



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA**

**EL MODELO SISTÉMICO PARA LA
FERTILIZACIÓN NITROGENADA
EN BRÓCOLI (*Brassica oleracea itálica*)**

YAMIL EVERALDO CARTAGENA AYALA

**T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS

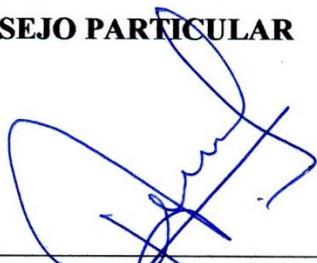
**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO
2014**

La presente tesis, titulada: **EL MODELO SISTEMICO PARA LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN BRÓCOLI (*Brassica oleracea itálica*)**, realizada por el alumno: **YAMIL EVERALDO CARTAGENA AYALA**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA**

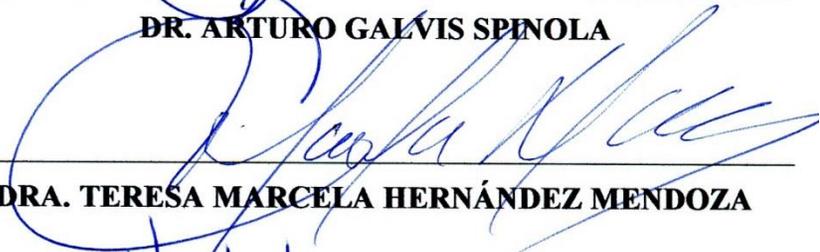
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. ARTURO GALVIS SPINOLA

ASESOR:



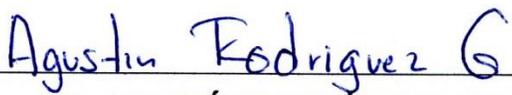
DRA. TERESA MARCELA HERNÁNDEZ MENDOZA

ASESOR:



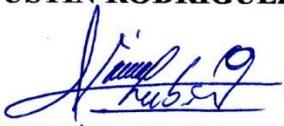
DR. VÍCTOR HUGO VOLQUE HALLER

ASESOR:



DR. AGUSTÍN RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

ASESOR:



DR. RUBÉN BUGARÍN MONTOYA

EL MODELO SISTÉMICO PARA LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

EN BRÓCOLI (*Brassica oleracea* itálica)

Yamil Everaldo Cartagena Ayala, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2014

La aplicación de nitrógeno para la producción de brócoli suele ser ajustada con base en criterios empíricos con el riesgo de llegar a dosis excesivas. En este sentido, una alternativa para precisar la cantidad de nitrógeno que debe agregarse es a través de la evaluación cuantitativa de la demanda nitrogenada del cultivo, el suministro de nitrógeno del suelo y la eficiencia de la fertilización nitrogenada. Se realizaron dos experimentos (octubre de 2012 a enero de 2013 y abril a julio del 2013) en el Campo Experimental Tlapeaxco de la Universidad Autónoma Chapingo, México. Los factores en estudio para el primer experimento fueron: láminas de riego (3 y 6 mm) y dosis de nitrógeno (80, 160, 240 y 320 kg ha⁻¹), y para el segundo experimento las dosis de nitrógeno residual del ensayo anterior y residuos de la cosecha (sin residuos y con residuos); para ambos experimentos se utilizó un arreglo de parcelas divididas en bloques completamente al azar, dando un total de 8 tratamientos con cuatro repeticiones. En el ensayo 1, el rendimiento más alto fue 28.9 t ha⁻¹ con 6 mm de riego y 160 kg N ha⁻¹, con 217 kg N ha⁻¹, 148 kg N ha⁻¹ y 44% de demanda, suministro y eficiencia de la fertilización nitrogenada, respectivamente. Para el ensayo 2, el rendimiento mayor fue 47.3 t ha⁻¹ con 80 kg ha⁻¹ de nitrógeno residual con residuos de la cosecha, con 350 kg N ha⁻¹, 355 kg N ha⁻¹ y 9% de demanda, suministro y eficiencia de la fertilización nitrogenada, respectivamente.

Palabras clave: Peso fresco, biomasa, nitrógeno acumulado, inflorescencia.

SYSTEMIC MODEL FOR NITROGEN FERTILIZATION

IN BROCCOLI (*Brassica oleracea italica*)

Yamil Everaldo Cartagena Ayala, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2014

The application of nitrogen for the production of broccoli is usually adjusted based on empirical criteria with the risk of becoming excessive doses. In this sense, an alternative to specify the amount of nitrogen to be added is through the quantitative assessment of the nitrogen demand of the crop, the soil nitrogen supply and efficiency of nitrogen fertilization. Two experiments (October 2012 to January 2013 and April to July 2013) in the Experimental Tlapeaxco, Chapingo Autonomous University, Mexico were performed. Factors studied in the first experiment were: irrigation depths (3 and 6 mm) and nitrogen rates (80, 160, 240 and 320 kg ha⁻¹), and for the second experiment the dose of residual nitrogen from previous test and crop residues (no waste and waste); for both experiments an array of split plot randomized complete block was used, giving a total of 8 treatments with four replications. In experiment 1, the highest yield was 28.9 t ha⁻¹ with 6 mm of irrigation and 160 kg N ha⁻¹, 217 kg N ha⁻¹, 148 kg N ha⁻¹ and 44% of demand, supply and efficiency nitrogen fertilization, respectively. For experiment 2, the highest yield was 47.3 t ha⁻¹ with 80 kg ha⁻¹ of residual nitrogen in crop residues, with 350 kg N ha⁻¹, 355 kg N ha⁻¹ and 9% of demand, supply and efficiency of nitrogen fertilization, respectively.

Keywords: Fresh weight, biomass, accumulated nitrogen, inflorescence.

DEDICATORIA

Al agricultor

Realidad dura de mi país

Por su trabajo diario, para proveernos de alimentos.

A mi Abuelo

Gonzalo

Por enseñarme que es necesario esforzarse todos los días por ser un buen hombre.

A mis hijos:

Emilio y Eric

Por ser mis compañeros inseparables en el camino de la vida.

AGRADECIMIENTO

El autor deja constancia de su agradecimiento a todas las personas que impartieron sus conocimientos para la labor de producir alimentos en beneficio de la humanidad, de manera especial:

- Al Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), por los recursos financieros y permitirme continuar con mis estudios de doctorado, para poder servir mejor a mi pueblo.
- Al Colegio de Postgraduados (CP), por difundir y aplicar sus conocimientos en el manejo sustentable de los recursos naturales y la producción de alimentos.
- Al Dr. Arturo Galvis Spínola, por ser mi Consejero, sus valiosos aportes científicos, experiencias y acertada dirección durante el transcurso de la investigación.
- A Dra. Teresa Marcela Hernández Mendoza Dr. Víctor Hugo Volque Haller, Dr. Agustín Rodríguez González y Dr. Rubén Bugarín Montoya, por ser mis Asesores y las facilidades prestadas en la ejecución de la investigación.
- Al Sr. Gonzalo Galván, por su decidida colaboración en la realización del trabajo de campo y laboratorio.
- A todas las personas que de una u otra manera contribuyeron con sus aportes en la realización de esta investigación.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. El nitrógeno en la planta	3
2.1.1. Funciones del nitrógeno en la planta.....	8
2.1.2. Contaminación por nitrato y nitrito.....	10
2.2. El modelo sistémico para generar dosis de fertilizantes	14
2.2.1. Demanda nutrimental.....	25
2.2.2. Suministro de nitrógeno del suelo.....	32
2.2.3. Eficiencia de la fertilización nitrogenada.....	39
2.3. Trabajos de fertilización en brócoli	60
2.4. Resumen de la revisión de literatura	75
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	76
3.1. Objetivo general	76
3.2. Objetivos específicos	76
3.3. Hipótesis	76
4. MATERIALES Y MÉTODOS	77
4.1. Ubicación	77
4.2. Clima	77
4.3. Suelo	79
4.4. Agua de riego	79
4.5. Material vegetal	80
4.6. Experimentos	81
4.6.1. Experimento 1: Láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	81
4.6.2. Experimento 2: Dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	83

	Página
4.7. Manejo del experimento	85
4.7.1. Semillero.....	85
4.7.2. Preparación del terreno.....	85
4.7.3. Establecimiento del experimento.....	85
4.7.4. Fertilización química.....	86
4.7.5. Trasplante.....	86
4.7.6. Riego.....	86
4.7.7. Control de malezas y plagas.....	87
4.7.8. Cosecha.....	87
4.8. Variables	88
4.8.1. Peso fresco.....	88
4.8.2. Biomasa.....	89
4.8.3. Unidades térmicas.....	89
4.8.4. Índice de la raíz.....	89
4.8.5. Índice de la cosecha.....	90
4.8.6. Nitrógeno acumulado.....	90
4.8.7. Nitrateo acumulado.....	91
4.8.8. Nitrito acumulado.....	92
4.9. Análisis estadístico	92
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	96
5.1. Experimento 1: Láminas de riego y dosis de nitrógeno	96
5.1.1. Condiciones climáticas.....	96
5.1.2. Condiciones edáficas.....	96
5.1.3. Peso fresco aéreo e inflorescencia.....	99
5.1.4. Biomasa aérea e inflorescencia.....	107
5.1.5. Índice de la raíz.....	117
5.1.6. Índice de la cosecha.....	118
5.1.7. Rendimiento de la inflorescencia en el tiempo.....	119
5.1.8. Nitrógeno acumulado en la biomasa aérea e inflorescencia...	122

	Página
5.1.9. Nitrato acumulado en la biomasa de la inflorescencia.....	129
5.1.10. Nitrito acumulado en la biomasa de la inflorescencia.....	131
5.1.11. Generación de la dosis de fertilización nitrogenada.....	133
5.2. Experimento 2: Dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	136
5.2.1. Condiciones climáticas.....	136
5.2.2. Condiciones edáficas.....	136
5.2.3. Peso fresco aéreo e inflorescencia.....	139
5.2.4. Biomasa aérea e inflorescencia.....	147
5.2.5. Índice de la raíz.....	157
5.2.6. Índice de la cosecha.....	158
5.2.7. Rendimiento de la inflorescencia en el tiempo.....	159
5.2.8. Nitrógeno acumulado en la biomasa aérea e inflorescencia...	162
5.2.9. Nitrato acumulado en la biomasa de la inflorescencia.....	169
5.2.10. Nitrito acumulado en la biomasa de la inflorescencia.....	171
5.2.11. Generación de la dosis de fertilización nitrogenada.....	173
6. CONCLUSIONES.....	176
7. LITERATURA CITADA.....	177
8. ANEXOS.....	186

LISTA DE CUADROS

		Página
Cuadro 2.1.	Problemas causados por el exceso de nitrógeno en el ambiente..	13
Cuadro 2.2.	Balance de la fertilización nitrogenada con fertilizantes nitrogenados marcados con ¹⁵ N.....	39
Cuadro 2.3.	Parámetros para el cálculo de la dosis de fertilización en el cultivo de maíz.....	44
Cuadro 2.4.	Cálculo de la dosis de fertilización nitrogenada en chile jalapeño.....	46
Cuadro 2.5.	Requerimientos nutricionales para el cultivo de papa.....	48
Cuadro 2.6.	Análisis químico de suelos con la interpretación de los niveles críticos para el cultivo de papa.....	48
Cuadro 2.7.	Eficiencia de utilización de los fertilizantes (Bertsch, 1998).....	49
Cuadro 2.8.	Consideraciones prácticas que deben ser contempladas para establecer el programa de fertilización con nitrógeno para el cultivo de maíz.....	50
Cuadro 2.9.	Balance de nitrógeno en una explotación de regadío situada en una zona vulnerable al nitrógeno para el cultivo de maíz grano.....	51
Cuadro 2.10.	Análisis químico de suelo del campo Agrícola “San Martín”, Chapingo, Estado de México.....	52
Cuadro 2.11.	Precipitación y temperatura en un ambiente tropical para el cultivo de sorgo.....	55
Cuadro 2.12.	Rendimiento potencial del cultivo de sorgo.....	56
Cuadro 2.13.	Parámetros de suelo, cultivo y fertilizante para sorgo.....	56
Cuadro 2.14.	Rendimiento, densidad de plantas, nitrógeno aplicado y acumulado en el cultivo de brócoli.....	74

	Página
Cuadro 4.1. Condiciones climáticas durante la ejecución de los experimentos.....	77
Cuadro 4.2. Propiedades físicas y químicas del suelo.....	79
Cuadro 4.3. Propiedades químicas del agua de riego.....	80
Cuadro 4.4. Características del cultivar de brócoli, híbrido Avenger.....	80
Cuadro 4.5. Tratamientos en estudio para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	81
Cuadro 4.6. Dimensiones del experimento para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	82
Cuadro 4.7. Tratamientos en estudio para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	83
Cuadro 4.8. Dimensiones del experimento para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	84
Cuadro 4.9. Épocas de aplicación, fraccionamiento y cantidad del fertilizante nitrogenado, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	86
Cuadro 5.1. Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el peso fresco aéreo de brócoli.....	100
Cuadro 5.2. Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el peso fresco de la inflorescencia de brócoli.....	101
Cuadro 5.3. Función cuadrática del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el peso fresco aéreo e inflorescencia de brócoli.	101
Cuadro 5.4. Función logística normal del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el peso fresco aéreo de brócoli.....	103
Cuadro 5.5. Función logística normal del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el peso fresco de la inflorescencia de brócoli.....	104

	Página	
Cuadro 5.6.	Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el peso fresco aéreo observado, estimado y tasa absoluta de acumulación de brócoli.....	105
Cuadro 5.7.	Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre la biomasa aérea de brócoli.....	108
Cuadro 5.8	Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	109
Cuadro 5.9	Función cuadrática del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre la biomasa aérea e inflorescencia de brócoli.....	109
Cuadro 5.10	Función logística normal del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre la biomasa aérea de brócoli.....	111
Cuadro 5.11	Función logística normal del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	112
Cuadro 5.12.	Función logística normal en unidades térmicas del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre la biomasa aérea de brócoli.....	113
Cuadro 5.13.	Función logística normal en unidades térmicas del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	114
Cuadro 5.14.	Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre la biomasa aérea observada, estimada y tasa absoluta de acumulación de brócoli.....	115
Cuadro 5.15.	Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el índice de la raíz de brócoli.....	117
Cuadro 5.16.	Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el índice de la cosecha de brócoli.....	118
Cuadro 5.17.	Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa aérea de brócoli.....	122

