25,24	3,03
Total perdido	94,60	30,22	74,46	20,21	30,06	8,82
Parámetro de N en el suelo:						
Humus	27,99	28,97	28,42	29,13	29,31	29,31
MO	43,21	47,10	44,84	47,83	48,67	48,67
Nitrato	0	10,13	0	18,44	6,58	27,84
N mineral	4,76	8,66	6,31	9,47	10,44	10,44
Total de N en el suelo	75,96	94,86	79,57	104,87	95,00	116,26
Parámetro de N en la planta:						
1. N en la caña-de-azúcar	126,72	172,20	143,25	172,20	172,22	172,20
Total de N en el sistema	297,28	297,28	297,28	297,28	297,28	297,28

<sup>(1)</sup> Precipitación en el periodo de la aplicación del N-fertilizante; <sup>(2)</sup> Epoca de aplicación del N-fertilizante, T1 = aplicación realizada entre los meses noviembre y febrero, y T2 = aplicación realizada entre los meses marzo y octubre

En el escenario 3, los valores estimados por el modelo muestran que cuando la aplicación del fertilizante se realiza entre los meses marzo y octubre, las pérdidas son menores comparadas con la aplicación realizada en los meses de noviembre y febrero. Las mayores pérdidas ocurren cuando, en el momento de la aplicación del fertilizante, la precipitación es menor que 10 mm, y son menores cuando esa precipitación es superior a 30 mm. Sin embargo, las pérdidas por lixiviación son mayores con mayores precipitaciones, y también la desnitrificación, la que se beneficia con las lluvias, ya que ocurre en condiciones anaeróbicas. La volatilización es prácticamente nula con altas precipitaciones, ya que el nitrógeno aplicado en superficie, sobre la paja, es llevado para las capas más profundas. Con precipitaciones hasta 30 mm en el momento de la aplicación de la urea, ocurrieron las mayores pérdidas de amonio.

El menor tenor de N en la caña ocurrió cuando la aplicación fue realizada entre los meses de noviembre y febrero, y la precipitación en esa época era inferior a 10 mm, llegando ese valor a 126 kg/ha de N. Eso ocurrió debido a gran pérdida de amonio por la falta de lluvia y de las temperaturas altas en el momento de la fertilización, reduciendo el tenor de N mineral y así, la nitrificación, quedando un bajo tenor de N disponible para suplir la demanda de N. Los mayores valores de N total en la caña después de 12 meses ocurrieron cuando, en el momento en que la caña recibió el fertilizante, la precipitación era superior a 30 mm o cuando la temperatura era mas baja.

Los resultados encontrados por el modelo en los tres escenarios (Tablas 1, 2 y 3), muestran que el modelo está estimando valores de acuerdo con la realidad, conforme a los experimentos de campo demostrados por varios autores GAVA et al. (2001), TRIVELIN (2000), TRIVELIN et al. (2002), COALE et al. (1993).

A través de esos escenarios, puede concluirse que las condiciones ideales para la caña de azúcar, sin considerar costos, son: (1) cuando la aplicación del fertilizante fuera realizada en cobertura (mayor facilidad de manejo por causa de la paja sobre el suelo), utilizar Nitrato o Sulfato de amonio como fuente de N; (2) si, en la época de aplicación del fertilizante, la precipitación fuera alta y/o la temperatura baja, aplicar urea como fuente de N; (3) cuando la aplicación fuera incorporada al suelo, utilizar urea como fuente de N, sin embargo, esa condición necesita ser estudiada para analizar el costo / beneficio, ya que, en caña soca cubierta con rastrojos, esa aplicación es bastante trabajosa.

## **Consideraciones Finales**

El Modelo de Balance de nitrógeno representa una contribución para el cultivo de la caña de azúcar, principalmente con relación al manejo sin quema. Los modelos que describen la dinámica del nitrógeno para otros cultivos, como el CERES N, son difíciles de utilizar debido al gran número de datos de entrada exigidos, datos de difícil medición, que necesitan de experimentos caros.

El Modelo de Balance de Nitrógeno todavía es un modelo preliminar y simplificado, que necesita pasar por testeos y validaciones, e incluirse parámetros de gran importancia que aun no fueron considerados debido a la falta de datos e informaciones disponibles para el estudio, y debido a la complejidad del sistema. A pesar de eso, este modelo mostró estar realizando simulaciones con resultados cuyos comportamientos condicen con la realidad, en las condiciones analizadas.

Este modelo puede dirigir nuevas investigaciones en esta área, ya que indica donde es deficitario el número de informaciones respecto de la dinámica de N, donde están faltando datos para volverlo más complejo, y datos para validar parámetros que no fueron testados debido a la falta de experimentos que buscaran esa información.

Así, ese modelo puede servir como un Sistema de Soporte de Decisión confiable en esa área, auxiliando en la toma de decisión en cuanto a la mejor cantidad de fertilizante nitrogenado a aplicarse en el cultivo, mejor forma de aplicación, mejor fuente de N, etc.; dependiendo de la situación que se está analizando.

**Figura 2.** Modelo de Balance del Nitrógeno en el sistema suelo – caña de azúcar.