	Página
Cuadro 5.18. Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	123
Cuadro 5.19. Función logística normal del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa aérea de brócoli.....	124
Cuadro 5.20. Función logística normal del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	125
Cuadro 5.21. Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa aérea observada, estimada y tasa absoluta de acumulación de brócoli.....	127
Cuadro 5.22. Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el nitrato acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	129
Cuadro 5.23. Función cuadrática inversa del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el nitrato acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	130
Cuadro 5.24. Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el nitrito acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	131
Cuadro 5.25. Función cuadrática inversa del efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno sobre el nitrito acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	132
Cuadro 5.26. Rendimiento, demanda de nitrógeno, dosis de nitrógeno (aplicado y estimado), suministro del suelo (148 kg ha ⁻¹), eficiencia de aplicación del fertilizante (43%), para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	134
Cuadro 5.27. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el peso fresco aéreo de brócoli.....	140
Cuadro 5.28. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el peso fresco de la inflorescencia de brócoli.....	141

	Página
Cuadro 5.29. Función cuadrática del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el peso fresco aéreo e inflorescencia de brócoli.....	141
Cuadro 5.30. Función logística normal de efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el peso fresco aéreo de brócoli.....	143
Cuadro 5.31. Función logística normal de efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el peso fresco de la inflorescencia de brócoli.....	144
Cuadro 5.32. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el peso fresco aéreo observado, estimado y tasa absoluta de acumulación de brócoli.....	145
Cuadro 5.33. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre la biomasa aérea de brócoli.....	148
Cuadro 5.34. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	149
Cuadro 5.35. Función cuadrática del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre la biomasa aérea e inflorescencia de brócoli.....	149
Cuadro 5.36. Función logística normal del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre la biomasa aérea de brócoli.....	151
Cuadro 5.37. Función logística normal del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	152
Cuadro 5.38. Función logística normal en unidades térmicas del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre la biomasa aérea de brócoli.....	153
Cuadro 5.39. Función logística normal en unidades térmicas del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	154
Cuadro 5.40. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre la biomasa aérea observada, estimada y tasa absoluta de acumulación de brócoli.....	155

	Página
Cuadro 5.41. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el índice de la raíz de brócoli.....	157
Cuadro 5.42. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el índice de la cosecha de brócoli.....	158
Cuadro 5.43. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa aérea de brócoli.....	162
Cuadro 5.44. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	163
Cuadro 5.45. Función logística normal del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa aérea de brócoli.....	164
Cuadro 5.46. Función logística normal del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	165
Cuadro 5.47. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el nitrógeno acumulado en la biomasa aérea observada, estimada y tasa absoluta de acumulación de brócoli.....	167
Cuadro 5.48. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el nitrato acumulado en la biomasa aérea de brócoli.....	169
Cuadro 5.49. Función cuadrática inversa del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el nitrato acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	170
Cuadro 5.50. Efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el nitrito acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	171
Cuadro 5.51. Función cuadrática inversa del efecto de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha sobre el nitrito acumulado en la biomasa de la inflorescencia de brócoli.....	172
Cuadro 5.52. Demanda de nitrógeno (observada y estimada), dosis de nitrógeno (aplicado y estimado), suministro del suelo (355 kg ha ⁻¹), eficiencia de aplicación del fertilizante (9%), para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	174

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 2.1.	El ciclo del nitrógeno dentro del sistema de producción agrícola (Galvis y Hernández, 2003).....	7
Figura 2.2.	Dinámica de los nutrientes en el suelo (Rodríguez, 1990).....	17
Figura 2.3	Modelo simplificado para generar dosis de fertilización nitrogenada en los cultivos anuales (Galvis, 1990).....	19
Figura 2.4.	Modelo simplificado modificado para generar dosis de fertilización nitrogenada en los para cultivos anuales (Galvis, 2014).....	22
Figura 2.5.	Curvas de rendimiento de un cultivo en relación con la intensidad de la sequía (Volque, 1988).....	23
Figura 2.6.	Relación entre dosis de nitrógeno y rendimiento (cuadrante a); nitrógeno acumulado en la planta y rendimiento (cuadrante b) y dosis de nitrógeno y nitrógeno acumulado en la planta (cuadrante c), para el cultivo de arroz IIRI. Los Baños, Filipinas en la estación seca y húmeda (Tanaka <i>et al.</i> , 1964).....	24
Figura 2.7.	Concentración de nitrógeno en la biomasa aérea en la cosecha de distintos cultivos con una nutrición nitrogenada adecuada (Rodríguez, 1993).....	31
Figura 2.8.	Suministro del nitrógeno en el suelo (Rodríguez, 1993).....	35
Figura 2.9.	Modelo simple de la mineralización del nitrógeno en el suelo (Matus y Rodríguez, 1994).....	38
Figura 2.10.	Relación entre dosis de nitrógeno y nitrógeno acumulado en la planta, para el cultivo de arroz IIRI. Los Baños, Filipinas en la estación seca y húmeda (Tanaka <i>et al.</i> , 1964).....	42
Figura 4.1.	Ubicación del experimento en el lote Montecillo Dos-Seis, Campo Experimental Tlapeaxco, Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, México.....	78

	Página
Figura 5.1. Temperatura (máxima y mínima) y precipitación diarias, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	97
Figura 5.2. Humedad volumétrica a 0.30 m de profundidad del suelo, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	98
Figura 5.3. Efecto de las láminas de riego y dosis de nitrógeno en el peso fresco de la inflorescencia de brócoli a los 100 días después del trasplante.....	102
Figura 5.4. Efecto de láminas de riego y dosis de nitrógeno en la biomasa de la inflorescencia de brócoli a los 100 días después del trasplante.....	110
Figura 5.5. Efecto de láminas de riego y dosis de nitrógeno en el rendimiento de la inflorescencia de brócoli a los 80, 85, 90, 95 y 100 días después del trasplante.....	120
Figura 5.6. Efecto de láminas de riego y dosis de nitrógeno en el rendimiento de la inflorescencia de brócoli a los 100 días después del trasplante.....	121
Figura 5.7. Efecto de láminas de riego y dosis de nitrógeno en el nitrógeno acumulado en la biomasa aérea de brócoli.....	126
Figura 5.8. Relación entre dosis de nitrógeno y rendimiento (cuadrante a), nitrógeno acumulado en la biomasa aérea y rendimiento (cuadrante b) y dosis de nitrógeno y nitrógeno acumulado en la biomasa aérea (cuadrante c) en brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	135
Figura 5.9. Temperatura (máxima y mínima) y precipitación diarias, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	137
Figura 5.10. Humedad volumétrica semanal a 0.30 m de profundidad del suelo, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	138
Figura 5.11. Efecto de dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha en el peso fresco de la inflorescencia de brócoli a los 100 días después del trasplante.....	142

	Página
Figura 5.12. Efecto de dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha en la biomasa de la inflorescencia de brócoli a los 100 días después del trasplante.....	150
Figura 5.13. Efecto de láminas de las dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha en el rendimiento de la inflorescencia de brócoli a los 80 y 90 días después del trasplante.....	160
Figura 5.14. Efecto de dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha en el rendimiento de la inflorescencia de brócoli a los 100 días después del trasplante.....	161
Figura 5.15. Efecto de dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha en el nitrógeno acumulado en la biomasa aérea de brócoli a los 100 días después del trasplante.....	166
Figura 5.16. Relación entre dosis de nitrógeno y rendimiento (cuadrante a), nitrógeno acumulado en la biomasa aérea y rendimiento (cuadrante b) y dosis de nitrógeno y nitrógeno acumulado en la biomasa aérea (cuadrante c), en brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	175

LISTA CUADROS DEL ANEXO

	Página
Cuadro A.1. Aporte de iones del agua para preparar la solución de Steiner.....	188
Cuadro A.2. Diseño del balance de la solución de Steiner.....	188
Cuadro A.3. Solución fertilizante.....	188
Cuadro A.4. Propiedades físicas del suelo. Lote Montecillo dos-seis.....	189
Cuadro A.5. Humedad volumétrica ajustada.....	192
Cuadro A.6. Duración del período vegetativo y fases de desarrollo del brócoli.....	196
Cuadro A.7. Duración de las fases de desarrollo y coeficiente del cultivo (Kc) del brócoli.....	197
Cuadro A.8. Alícuotas para la curva de calibración de NO ₃	205
Cuadro A.9. Alícuotas para la curva de calibración de NO ₂	210
Cuadro A.10. Datos climáticos diarios, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	216
Cuadro A.11. Balance hídrico en brócoli, para la lámina de riego de 3 mm.....	219
Cuadro A.12. Balance hídrico en brócoli, para la lámina de riego de 6 mm.....	222
Cuadro A.13. Peso fresco de la raíz de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	225
Cuadro A.14. Peso fresco del tallo de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	226
Cuadro A.15. Peso fresco de las hojas de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	227

	Página
Cuadro A.16. Peso fresco de la inflorescencia de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	228
Cuadro A.17. Peso fresco aéreo de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	229
Cuadro A.18. Biomasa de la raíz de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	230
Cuadro A.19. Biomasa del tallo de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	231
Cuadro A.20. Biomasa de las hojas de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	232
Cuadro A.21. Biomasa de la inflorescencia de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	233
Cuadro A.22. Biomasa aérea de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	234
Cuadro A.23. Nitrógeno en la biomasa de la raíz de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	235
Cuadro A.24. Nitrógeno en la biomasa del tallo de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	235
Cuadro A.25. Nitrógeno en la biomasa de las hojas de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	236
Cuadro A.26. Nitrógeno en la biomasa de la inflorescencia de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	236
Cuadro A.27. Nitrógeno en la biomasa aérea de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	237
Cuadro A.28. Nitrito en la biomasa de la inflorescencia de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	238

	Página
Cuadro A.29. Nitrito en la biomasa de la inflorescencia de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	238
Cuadro A.30. Análisis de varianza del peso fresco aéreo de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	239
Cuadro A.31. Análisis de varianza del peso fresco de la inflorescencia de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	240
Cuadro A.32. Análisis de varianza de la biomasa aérea de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	241
Cuadro A.33. Análisis de varianza de la biomasa de la inflorescencia de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	242
Cuadro A.34. Análisis de varianza del índice de la raíz de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	243
Cuadro A.35. Análisis de varianza del índice de la cosecha de brócoli, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	243
Cuadro A.36. Datos climáticos diarios, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	246
Cuadro A.37. Balance hídrico en brócoli, para la lámina de riego de 6 mm.....	249
Cuadro A.38. Peso fresco de la raíz de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	252
Cuadro A.39. Peso fresco del tallo de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	253
Cuadro A.40. Peso fresco de las hojas de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	254
Cuadro A.41. Peso fresco de la inflorescencia de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	255

	Página
Cuadro A.42. Peso fresco aéreo de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	256
Cuadro A.43. Biomasa de la raíz de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	257
Cuadro A.44. Biomasa del tallo de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	258
Cuadro A.45. Biomasa de las hojas de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	259
Cuadro A.46. Biomasa de la inflorescencia de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	260
Cuadro A.47. Biomasa aérea de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	261
Cuadro A.48. Nitrógeno en la biomasa de la raíz de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	262
Cuadro A.49. Nitrógeno en la biomasa del tallo de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	262
Cuadro A.50. Nitrógeno en la biomasa de la hoja de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	263
Cuadro A.51. Nitrógeno en la biomasa de la inflorescencia de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	263
Cuadro A.52. Nitrógeno en la biomasa aérea de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	264
Cuadro A.53. Nitrito en la biomasa de la inflorescencia de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	265
Cuadro A.54. Nitrito en la biomasa de la inflorescencia de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	265

	Página
Cuadro A.55. Análisis de varianza del peso fresco aéreo de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	266
Cuadro A.56. Análisis de varianza del peso fresco de la inflorescencia de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	267
Cuadro A.57. Análisis de varianza de la biomasa aérea de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	268
Cuadro A.58. Análisis de varianza de la biomasa de la inflorescencia de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	269
Cuadro A.59. Análisis de varianza del índice de la raíz de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	270
Cuadro A.60. Análisis de varianza del índice de la cosecha de brócoli, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	270

LISTA DE FIGURAS DEL ANEXO

		Página
Figura A.1.	Distribución espacial de la capacidad de campo a 0.30 m de profundidad del suelo.....	190
Figura A.2.	Distribución espacial del punto de marchitamiento a 0.30 m de profundidad del suelo.....	191
Figura A.3.	Curva de calibración de nitrato.....	207
Figura A.4.	Curva de calibración de nitrito.....	211
Figura A.5.	Ubicación del experimento, Campo Experimental Tlapeaxco, Universidad Autónoma Chapingo.....	214
Figura A.6.	Distribución de los tratamientos en el sitio experimental, para láminas de riego y dosis de nitrógeno.....	215
Figura A.7.	Distribución de los tratamientos en el sitio experimental, para dosis de nitrógeno y residuos de la cosecha.....	245

LISTA DE PROGRAMACIÓN EN SAS DEL ANEXO

	Página
Programación A.1. Análisis de la varianza del diseño experimental de parcela dividida en bloques completamente al azar.....	272
Programación A.2. Análisis de la función cuadrática.....	273
Programación A.3. Análisis de la función logística normal.....	274
Programación A.4. Análisis de la función cuadrática inversa.....	275
Programación A.5. Análisis de la prueba de t.....	276

1. INTRODUCCIÓN

En los países en desarrollo la mayoría de los agricultores del sector de la producción de alimentos son de pequeña escala, producen a nivel de subsistencia y forman parte de la pobreza rural. La introducción de nuevos sistemas agrícolas y de tecnologías mejoradas surge como una alternativa viable para mejorar la productividad e ingresos por superficie cultivada.

En el espacio agrícola dominado por cultivos tradicionales como maíz en México, y maíz y papas en Ecuador, se encuentra la mayor cantidad de pequeños productores con superficies que no superan las cinco hectáreas; convirtiéndose en un nicho para el desarrollo del brócoli, con ventajas de adaptación climática, producción de tres ciclos en el año y alta rentabilidad económica.

Entre los principales factores tecnológicos que se encuentran involucrados en el incremento del rendimiento de los cultivos en las últimas décadas, está el uso intensivo de fertilizantes; sin embargo, su empleo indiscriminado puede ocasionar desórdenes nutrimentales en el suelo y los cultivos, lo que no favorece la obtención de altos rendimientos, no asegura la rentabilidad de la inversión e incluso se corre el riesgo de ocasionar problemas en la salud humana y animal.

En un sistema de agricultura sustentable, la aplicación de dosis adecuadas de nitrógeno está orientada a conseguir un alto retorno económico a través de un rendimiento óptimo y de calidad, pero también es importante minimizar los riesgos de contaminación de aguas superficiales o profundas por lixiviación de nitratos que ocasionan problemas en la salud humana y de la atmósfera, con gases derivados de procesos como desnitrificación y volatilización.

Entre las metodologías disponibles para la generación de las recomendaciones de fertilización para los cultivos está el Modelo Simplificado que se basa en la relación cuantitativa entre la demanda nutrimental de la planta, el suministro nutrimental del suelo y

la eficiencia de la fertilización, estableciendo una estrategia de manejo integral agronómico de la fertilización, para incrementar o en su caso mantener el estado nutrimental del suelo para una nutrición rentable de los cultivos sin afectar la sustentabilidad del sistema.

Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo proponer un método para calcular las necesidades de fertilización nitrogenada para el cultivo de brócoli, con base en la cuantificación directa de la demanda de nitrógeno del cultivo, el suministro de nitrógeno por el suelo y la eficiencia de la fertilización nitrogenada.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El nitrógeno en la planta

La población mundial aumentará de seis mil millones de personas en 1999 a siete mil millones en el 2020. Los países en desarrollo tienen las tasas de crecimiento mayores, en este caso, las personas deberían tener vivienda, vestido y sobre todo, alimentado. Hasta 90% de este aumento necesario de la producción de alimentos tendrá que provenir de los campos ya cultivados. Durante el período 1995-1997 alrededor de 790 millones de personas en el mundo en desarrollo no tenía suficiente alimento. Este número ha decaído en los años recientes de un promedio de alrededor de ocho millones de personas por año. En el año 2015, si el ritmo no fuera aumentado, habría aún 600 millones de personas hambrientas. La mayoría de los países están lastrados por múltiples tipos de malnutrición, que pueden coexistir dentro de un mismo país, familia o individuo (FAO, 2013).

En los países en desarrollo, la mayoría de los agricultores activos del sector de la producción de alimentos son agricultores de pequeña escala, que forman parte de la pobreza rural. La introducción de nuevos sistemas agrícolas y tecnologías mejoradas es muy importante, dado que la mejora de la productividad resulta no sólo en más alimentos sino también en más ingreso (FAO e IFA, 2002; FAO, 2013).

En consecuencia, las actividades agrícolas tienen dos objetivos principales:

- Suministrar a la población creciente de su país (o también a la de otros países) con las cantidades crecientes de alimentos y de fibras necesarias.
- Proveer un ingreso satisfactorio para el agricultor y su familia.

En los últimos años, las tecnologías aplicadas a la agricultura han generado avances, se logró incrementar la producción de los principales productos agrícolas a una tasa superior al aumento de la población mundial durante las últimas décadas. Así, por ejemplo, la producción de arroz aumentó 51%, maíz 49% y oleaginosas básicas 122%, mientras que la

población mundial creció 36%. Por otra parte la superficie cosechada de estos cultivos se incrementó sólo 6, 11 y 38%, respectivamente. La producción de hortalizas también aumentó a un ritmo superior al de la población mundial (FAOSTAT, 2001).

Entre los principales factores tecnológicos involucrados en el aumento del rendimiento alcanzado en las últimas décadas, se encuentra el uso intensivo de fertilizantes. El uso de los fertilizantes constituye uno de los principales factores en un programa destinado a lograr incrementos en las cosechas. Sin embargo su empleo indiscriminado puede ocasionar como resultado desbalances nutrimentales. Este desequilibrio no favorece la obtención de altos rendimientos ni asegura la rentabilidad de la inversión de fertilizantes. Mientras que el mejoramiento genético permitió aumentar el potencial de producción de los cultivos, el uso de fertilizantes, junto con el riego y la protección química, permitió la expresión de dicho potencial. Sin fertilizantes, el rendimiento de las variedades mejorados sería inferior al de las tradicionales. Dada esta complementariedad, es difícil separar del resto de las tecnologías utilizadas, el efecto de los fertilizantes sobre el rendimiento. Sin embargo, se estima que aproximadamente 44% del incremento en el rendimiento de los cereales entre 1961 y 1990, se debió al uso de nitrógeno; este efecto fue mayor en los países en desarrollo (Byrnes y Bumb, 1998). De hecho, éste es el principal elemento mineral utilizado en la fertilización agrícola y su consumo en la agricultura mundial se incrementó 36% en los últimos veinte años, mientras que el del fósforo aumentó sólo 4% y el de potasio se mantuvo relativamente constante (Smil, 1999; FAOSTAT, 2001).

Generalmente los cultivos responden a la fertilización nitrogenada. A medida que la dosis crece, el aumento de la producción por unidad de fertilizante adicional disminuye hasta llegar a un valor a partir del cual (dosis crítica) los incrementos del fertilizante ya no aumentan la producción. Sin embargo, cuando la cantidad de nitrógeno aplicado excede a la dosis crítica, la lixiviación del nitrato se incrementa. Así pues, la dosis de nutriente nitrogenado debería ser próxima a esta dosis crítica, la cual depende del cultivo, nitrógeno mineral presente en el suelo, contenido en materia orgánica de los suelos y otros factores, pero en suelos normales oscila aproximadamente entre 150-300 kg ha⁻¹ de nitrógeno para la mayoría de los cultivos hortícolas (Andrew, 2006).

Para comprender el uso del nitrógeno es necesario analizar el ciclo del nitrógeno, que es un recurso teórico en el cual se evalúa la interconexión de sus diferentes formas y las transformaciones que sufre en el aire, suelo, agua y organismos vivos. Esto permite entender la variación y magnitud de la capacidad de aporte de este nutrimento por el medio donde se desarrolla el cultivo y sus salidas o pérdidas como consecuencia de las prácticas de manejo agrícola. Los principales procesos que participan en el ciclo del nitrógeno son la amonificación, nitrificación, fijación biológica, inmovilización, volatilización, desnitrificación y lixiviación. Los cuatro primeros incrementan el nitrógeno que pueden aprovechar los cultivos; la inmovilización es una pérdida temporal de la disponibilidad del nitrógeno porque nuevamente quedará disponible al cabo del tiempo a través de la amonificación (mineralización), y finalmente los tres últimos procesos son de pérdida porque sale el nitrógeno del suelo. La representación de los principales componentes del nitrógeno y su interconexión en el sistema de producción se presenta en la Figura 2.1 (Arévalo, 2005).

Los procesos que rigen la formación, descomposición y transformación de las reservas orgánicas del suelo, son la misma que originan los diferentes compuestos orgánicos nitrogenados, en formas muy lábiles (aminoácidos y proteínas) o estabilizados (ligninas, taninos y quinonas). La biomasa macro y microbiana abunda principalmente en los primeros 0.05 m de profundidad, formando una verdadera cadena alimenticia, que inicia con los residuos orgánicos que se encuentra atacados por microorganismos (bacterias y hongos), que a su vez sirven de alimento para nematodos, protozoarios que son consumidos por ácaros e insectos, que también sirven de alimento para escarabajos y hormigas, contribuyendo a la fertilidad del suelo con sus excretas que liberan nutrientes que fueron mineralizados en su tracto digestivo, modificando notablemente la tasa de descomposición de los materiales orgánicos (Arévalo, 2005).

La conversión de las formas orgánicas de nitrógeno del tejido de plantas y animales a amonio se denomina amonificación que es una consecuencia directa de la mineralización y se realiza a través de diversos microorganismos heterótrofos y aerobios, involucrándose gran cantidad de hongos y bacterias, y posteriormente el amonio se convierte a nitrato

debido a un proceso biológico denominado nitrificación (nitrosomonas y nitrobacter). La tasa con la que el amonio es oxidado hasta la formación de nitratos varía de acuerdo a las condiciones de humedad y temperatura óptimas, por lo que se considera en general que mientras más altas son la humedad y la temperatura del suelo, más rápida será la reacción y viceversa. Dada la rapidez de estas transformaciones, el nitrato es la forma de nitrógeno inorgánico que predomina en el suelo (90%) y el resto es prácticamente amonio, ya que el tiempo de residencia de los nitritos es efímero. Por lo tanto, es muy frecuente el referirse al nitrógeno inorgánico sólo como nitratos, ocasionando el riesgo de subestimar la cuantificación del nitrógeno del suelo. En donde no exista suficiente humedad u oxígeno libre la nitrificación se detendrá, favoreciendo una mayor abundancia de amonio respecto a los nitratos del suelo, incluso permitir una cierta acumulación de nitritos, los cuales son tóxicos para las plantas (Arévalo, 2005).

De acuerdo a lo anterior, en todo suelo agrícola bien aireado se corre el riesgo de que ocurra la lixiviación de los nitratos, que por su naturaleza química son repelidos por las cargas negativas de los coloides quedando en el flujo gravitacional del agua y cuando esto ocurre, quedarán fuera del alcance de las raíces, ocasionando pérdidas con implicaciones económicas y ecológicas importantes enriqueciendo los mantos freáticos con consecuencias nocivas para animales y humanos (Arévalo, 2005).

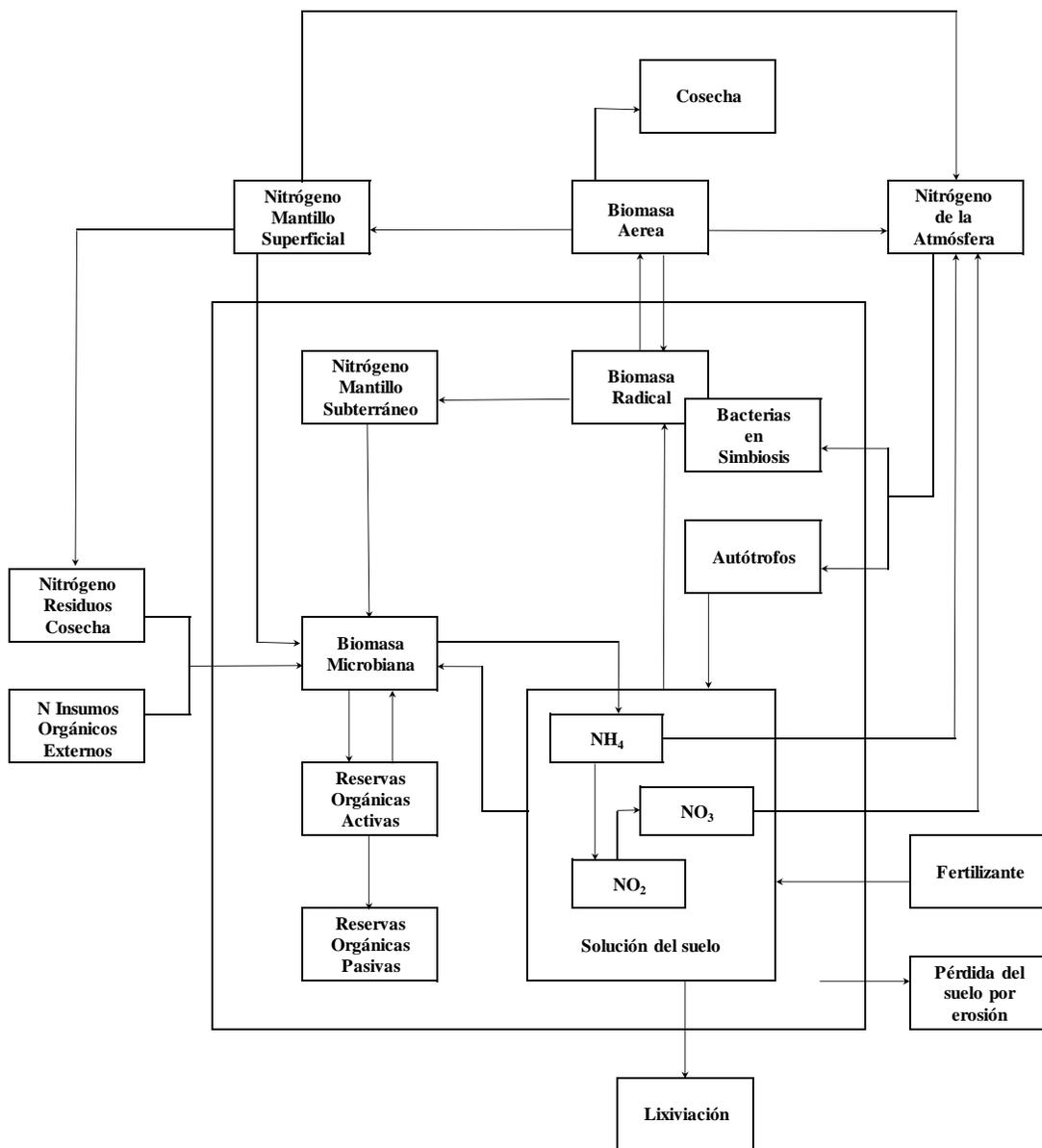


Figura 2.1. El ciclo del nitrógeno dentro del sistema de producción agrícola (Galvis y Hernández, 2003).

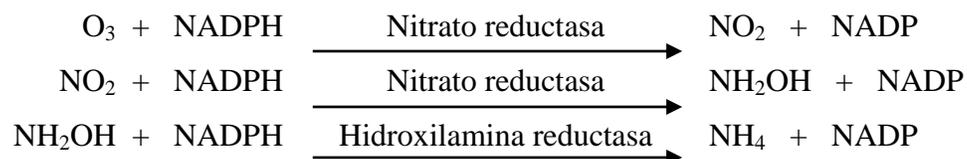
2.1.1. Funciones del nitrógeno en la planta

Cárdenas *et al.*, (2004), mencionan que de los elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, el nitrógeno es considerado el más importante, por ser el que se encuentra generalmente en mayor proporción, 1 a 3% con respecto a su materia seca, dependiendo de la especie, etapa fenológica, órgano y otros. Las funciones del nitrógeno son de tipo estructurales y osmóticas.

- Las funciones estructurales son de tipo específicas y se relacionan con la síntesis de moléculas esenciales para el crecimiento, como ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas, clorofilas y alcaloides.
- La función osmótica está asociada al efecto del ion nitrato y otras formas reducidas del nitrógeno en la reducción del potencial hídrico de la vacuola, dentro del proceso de osmoregularización.

El nitrato, al igual que el amonio, una vez absorbido es incorporado en compuestos orgánicos que son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, a esta incorporación le denomina asimilación. La asimilación del nitrato es muy costosa en términos de energía, debido a una serie compleja de reacciones bioquímicas que demandan un alto gasto energético. Este proceso necesita 12 moles de ATP para reducir un mol de nitrato y cinco moles de ATP para asimilar el amonio (Pereyra, 2001; Taíz y Zeiger, 2007).

El nitrógeno en la planta se halla en forma reducida en todos los compuestos. Por lo tanto, la primera reacción que debe sufrir cuando se absorbe en forma nítrica es su reducción a la forma amoniacal, lo que se realiza en tres fases, en la que interviene como fuente de electrones la coenzima nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADPH) en su forma reducida:



En esta reacción actúa como catalizador el molibdeno, que sirve de enlace en la transferencia de electrones entre la coenzima y el nitrato. La reducción del nitrato puede efectuarse en las raíces o en la parte aérea.

La conversión de N-NO_3 a N-amino incluye tres procesos reductivos y un proceso no reductivo; las cuatro enzimas involucradas son nitrato reductasa (NR), nitrito reductasa (NiR), glutamino sintetasa (GS) y la glutamato sintetasa (GOGAT) (Salisbury y Ross, 1994).

El proceso de asimilación del ion nitrato sucede de la siguiente manera: el nitrato es primeramente convertido a una forma de energía superior, nitrito cuya reacción es catalizada por la enzima nitrato reductasa, esta enzima es regulada por el nitrato y la luz entre otros factores. Posterior a esta reacción, el nitrito obtenido es transformado en su mayor forma de energía, amonio y para que esta reacción ocurra es necesario la participación de la enzima nitrito reductasa. Finalmente el amonio, obtenido como resultado de la segunda reacción es incorporado rápidamente en los esqueletos carbonados para formar aminoácidos, evitando de esta forma la toxicidad de este ión. En esta última reacción están involucradas las enzimas glutamino sintetasa y la glutamato sintetasa. Por el contrario el amonio, una vez absorbido por la raíz, el siguiente proceso para la asimilación en su incorporación a los aminoácidos o en otros compuestos que contengan nitrógeno reducido (Salisbury y Ross, 1994).

Después de esta fase el metabolismo del nitrógeno se puede desglosar en dos etapas. En la primera se forman compuestos orgánicos de bajo peso molecular: aminoácidos, aminas y amidas. En una segunda etapa se sintetizan los compuestos de gran peso molecular: proteínas y ácidos nucleicos (Soto, 2002).

La forma en la que se encuentra el nitrógeno tiene un efecto en la composición química de los tejidos de la planta además del crecimiento y desarrollo de la planta. Por ejemplo, al aplicar amonio como única fuente de nitrógeno se obtiene como resultado bajos niveles de cationes, mientras que los nitratos elevan los niveles de cationes. La cantidad y calidad de

los cationes acumulados en el tejido de las plantas también dependen de las especies. La forma del nitrógeno influye significativamente en la producción de biomasa de las diferentes partes de la planta. La biomasa es alta cuando se suministra nitratos en un cien por ciento. El contenido de nitrógeno de las diferentes partes de la planta es influenciado grandemente por las formas de nitrógeno suministradas. El amonio incrementa significativamente el contenido de nitrógeno en la mayoría de las partes de la planta. El contenido de nitrógeno de las hojas y raíces se incrementa con el aumento en urea y amonio en la solución. En general, las partes de la planta crecidas en nitratos son bajas en el contenido total de nitrógeno que cuando las plantas crecen con amonio y urea. Cuando el amonio es usado únicamente como fuente de nitrógeno se acumula en hojas y estomas, causando toxicidad. En las hojas se observa necrosis cuando se aplica 50% de urea como fuente de nitrógeno en la solución. Síntomas necróticos pueden ser causados por la urea cuando ésta incrementa el contenido de nitrógeno en las hojas disminuyendo su contenido de calcio (Alan, 1989).

2.1.2. Contaminación por nitrato y nitrito

Abelenda *et al.*, (1996), denominan contaminación a todo proceso que contribuya a que un determinado medio o recurso sea inapropiado para su uso, considerándose contaminadas las aguas cuando se altera su composición, de suerte tal que resulte menos apta para cualquiera o todas las funciones y propósitos para las que sería apropiada en estado natural. En este sentido, Hallberg (1989), Merino y Arozarena (1991), Sagardoy (1993), entre otros, plantean que la agricultura que utiliza elevadas aplicaciones de fertilizantes minerales, especialmente los nitrogenados, es la principal responsable del contenido de nitratos en las aguas superficiales y subterráneas. Este proceso puede ser lento y con el paso de los años trae como consecuencias riesgos en la salud humana: meta hemoglobinemia o síndrome del bebe azul y cáncer gástrico (Soares, 2000).

La concentración de nitrato puede llegar a ser tóxica con más de 44 mg L^{-1} , y se considera no apta para el consumo humano (USEPA, 1989; Domínguez y Domínguez, 1994).

Otro factor es la mineralización del nitrógeno que juega un papel importante en el ciclo del nitrógeno, ya que convierte el amoníaco a su forma oxidada de nitrato, que es un ion más fácilmente asimilado por las plantas. El amoníaco se produce naturalmente en la mineralización de la materia orgánica nitrogenada del suelo o se aplica directamente como fertilizante químico, el cual, si no es manejado de forma adecuada, puede causar problemas de contaminación de agua por nitratos, lo que finalmente afecta la calidad del agua (O'Leary *et al.*, 1997).

El exceso de nutrición de la planta en nitrógeno produce una vegetación excesiva que conlleva algunos inconvenientes como puede ser el aumento del número y tamaño de las células de las hojas, con un incremento general en la producción de hojas, retraso en la maduración, la planta continúa desarrollándose pero tarda en madurar, en perjuicio de la producción de semillas. El exceso también produce mayor sensibilidad a enfermedades, los tejidos permanecen verdes y tiernos más tiempo, siendo más vulnerables, inclusive restringen el aprovechamiento del potasio y producir síntomas de deficiencia de potasio (Devlin, 1970; Havlin *et al.*, 1993; MIRAT, 2006).

La acumulación de nitratos es función del tipo de planta de que se trate (especie, variedad, edad, parte y otros.) y de las condiciones de cultivo (temperatura, luz, humedad, tipo y cantidad de fertilizante, época de cosecha, tratamientos post-cosecha y otros) (Mayor *et al.*, 1993).

Los factores ambientales de cultivo, especialmente la luz y la temperatura, son las principales causas de la acumulación de nitratos, aunque también se han de tener en cuenta la humedad, fertilización y otros (Domínguez *et al.*, 2004).

El problema de los nitratos en los vegetales radica en que tras su ingesta pueden ser reducidos a nitritos en el interior del organismo humano, especialmente en los niños de menos de tres meses de edad y en adultos con ciertos problemas. Los nitritos producen la transformación de la hemoglobina a metahemoglobina y esta impide la correcta oxigenación del organismo. Una vez formado los nitritos, pueden reaccionar con las aminos

presentes en nuestro organismo originando las nitrosaminas que tienen una acción cancerígena (Dittrich y Leitzmann, 1998).

Teniendo en cuenta lo anterior, los expertos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) han fijado una ingesta diaria admisible sin riesgo aparente para la salud de 3.65 mg de nitrato y 0.113 mg de nitrito, por kilogramo de peso corporal, reduciendo a cero los nitritos en el caso de lactantes (Anton y Lizasio, 2001; Domínguez *et al.*, 2004).

Méndez y Costa (1996), indican que 86% de la ingesta de nitratos proviene de las hortalizas, 9% de las carnes, 2% del pan, 1.4% de las frutas y zumos, y tan sólo 0.7% del agua.

En el caso del brócoli, el exceso de nitrógeno ocasiona el tallo hueco, que es una alteración fisiológica que origina un resquebrajamiento interno en forma elíptica en el tallo floral y deja un espacio vacío que disminuye la calidad. Este daño es visible, por lo tanto afecta la comercialización del producto fresco y está asociado con una decoloración indeseable en la preparación del producto congelado para exportación (Cutcliffe, 1972; Dufault y Waters, 1985). Se ha mencionado que la incidencia de este daño aumenta con la aplicación de nitrógeno al brócoli y se presenta con mayor frecuencia en las primeras cosechas, lo que sugiere que las plantas con crecimiento más acelerado son más propensas a presentarlo. A pesar de ella, el semincremento en el rendimiento por la adición del elemento es mayor que las pérdidas debidas a tallo hueco (Cutcliffe, 1972; Dufault y Waters, 1985; Hipp, 1974); la proporción adecuada de nitrógeno y boro para cada suelo y clima, reduce la presencia de tallo hueco en el brócoli (Moniruzzaman *et al.*, 2007).

Aunque el uso de fertilizantes nitrogenados ha sido uno de los principales promotores del aumento en el rendimiento en la agricultura actual, su utilización implica riesgos de contaminación ambiental, por la lixiviación del nitrógeno no absorbido hacia aguas subterráneas. Además, su aplicación excesiva conlleva a la degradación de la calidad del suelo por salinidad (ensalitramiento) y un incremento infructuoso en los costos de producción. De esta manera, los fertilizantes se han convertido en una tecnología que puede

propiciar grandes beneficios, cuando se utilizan de manera razonada, pero que al mismo tiempo puede causar severos daños al medio ambiente y pérdidas económicas cuando se usa de forma indiscriminada (Cuadro 2.1). Ante esta situación, se hace necesario contar con tecnologías aplicables a la gestión razonada del nitrógeno en los sistemas de producción agrícola, con el fin de hacerlos sustentables, aportando las cantidades mínimas necesarias para alcanzar el rendimiento potencial de los cultivos (Cárdenas *et al.*, 2004).

Cuadro 2.1. Problemas causados por el exceso de nitrógeno en el ambiente.

Problema	Causa
Metahemoglobinemia en infantes	Exceso de NO ₃ y NO ₂ en el agua y alimentos
Cáncer	Nitrosaminas de NO ₂
Problemas respiratorios	Nitrato peoxicil, aerosoles de NO ₃ , vapor de HN ₃ en la atmósfera urbana
Salud animal (abortos de los terneros, disminución en la producción de leche)	Exceso de NO ₃ y NO ₂ en el agua y alimentos
Eutroficación	Nitrógeno inorgánico y orgánico en el agua superficial
Daños materiales y ecológicos	Aerosoles con HNO ₃ en la lluvia
Excesivo crecimiento de las plantas	Altos niveles de NO ₂
Disminución del ozono estratosférico	Óxido nitroso, desnitrificación y por emisiones de aviones
Contaminación de aguas superficiales y subterráneas	Exceso de NO ₃ y por descarga de NO ₃ y NH ₄ de los terrenos agrícolas

2.2. El modelo sistémico para generar dosis de fertilizantes

La producción de los cultivos agrícolas, es un componente de un sistema en que la máxima expresión de su potencialidad depende de la heterogeneidad del suelo, variabilidad del clima y el manejo a que se somete la unidad de producción. Debido a lo anterior, la medición de la variación de la respuesta a la nutrición de los cultivos, para poder establecer recomendaciones de fertilización, en un problema metodológico complejo (Galvis, 1990).

Entre los factores limitantes de la producción que se puede intervenir de manera efectiva está la condición nutrimental edáfica. Para esto se deben adicionar oportunamente y en cantidades adecuadas los nutrimentos que le falten al cultivo cuando el suelo no los suministre en cantidades y tiempo requeridos. Por lo tanto, si la aplicación de fertilizantes se realiza racionalmente, contribuirá al incremento de la producción y rentabilidad de sistema de producción (López, 2001).

Es fundamental hacer énfasis en que es necesario aplicar los fertilizantes de manera racional, puesto que su uso desmedido, además de afectar la economía del productor, incrementa el riesgo de contaminar los mantos freáticos, saliniza el suelo u ocasiona efectos nocivos al agroecosistema (López, 2001).

Existen distintas metodologías que se utilizan para la generación de recomendaciones de fertilización sobre prácticas de producción, siendo necesario establecer una estrategia para determinar el rendimiento. Este parámetro está estrechamente ligado a los requerimientos nutricionales de los cultivos (Rodríguez y Álvarez, 2010).

Para realizar las recomendaciones de fertilización se utilizan modelos empíricos y mecanísticos:

- En los modelos empíricos se relaciona el rendimiento como índice de sitio, incremento en volumen o peso, con distintas variables de clima y suelo del sitio, para esto se utilizan técnicas de correlación y calibración de métodos analíticos y

los ensayos de respuesta de fertilización de cultivo a la fertilización, aplicando análisis estadísticos como regresión múltiple, análisis de componentes principales, análisis discriminario y otros para proponer una dosis de fertilización específica (López, 2001; Rodríguez y Álvarez, 2010).

- Los modelos mecanísticos o de procesos se centran principalmente en el balance del carbono y/o nitrógeno, que permite estimar las tasas de acumulación de biomasa de los cultivos restringidos por distintos factores de clima y suelo. Entre los modelos mecanísticos está la propuesta por Rodríguez (1993), denominado Modelo sistémico.

Tradicionalmente se ha llegado a una generalización de las normas de fertilización a partir de una serie de casos empíricos, Ahora se propone establecer los principios de la nutrición de los cultivos y en base a esto simular, predecir o explicar los principios de la nutrición de los cultivos a la fertilización en cualquier caso particular.

Los modelos simplificados deben ser eficientes y realistas, capaces de describir el sistema en su totalidad con un mínimo de postulados (Rodríguez y Álvarez, 2010).

En una región o zona agrícola se encuentran diferentes agroecosistemas y por lo tanto, diferentes potenciales productivos. Por otra parte, dentro de cada uno de ellos existe una variada disponibilidad de nutrientes, sitio específico, producto de diverso manejo de los agroecosistemas en ellos incorporados como residuos de la cosecha, historial de fertilización y otros (Rodríguez, 1993).

La biomasa del cultivo alcanzable en un delimitado agroecosistema genera una demanda de nutrientes para satisfacer sus necesidades metabólicas. La demanda de nutrientes de la biomasa de los cultivos, en especial de nitrógeno y fósforo no es satisfecha con el suministro de nutrientes que es capaz de entregar el suelo y se produce un déficit nutricional del cultivo. El objetivo de la fertilización es satisfacer este déficit, para obtener la producción alcanzable del cultivo, en un determinado agroecosistema (Rodríguez, 1993).

El cultivo no recupera todo el fertilizante aplicado, debido a que este sufre distintas pérdidas en su interacción con el suelo. Esto conduce a considerar una cierta eficiencia de la fertilización de los cultivos en los distintos agroecosistemas. En la eficiencia se considera, la proveniente de las interacciones suelo-fertilizante y suelo-planta. Por lo tanto, la norma de fertilización de acuerdo a lo señalado anteriormente, está dada por la demanda de nutrientes de un cultivo, el suministro de nutrientes del suelo y a la eficiencia de la fertilización (Stanford, 1973; Rodríguez, 1993).

La formulación del modelo es la siguiente:

$$DFN = \frac{DN - SNS}{EFN}$$

Dónde:

DFN = Dosis del fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}).

DN = Demanda de nitrógeno (kg ha^{-1}).

SNS = Suministro de nitrógeno del suelo (kg ha^{-1}).

EFN = Eficiencia de la fertilización nitrogenada (%).

El planteamiento general del sistema descansa sobre un análisis racional simplificado de la nutrición de los cultivos, que lo vincula, en su enfoque general, a los modelos racionales comprensivos de la nutrición de los cultivos. Un esquema general de la dinámica de los nutrientes en el suelo su estructura y componentes, se presenta en la Figura 2.2.

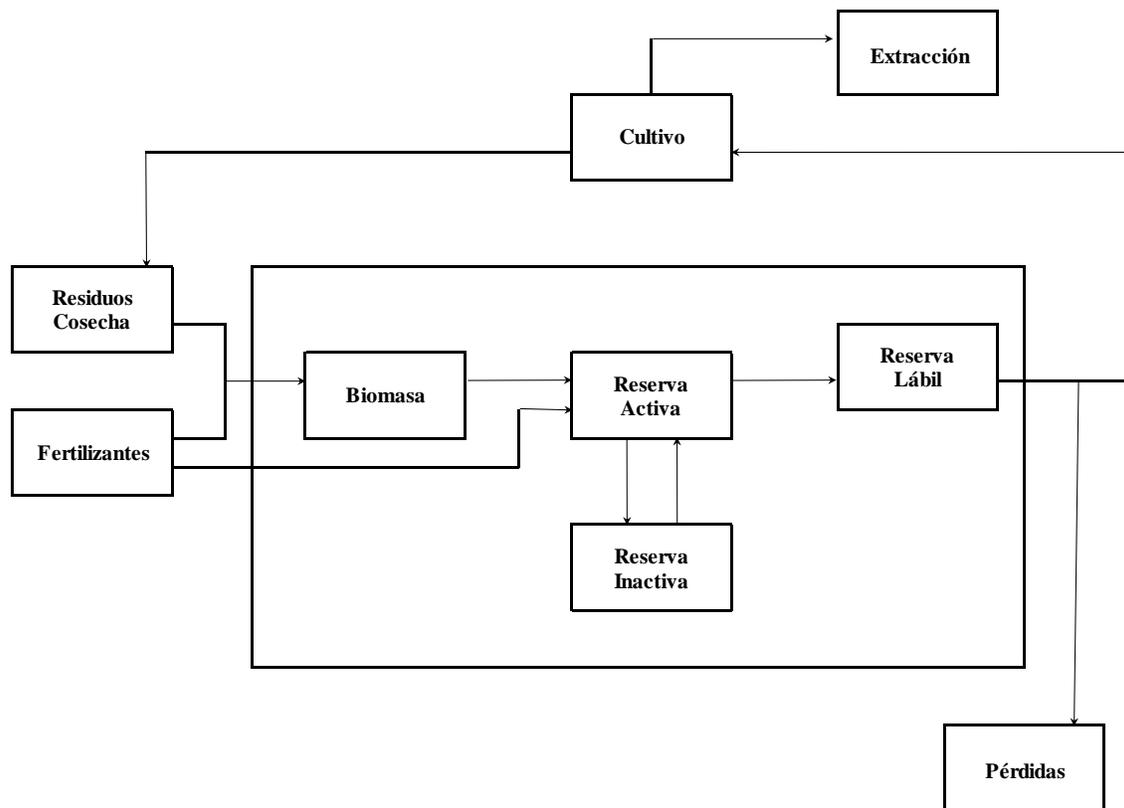


Figura 2.2. Dinámica de los nutrientes en el suelo (Rodríguez, 1993).

El esquema de síntesis presentado, es válido para todos los nutrientes. Las entradas al sistema están dadas por el reciclaje de los residuos orgánicos, por la biomasa del suelo y por la fertilización. Por otra parte, las salidas del sistema derivan las pérdidas de nutrientes por lixiviación, volatilización o desnitrificación y por la extracción de nutrientes en las cosechas (Rodríguez, 1993).

Según Galvis (1990), el planteamiento metodológico requiere de un periodo de tiempo previo en el desarrollo en el cual consta de cinco etapas:

- Caracterización de los parámetros necesarios para la estratificación de la región en agroecosistemas (factores no controlables).
- Hipótesis cuantificada con el mayor detalle posible con la información existente de la estratificación de la región en agroecosistemas (demandas y eficiencias homogéneas).
- Estimación de la demanda de nutrientes y de la eficiencia de la fertilización con base en la caracterización de los diferentes agroecosistemas.
- Estimación de las normas de fertilización para los diferentes agroecosistemas.
- Validación de las normas estimadas con un reducido número de experimentos de dosis de fertilizantes en los principales agroecosistemas.

Los parámetros que se requieren para validar la predicción de las normas de fertilización son las siguientes:

- Agrosistema (demanda de nutrientes o eficiencia de la fertilización).
- Eficiencia de absorción (cultivo).
- Residuos de cosecha del cultivo anterior (suministro de nitrógeno).
- Eficiencia de la fertilización (eficiencia de la fertilización).

Galvis (1990), propone una estructura del modelo de estimación de las normas de fertilización, es un modelo estático que puede ser manipulado tanto en forma discreta como continua (Figura 2.3).

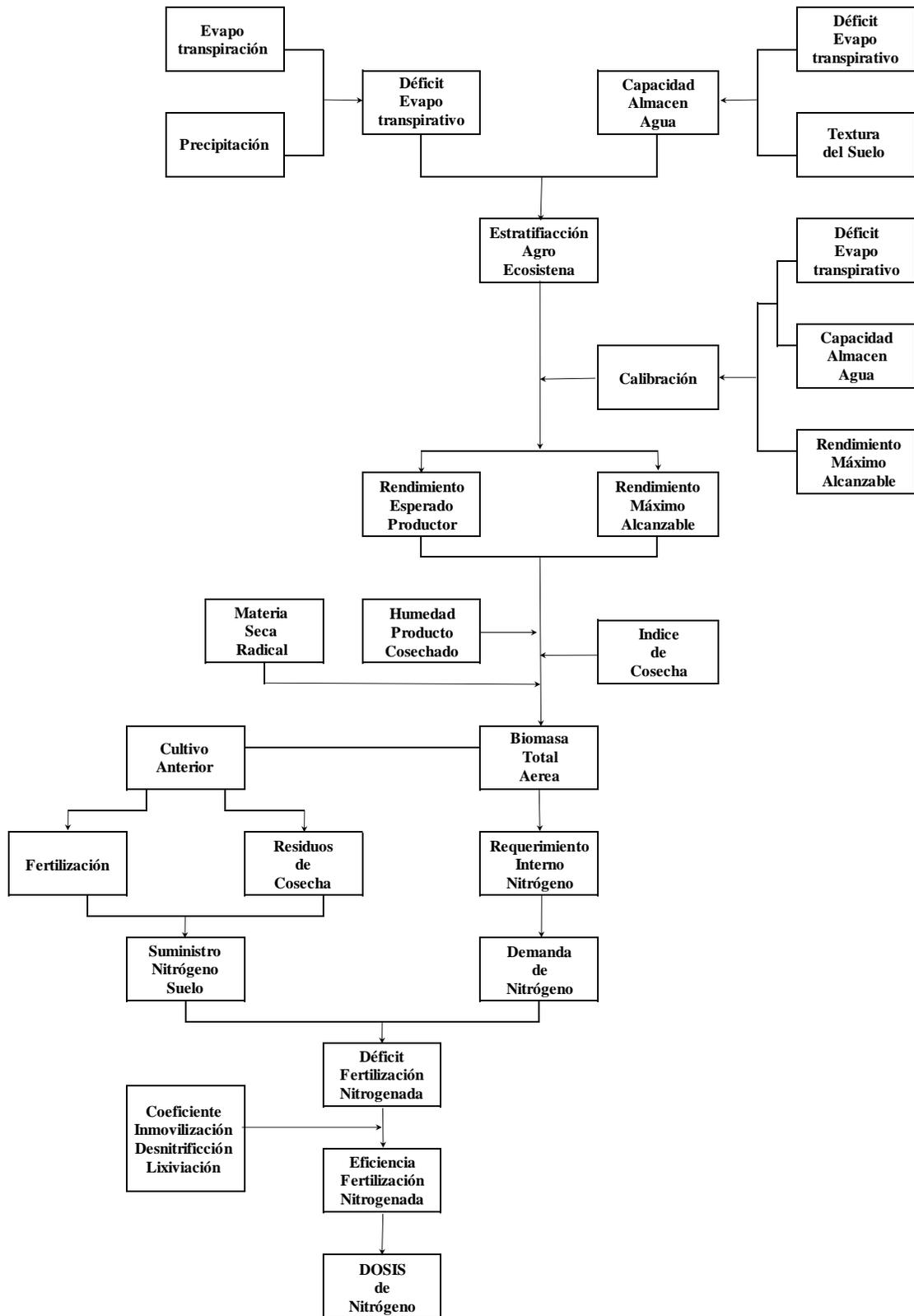


Figura 2.3. Modelo simplificado para generar dosis de fertilización nitrogenada en los cultivos anuales (Galvis, 1990).

- En una primera etapa se calcula el déficit evapotranspirativo, utilizando parámetros climatológicos (precipitación y evaporación) y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo tomado en cuenta las propiedades físicas del suelo (textura y profundidad). Estas características edafoclimáticas condicionan la expresión del rendimiento máximo alcanzable. Posteriormente se transforma con el índice de cosecha, humedad del producto cosechado y con la materia seca de la raíz en la biomasa total máxima alcanzable.
- En la segunda etapa, el modelo estima la demanda del cultivo, considerando la biomasa total máxima alcanzable y el requerimiento interno. También determina el suministro de nitrógeno en el suelo a partir de la fertilización nitrogenada y los residuos de la cosecha anterior. La relación entre la demanda y el suministro genera un déficit que debe ser resuelto mediante la aplicación de un fertilizante en caso de requerirlo.
- Para la tercera etapa se calcula la eficiencia de la fertilización nitrogenada considerando los coeficientes de desnitrificación, inmovilización y lixiviación. Con todos los parámetros resultantes el modelo calcula la dosis de fertilizante nitrogenado.

Galvis (2014), realizó una modificación al modelo sistémico de estimación de las normas de fertilización (Figura 2.4).

- En la primera etapa del modelo se obtiene la demanda nutrimental del cultivo, la cual resulta de realizar un experimento de respuesta del nutriente en estudio (Figura 2.5), en el que se aplica dosis crecientes, con el objeto de conocer el rendimiento máximo alcanzable, la biomasa aérea y la concentración del nitrógeno.
- Para la segunda etapa, establece relaciones con la dosis de nitrógeno aplicado, rendimiento y nitrógeno acumulado en la biomasa aérea, y se representan en el plano cartesiano utilizando los tres ejes en los cuales en los que el cuadrante a) establece la relación entre la dosis de nitrógeno aplicado (eje horizontal izquierdo) y rendimiento (eje vertical superior), el cuadrante b) describe la variación entre el nitrógeno acumulado en la biomasa (eje horizontal derecho) y el rendimiento (eje

vertical superior) y en el cuadrante c) muestra la variación entre el nitrógeno acumulado en la planta (eje horizontal derecho) y la dosis de nitrógeno aplicado (eje vertical inferior) y se utiliza para determinar el suministro de nitrógeno en el suelo y la eficiencia de la fertilización nitrogenada aplicado un modelo de regresión (Figura 2.6). Las variaciones en las relaciones han sido descritas por Van Keulen (1981) para arroz, Loomis y Connor (1992), Rouanet (1994) para maíz y trigo y Berti *et al.*, (2000) en quinua.

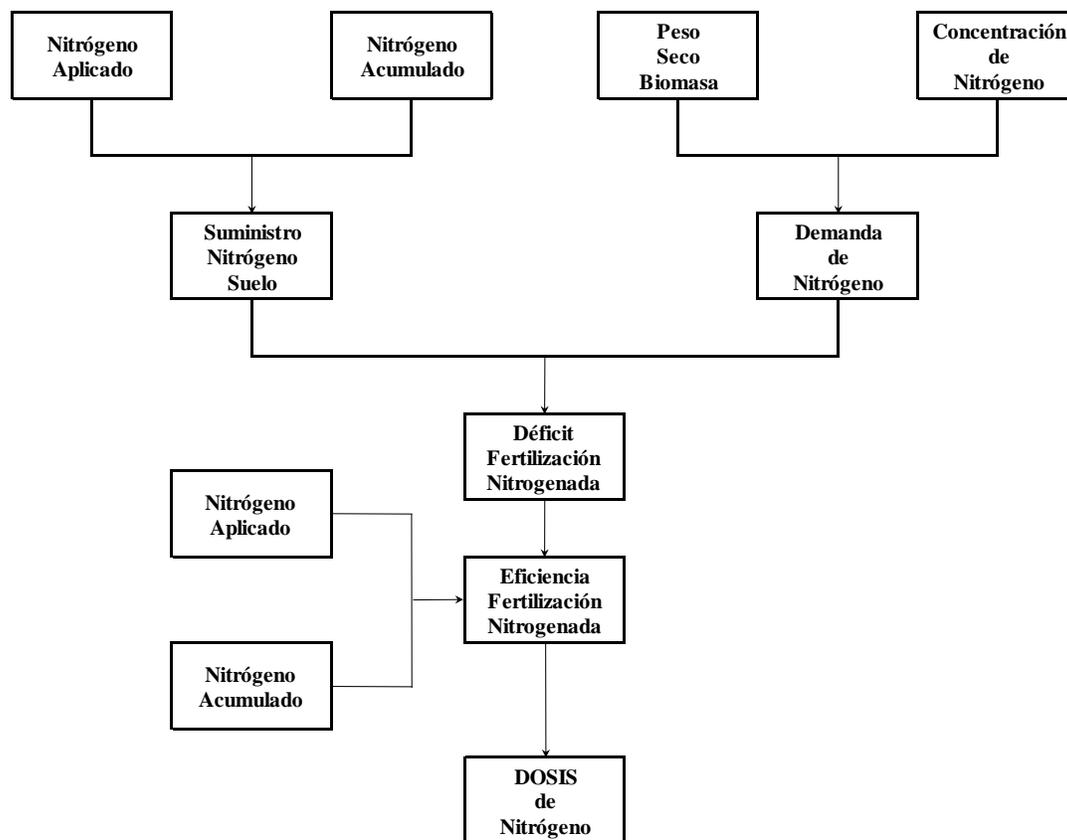


Figura 2.4. Modelo simplificado modificado para generar dosis de fertilización nitrogenada en los para cultivos anuales (Galvis, 2014).

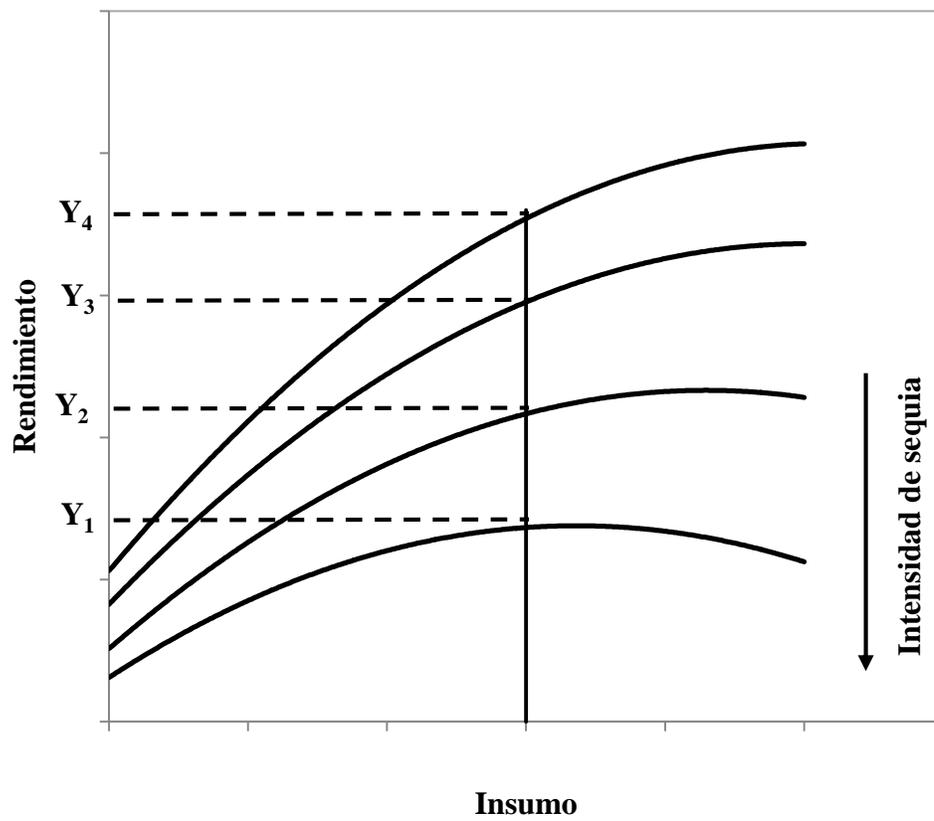


Figura 2.5. Curvas de rendimiento de un cultivo en relación con la intensidad de la sequía (Volque, 1988).

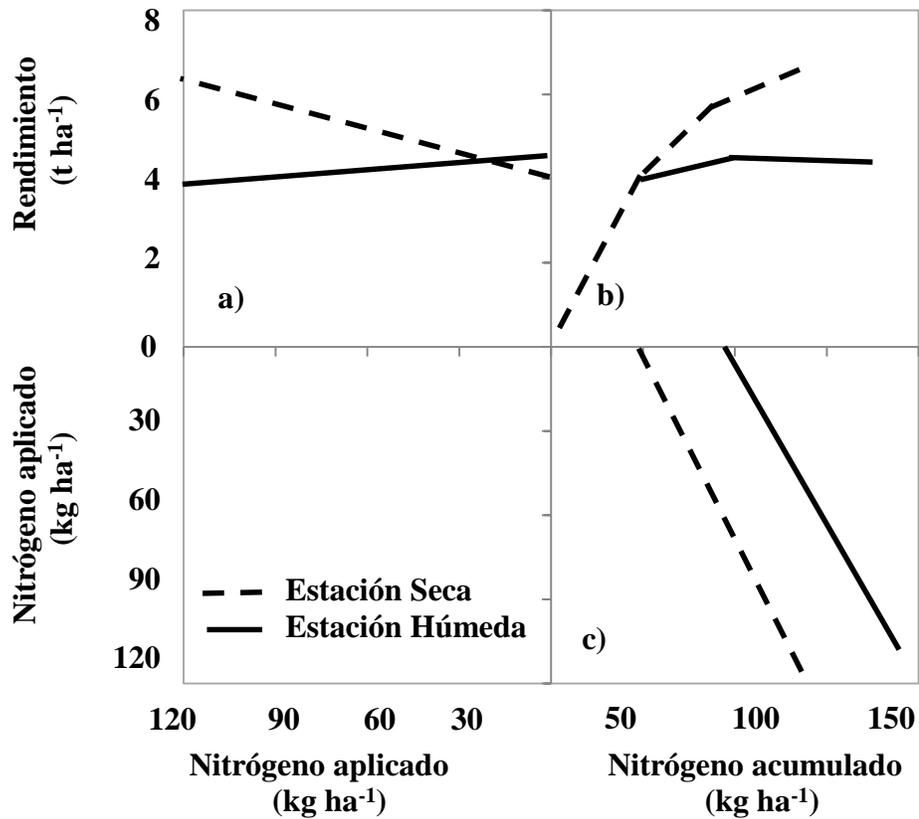


Figura 2.6. Relación entre dosis de nitrógeno y rendimiento (cuadrante a); nitrógeno acumulado en la planta y rendimiento (cuadrante b) y dosis de nitrógeno y nitrógeno acumulado en la planta (cuadrante c), para el cultivo de arroz IIRI. Los Baños, Filipinas en la estación seca y húmeda (Tanaka *et al.*, 1964).

2.2.1. Demanda nutrimental

La demanda de los nutrientes en un cultivo, varía en función de la biomasa total más el producto económico que se pueda obtener en una condición dada. Lo anterior depende de las características genéticas del cultivo que determinan un potencial de acumulación de biomasa y rendimiento, de las condiciones edafoclimáticas del medio en que se desarrolla e interaccionan con la planta para que se acumule la biomasa; y también las prácticas agrícolas que realiza el hombre que facilitan la mencionada acumulación. La demanda de nitrógeno por los cultivos se expresa mediante la siguiente fórmula propuesta por Rodríguez (1993):

$$DN = \frac{a \times RE \times (1 - H) \times RIN}{IC}$$

Dónde:

- DN = Demanda de nitrógeno (kg ha⁻¹).
- a = Coeficiente radicular (1.15 biomasa aérea).
- RE = Rendimiento esperado (kg ha⁻¹).
- H = Humedad de producto cosechado (%).
- RIN = Requerimiento interno de nitrógeno (%).
- IC = Índice de cosecha (%).

Simplificando la fórmula anterior se obtiene:

$$DN = a \times BTA \times RIN$$

Dónde:

- DN = Demanda de nitrógeno (kg ha⁻¹).
- a = Coeficiente radicular (1.15 biomasa aérea).
- BTA = Biomasa total alcanzable por la parte aérea (kg ha⁻¹).
- RIN = Requerimiento interno de nitrógeno (%).

En el caso de ciertos cultivos que el producto comercial son las raíces se debe incluir en la biomasa.

Posteriormente Rodríguez *et al.*, (2001), propone una variación a la fórmula anterior eliminando el coeficiente radicular.

$$DN = \frac{RE \times (1 - H)}{IC} \times RIN$$

Dónde:

DN = Demanda nutrimental en términos de la unidad edafoclimática (kg ha⁻¹).

RE = Rendimiento esperado (kg ha⁻¹).

H = Porcentaje de humedad (%).

RIN = Requerimiento interno de nitrógeno (%).

IC = Índice de cosecha.

El rendimiento esperado, corregido por un determinado porcentaje de humedad es expresado en términos de la biomasa y todo esto relacionado para el índice de cosecha corresponde a la biomasa total del cultivo, quedando en la siguiente expresión:

$$BAT = \frac{RE \times (1 - H)}{IC}$$

Dónde:

BAT = Biomasa aérea total (kg ha⁻¹).

RE = Rendimiento esperado (kg ha⁻¹).

H = Porcentaje de humedad (%).

IC = Índice de cosecha.

Simplificando el cálculo de la demanda nutrimental en:

$$DN = BAT \times RIN$$

Dónde:

DN = Demanda de nitrógeno (kg ha⁻¹).

BAT = Biomasa aérea total (kg ha⁻¹).

RIN = Requerimiento interno de nitrógeno (%).

Para Bertsch (1998), la demanda del cultivo se refieren a la cantidad (kg ha⁻¹) de elemento puro que consume una plantación desde la siembra hasta la cosecha, y se obtienen al multiplicar la concentración de cada elemento en una planta entera al final de su ciclo productivo por la biomasa de la planta, considerando la densidad de la población.

$$DN = \frac{N \times BA}{100} \times D_p$$

Dónde:

DN = Demanda de nitrógeno (kg ha⁻¹).

N = Concentración de nitrógeno (%).

BA = Biomasa aérea en peso seco (kg ha⁻¹).

D_p = Densidad de población (plantas ha⁻¹).

Bouzo (2003), menciona que la demanda de nitrógeno del cultivo se establece a partir del rendimiento esperado, índice de cosecha, proporción en peso de la materia seca del producto a cosechar y requerimiento interno de nitrógeno.

$$DN = \frac{RE}{IC} \times B \times RIN$$

Dónde:

DN = Demanda de nitrógeno (kg ha⁻¹).

RE = Rendimiento esperado (kg ha⁻¹).

IC = Índice de cosecha.

B = Biomasa (%).

RIN = Requerimiento interno de nitrógeno (%).

Villalobos *et al.*, (2009), indican que la determinación de la demanda de nitrógeno o nitrógeno absorbido en la biomasa, se realiza en función de la producción prevista de biomasa (rendimiento más residuo) y de la concentración de nitrógeno de esa biomasa.

$$N_c = Y \times NC_g + (B - Y) \times NC_r$$

$$N_c = Y \times \left[NC_g + \frac{(1 - IC)}{IC} \times NC_r \right]$$

Dónde:

- N_c = Nitrógeno absorbido en la biomasa (kg ha^{-1}).
- Y = Rendimiento (kg ha^{-1}).
- NC_g = Concentración del nitrógeno producto a cosechar (%).
- B = Biomasa producida.
- NC_r = Concentración del nitrógeno en el residuo (%).
- IC = Índice de cosecha.

En el cálculo de la demanda de nutrientes se requiere establecer además del rendimiento esperado bajo una condición edafoclimática, el requerimiento interno del cultivo y el índice de cosecha.

El índice de cosecha indirectamente indica la eficiencia de la energía metabólica utilizada por el cultivo para sintetizar los productos orgánicos (carbohidratos, lípidos o proteínas) para su desarrollo. Los cultivos de oleaginosas presentan bajos índices de cosecha, debido a que destinan la mayor parte de la energía que sintetizan (glucosa) a la producción de lípidos (constituyentes primordiales de la semilla) y menos a la acumulación de fotoasimilados como carbohidratos estructurales o de reserva. En el caso de otros cultivos como tubérculos y raíces, cuyos productos cosechados acumulan carbohidratos, requiere menor energía de conversión, producen y conservan más biomasa, por lo que sus índices de cosecha son más altos (Rodríguez, 1993).

Este índice de cosecha suele ser bastante constante para un cultivo dado bajo condiciones óptimas de manejo, y sus variaciones están dadas principalmente por la variedad y factores climáticos y de suelo relacionados con el régimen hídrico (Etchevers *et al.*, 1991; Rodríguez, 1993, Beltrán *et al.*, 1996).

$$IC = \frac{PE}{BA}$$

Dónde:

- IC = Índice de cosecha
PE = Producto económico (kg ha⁻¹).
BA = Biomasa aérea (kg ha⁻¹).

Para Galvis (1990) y Rodríguez (1993), el requerimiento interno es la concentración del nutriente de interés en la biomasa total, en la oportunidad de la cosecha, con una nutrición óptima y es independiente del rendimiento.

El porcentaje promedio de nitrógeno orgánico en la biomasa total de las plantas disminuye a medida que crecen aunque su desarrollo sea adecuado. Esta disminución ocurre porque al desarrollarse en las plantas una mayor proporción de los fotosintatos es dirigido a la síntesis de los materiales libres de nitrógeno requeridos como soporte estructural (Rodríguez, 1993).

En una simplificación de los procesos bioquímicos, el CO₂ fijado fotosintéticamente se convierte primero en glucosa, la cual es utilizada:

- Para la síntesis de materiales estructurales y de almacenamiento que están libres de nitrógeno y requieren de energía para su mantención.
- Para la síntesis y la mantención de las proteínas.

Durante el crecimiento existe un balance entre las proporciones de la glucosa metabolizada por estos materiales. Por otra parte, la masa de la glucosa metabolizada por unidad de masa

de materiales libres de nitrógeno y por unidad de masa de proteínas es más alta que la de glucosa metabolizada a materiales libres de nitrógeno. En el periodo de crecimiento se presenta una disminución de la concentración de nitrógeno o del contenido de proteínas; que al acumularse una mayor proporción de materiales no proteicos disminuye exponencialmente la concentración de nitrógeno a medida que se incrementa la biomasa total del cultivo (Rodríguez, 1993).

Las relaciones alométricas bioquímicas son validadas por las distintas especies vegetales y por lo tanto se presenta una relación entre la concentración de nitrógeno y la acumulación de la biomasa total, estableciéndose una función entre ambos parámetros (Figura 2.7).

La función indica que las concentraciones de nitrógeno en la biomasa total fluctúan entre 5% en el inicio del crecimiento y 1% después de alcanzar una biomasa de 10 t ha⁻¹.

Mediante la función es posible predecir la concentración crítica de nitrógeno para los distintos cultivos durante el periodo de crecimiento y en cualquier oportunidad de cosecha.

Para todos aquellos cultivos que alcanzan la senescencia en la oportunidad de la cosecha, el requerimiento interno de nitrógeno se encuentra alrededor 1.2% (Rodríguez, 1993).

$$(\%) = 0.011 + [1 + 5e^{(-0.26 \times BAT)}]$$

Dónde:

(%) = Concentración de nitrógeno (%)

BAT = Biomasa aérea total (t ha⁻¹).

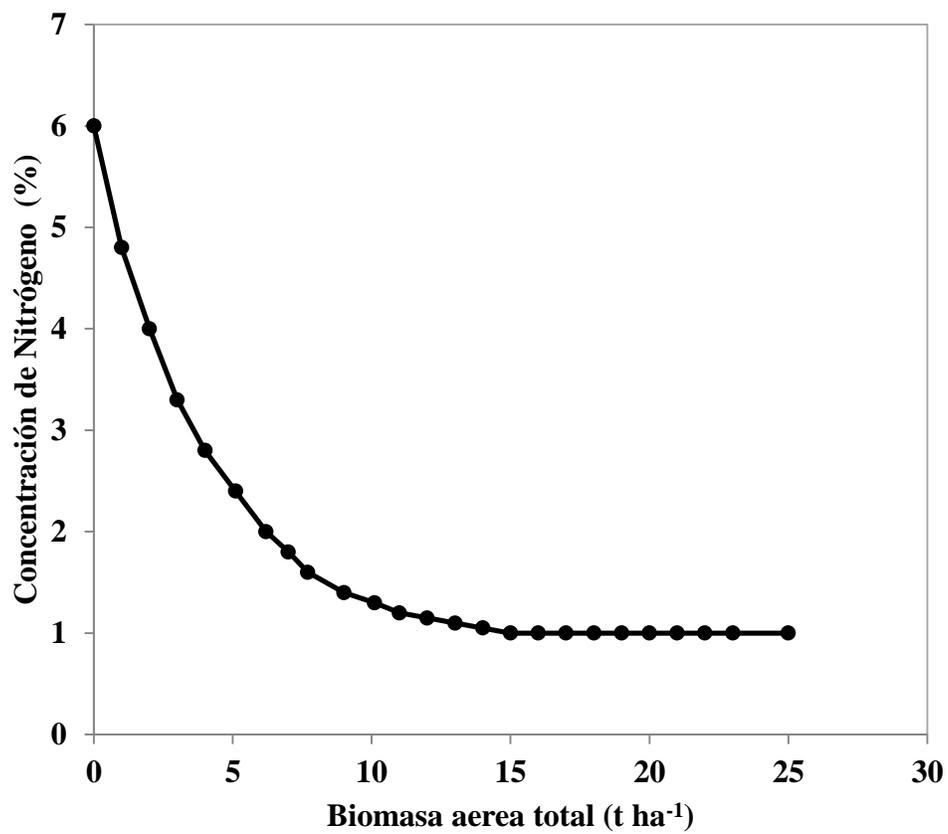


Figura 2.7. Concentración de nitrógeno en la biomasa aérea en la cosecha de distintos cultivos con una nutrición nitrogenada adecuada (Rodríguez, 1993).

2.2.2. Suministro de nitrógeno del suelo

Para Bouzo *et al.*, (2003), para el cálculo del suministro del nitrógeno del suelo se necesita conocer la secuencia de cultivos habitual que se realiza y para cada uno se calcula el aporte que realiza al suelo en residuos y el contenido promedio de nitrógeno (%) del material (Figura 2.8). El aporte de residuos al suelo se estima a partir del rendimiento promedio alcanzado, la proporción de la biomasa y el índice de cosecha, según la siguiente ecuación:

$$RO = \frac{RTO \times B}{IC} \times (1.15 - IC)$$

Dónde:

RO = Residuos del suelo (kg ha⁻¹).

RTO = Rendimiento promedio alcanzado (kg ha⁻¹).

B = Biomasa (kg ha⁻¹).

IC = Índice de cosecha.

El porcentaje de nitrógeno del residuo de la cosecha varía con el cultivo, no obstante una manera aproximada de calcularlo es con relación a la biomasa final estimada del cultivo (BF) en toneladas.

$$(\%) = 0.011 + [1 + 5 (e^{-0.26 \times BF})]$$

$$BF = \frac{RTO}{IC} \times B \times 10^{-5}$$

Dónde:

BF = Biomasa final (kg ha⁻¹).

RTO = Rendimiento promedio alcanzado (kg ha⁻¹).

B = Biomasa (kg ha⁻¹).

IC = Índice de cosecha.

El aporte de nitrógeno suelo resulta:

$$ApN = \frac{(\%)}{100} \times RO$$

Dónde:

ApN = Aporte de nitrógeno al suelo (kg ha^{-1}).

(%) = Porcentaje de nitrógeno en el rastrojo (kg ha^{-1}).

RO = Residuos del suelo (kg ha^{-1}).

El nitrógeno que retorna al suelo es dividido en resistente y lábil. La fracción resistente depende básicamente de los residuos, medido a través de la relación carbono/nitrógeno indica una mayor o menor facilidad de descomposición del material orgánico.

La fracción lábil que es el resultado de las fracciones orgánicas de fácil descomposición tanto de los residuos de la cosecha como de los subproductos microbiales (Matus, 1997).

El nitrógeno estabilizado es el resultante de las fracciones orgánicas resistentes de los residuos y subproductos microbiales, acumulados en la matriz arcillosa del suelo (Matus, 1997).

En este procedimiento, el aporte de nitrógeno por mineralización del almacenamiento del nitrógeno pasivo no es considerado como tampoco las pérdidas por lixiviación, suponiendo entre estos un efecto compensatorio (Matus, 1997).

El cálculo del almacenamiento y nitrógeno estabilizado depende del nitrógeno resistente, siendo éste función de la relación carbono/nitrógeno del residuo:

$$NRo = 0.5408 + 0.0053 \times \left(\frac{C}{N}\right)$$

Dónde:

NR_0 = Nitrógeno resistente (kg ha^{-1}).

C/N = Relación carbono/nitrógeno.

$$NL = \left(1 - \frac{NR_0}{100}\right) \times ApN$$

Dónde:

NL = Nitrógeno lábil (kg ha^{-1}).

NR_0 = Nitrógeno resistente (kg ha^{-1}).

ApN = Aporte de nitrógeno al suelo (kg ha^{-1}).

$$NE = \left(\frac{NR_0}{100}\right) \times ApN$$

Dónde:

NE = Nitrógeno estabilizado (kg ha^{-1}).

NR_0 = Nitrógeno resistente (kg ha^{-1}).

ApN = Aporte de nitrógeno al suelo (kg ha^{-1}).

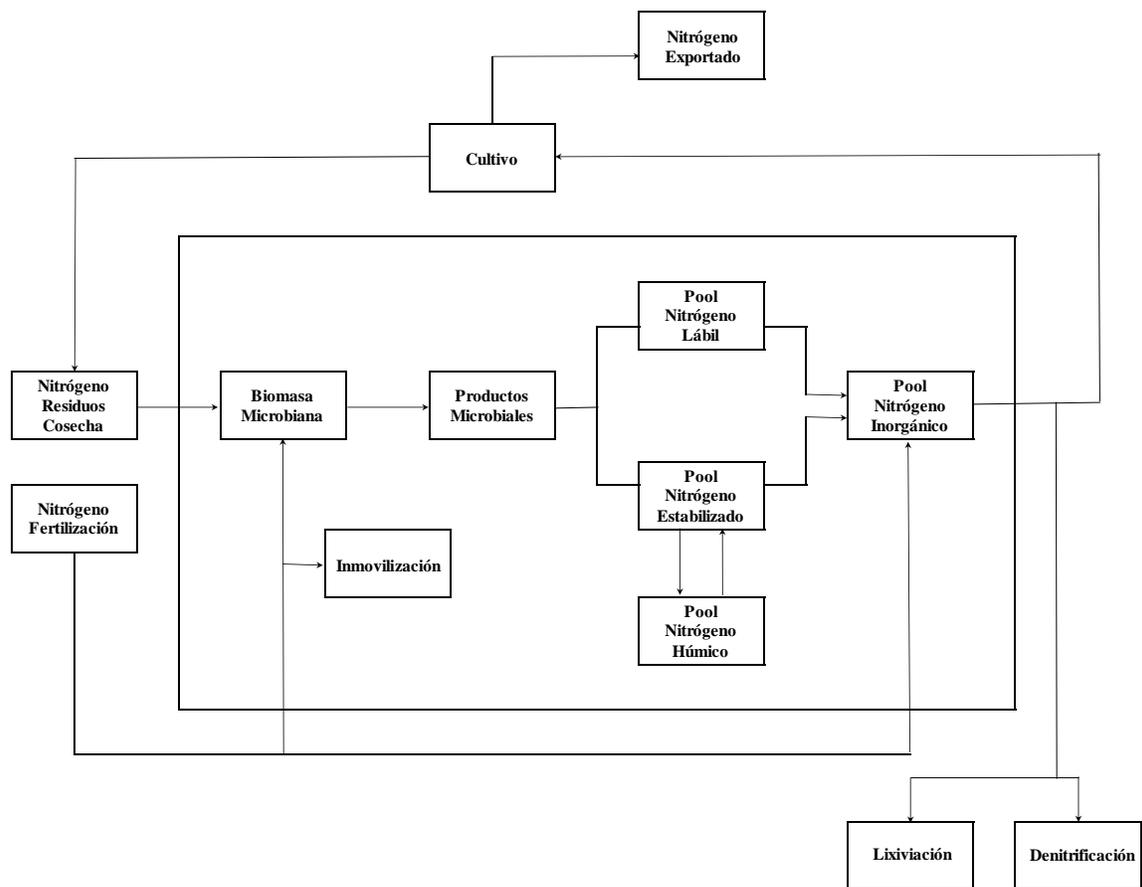


Figura 2.8. Suministro del nitrógeno en el suelo (Rodríguez, 1993).

La relación carbono/nitrógeno es variable según el cultivo del que provenga el residuo de la cosecha; para los agrosistemas en condiciones de equilibrio, resultantes de una misma secuencia de cultivos y manejo de residuos de varios años, se supone que las entradas de almacenamiento del nitrógeno estabilizado son iguales a la salida por mineralización. El aporte de nitrógeno a un cultivo desde el almacenamiento del nitrógeno estabilizado y resulta de un promedio del reportado por la secuencia “n” de cultivos considerados (Figura 2.9).

$$NE = \frac{NE_1 + NE_2 + \dots + NE_n}{n}$$

Dónde:

- NE = Nitrógeno estabilizado (kg ha⁻¹).
 NE₁ = Entradas de Nitrógeno estabilizado (kg ha⁻¹).
 n = Secuencia de los cultivos.

La proporción de nitrógeno que proviene del almacenamiento lábil, resulta del aportado por el cultivo inmediatamente anterior (NL_{i-1}) al cultivo actual (i). El suministro de nitrógeno por el suelo por lo tanto estará dado por la suma del nitrógeno estabilizado promedio de la secuencia de cultivos y del lábil del cultivo anterior.

$$SNS = NL_{(n-1)} \times NE$$

Dónde:

- SNS = Suministro de nitrógeno por el suelo (kg ha⁻¹).
 NL_(n-1) = Nitrógeno lábil del cultivo anterior.
 NE = Nitrógeno estabilizado (kg ha⁻¹).

En agrosistemas recientes y con condiciones alejadas del equilibrio, el almacenamiento de nitrógeno estabilizado actual se estima a partir de la fracción de nitrógeno resistente que adiciona cada cultivo. Par esto se considera la tasa de mineralización corregida por temperatura y humedad. Una forma de simplificar el nitrógeno estabilizado proveniente de

todos los cultivos de la secuencia resulta de considerar un promedio del aporte de nitrógeno de cada cultivo y del almacenamiento de nitrógeno resistente:

$$NE = (ApN_{prom} \times NRo_{prom}) \times \frac{1 - e^{[-K \times (n - 1)]}}{1 - e^{(-K)}}$$

Dónde:

- NE = Nitrógeno estabilizado (kg ha⁻¹).
 ApN_{prom} = Aporte de nitrógeno en cada cultivo (kg ha⁻¹).
 NRo_{prom} = Almacenamiento de nitrógeno resistente (kg ha⁻¹).
 k = Tasa de mineralización.
 n = Secuencia de los cultivos.

$$SNS = NRSPA + BNRSR \times 0.15FN$$

Dónde:

- SNS = Suministro de nitrógeno del suelo (kg ha⁻¹).
 NRSPA = Contenido de nitrógeno en la parte aérea (kg ha⁻¹).
 BNRSR = Contenido de nitrógeno en las raíces (kg ha⁻¹).
 0.15FN = Nitrógeno inmovilizado de la fertilización nitrogenada anterior (%).

$$SNS = 0.15 \times FN + NRES$$

Dónde:

- SNS = Suministro de nitrógeno del suelo (kg ha⁻¹).
 0.15 x NF = 15% fertilización nitrogenada anterior (kg ha⁻¹).
 NRES = Nitrógeno en los residuos de la cosecha (kg ha⁻¹).

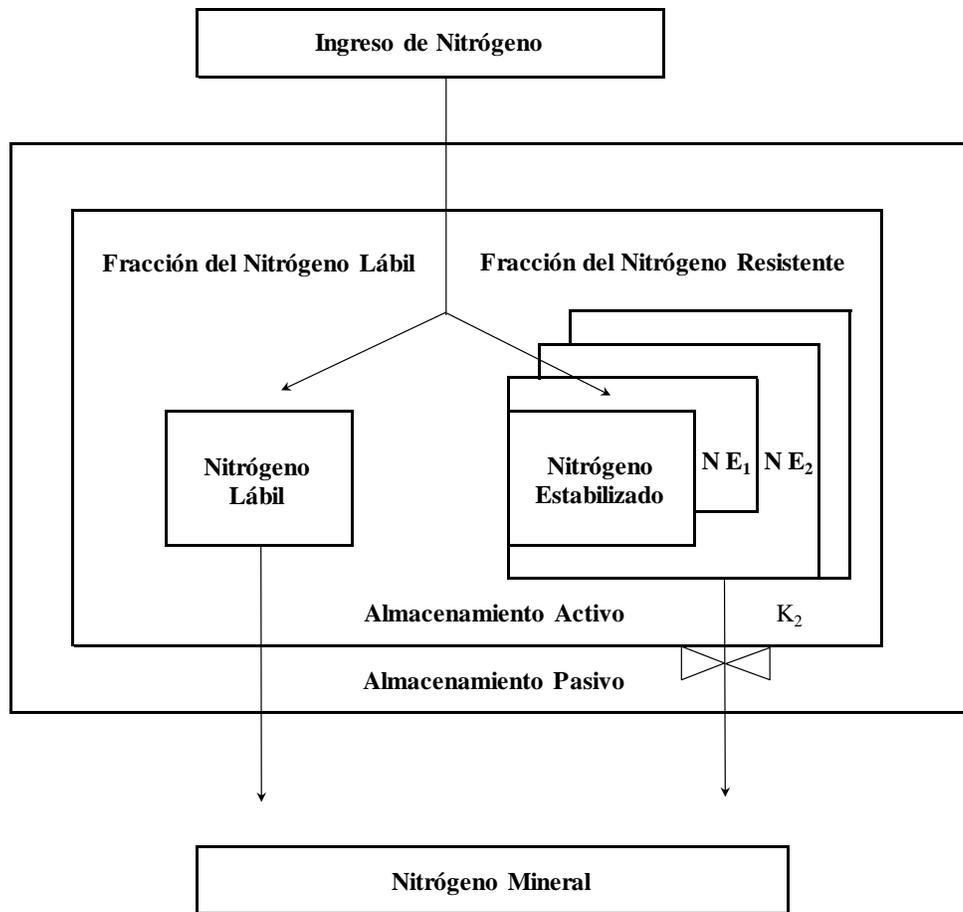


Figura 2.9. Modelo simple de la mineralización del nitrógeno en el suelo (Matus y Rodríguez, 1994).

2.2.3. Eficiencia de la fertilización nitrogenada

El tópico del uso eficiente de nutrientes ha ganado recientemente más atención con el incremento de los fertilizantes y la continua preocupación por el impacto ambiental, particularmente por la calidad del agua, asociada con el uso inapropiado de nutrientes. El incremento de las regulaciones gubernamentales y de programas de incentivos a todos los niveles también aumenta el interés del tema. Es consenso general que mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes es una labor valiosa que potencialmente puede entregar abundantes beneficios. Sin embargo es necesario definir precisamente que significa uso eficiente de nutrientes y si la diferencia difiere entre nutrientes. También es importante precisar cómo y cuándo se puede mejorar la eficiencia. Los conceptos de uso eficiente de nutrientes o de fertilizantes generalmente describen que tan bien las plantas o un sistema de producción usan los nutrientes. La eficiencia puede verse a corto o largo plazo y puede basarse en el rendimiento, recuperación o remoción (Stewart, 2007).

En el estudio del aprovechamiento del nitrógeno por las plantas se pueden usar tres métodos: directo o isotópico, indirecto o diferencia (eficiencia de recuperación del nitrógeno, eficiencia fisiológica del nitrógeno, eficiencia interna del nitrógeno, eficiencia agronómica del nitrógeno y factor parcial de productividad) y regresión (Boaretto *et al.*, 2007).

Un balance típico de la fertilización nitrogenada en el sistema del nitrógeno se presenta en el Cuadro 2.2 (Rodríguez, 1993).

Cuadro 2.2. Balance de la fertilización nitrogenada con fertilizantes nitrogenados marcados con ^{15}N .

Balance del nitrógeno en el suelo	Porcentaje
Absorción del cultivo	65
Inmovilización	15
Lixiviación	5
Desnitrificación	10
N-inorgánico	5

En una situación de bajo riesgo la eficiencia de fertilización se puede estimar mediante la siguiente formulación:

$$EFN = cI \times cD \times cL$$

Dónde:

EFN = Eficiencia de la fertilización nitrogenada (%).

cI = Coeficiente de inmovilización (%).

cD = Coeficiente de desnitrificación (%).

cL = Coeficiente de lixiviación (%).

$$EFN = 0.85 \times 0.85 \times 0.95$$

$$EFN = 0.65$$

En casos en que exista la posibilidad de una baja eficiencia las medidas en el manejo de la fertilización deben extremarse y a través de técnicas establecidas para las distintas situaciones es posible mantener la eficiencia en un nivel adecuado. La incorporación de fertilizantes como la urea para evitar la volatilización, la parcialización de las aplicaciones y la época oportuna y otras, son técnicas en que la mayoría de los casos, aún en condiciones de riesgo de una disminución de la eficiencia, permiten mantener en un nivel normal (Rodríguez, 1993).

La eficiencia de recuperación del nitrógeno manifiesta la capacidad de la planta en absorber el nitrógeno del suelo y depende de las propiedades de la raíz, la distribución en el suelo, el área superficial de la raíz y el consumo por unidad de área (Novoa y Loomis, 1981; Sattelmancher *et al.*, 1990). Para calcular la eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado en el campo, frecuentemente se emplea el método de la diferencia, el cual compara la planta testigo (sin fertilizante) con los tratamientos fertilizados, utiliza la fórmula propuesta por Bortholomew y Clark (1965).

Se supone que la absorción de nutrimentos de la parcela control indica la cantidad de nutrimentos disponibles del suelo, en tanto que los tratamientos fertilizados indica la cantidad de nutrimentos disponibles del suelo y del fertilizante. Este método supone, además, que todas las transformaciones de nutrimentos disponibles en el suelo, o sea la mineralización, la inmovilización y otros procesos en el caso de nitrógeno, son iguales tanto en los suelos fertilizados como en los no fertilizados (Salgado *et al.*, 2001).

$$ERN = \frac{N_{ATF} - N_{ATO}}{N_{apl}} \times 100$$

Dónde:

- ERN = Eficiencia de recuperación del nitrógeno (%).
- N_{ATF} = Nitrógeno acumulado en el tratamiento con fertilización (kg ha^{-1}).
- N_{ATO} = Nitrógeno acumulado en el tratamiento sin fertilización (kg ha^{-1}).
- N_{apl} = Nitrógeno aplicado (kg ha^{-1}).

Van Keulen (1981), considera que la eficiencia de la fertilización nitrogenada se puede obtener por un método de regresión en el que se relaciona la dosis de nitrógeno aplicado y el nitrógeno acumulado, ajustándose una regresión lineal que se caracteriza por tener una pendiente que corresponde a la eficiencia de la fertilización nitrogenada y la ordenada en el origen es el suministro de nitrógeno en el suelo. Es necesario indicar que la técnica descrita únicamente se utiliza para el nitrógeno (Figura 2.10).

$$N_a = EFN \times N_{apl} + SNS$$

Dónde:

- N_a = Nitrógeno acumulado (kg ha^{-1}).
- EFN = Eficiencia de la fertilización nitrogenada.
- N_{apl} = Nitrógeno aplicado (kg ha^{-1}).
- SNS = Suministro de nitrógeno en el suelo (kg ha^{-1}).

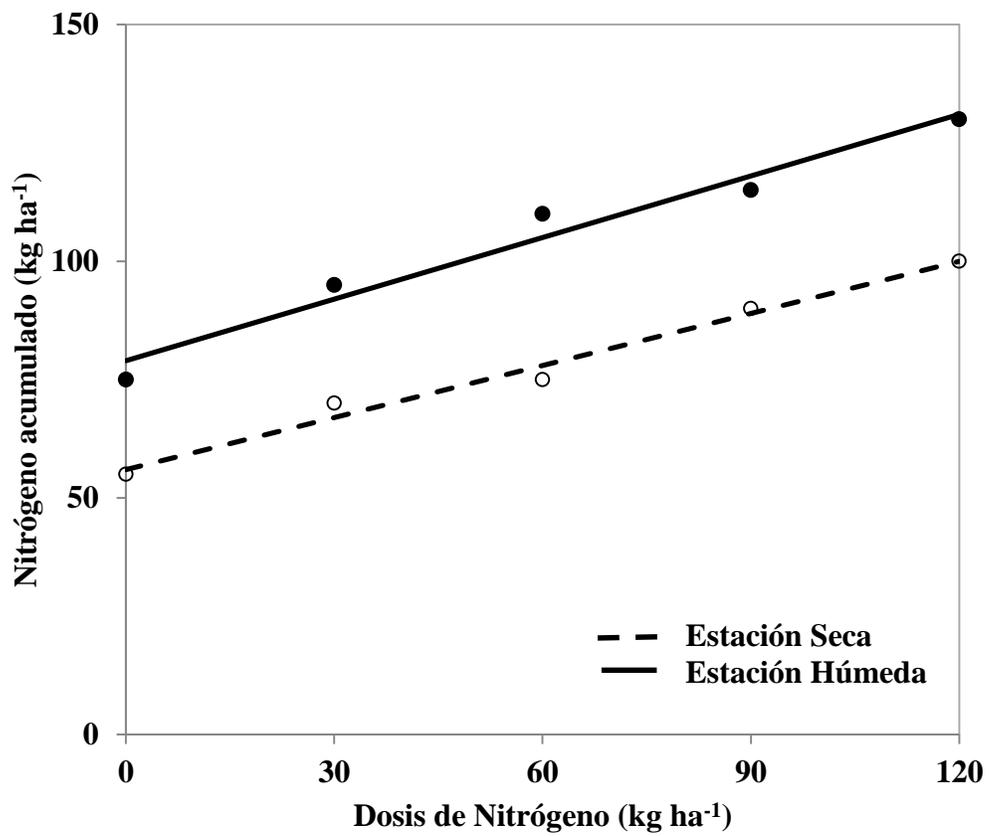


Figura 2.10. Relación entre dosis de nitrógeno y nitrógeno acumulado en la planta, para el cultivo de arroz IIRI. Los Baños, Filipinas en la estación seca y húmeda (Tanaka *et al.*, 1964).

Ejemplo 1

Rodríguez (1990), utiliza el modelo simplificado para calcular la dosis de fertilizante nitrogenado:

$$DFN = \frac{DN - SN}{EFN}$$

Dónde:

DFN = Dosis del fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}).

DN = Demanda de nitrógeno (kg N ha^{-1}).

SNS = Suministro de nitrógeno del suelo (kg N ha^{-1}).

EFN = Eficiencia de la fertilización nitrogenada (%).

Con los antecedentes del rendimiento esperado del cultivo y del requerimiento interno de nitrógeno, es posible estimar la demanda de nitrógeno.

El suministro de nitrógeno, estando el sistema de nitrógeno en equilibrio determinado por la acumulación de nitrógeno estabilizado está dado por los contenidos de nitrógeno de los residuos del cultivo anterior incorporados y por el nitrógeno inmovilizado de la fertilización nitrogenada.

Finalmente la eficiencia depende del riesgo de lixiviación y de los coeficientes de desnitrificación e inmovilización.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de la dosis de nitrógeno para el cultivo de maíz de la Zona Central de Chile (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Parámetros para el cálculo de la dosis de fertilización en el cultivo de maíz.

Parámetros	Valores
Cultivo próximo	Maíz
Rendimiento esperado	150 qq ha ⁻¹
Cultivo anterior	Trigo
Rendimiento obtenido	75 qq ha ⁻¹
Fertilización aplicada	150 qq ha ⁻¹
Residuos trigo (75 qq ha ⁻¹)	40 kgN ha ⁻¹
15% de la fertilización	23 kgN ha ⁻¹
Coefficiente de lixiviación	0.95
Coefficiente de desnitrificación	0.85
Coefficiente de inmovilización	0.85

- Cálculo de la demanda de nitrógeno.

$$DN = \frac{b \times RE \times (1 - H) \times RIN}{IC}$$

$$DN = \frac{1.15 \times 150 \times 0.85 \times 1.0}{0.46}$$

$$DN = 320 \text{ kg ha}^{-1}$$

- Cálculo del suministro de nitrógeno.

$$SN = N - \text{residuos de trigo} + 0.15 \times N - \text{fertilización trigo}$$

$$SN = 40 + 23$$

$$SN = 63 \text{ kg ha}^{-1}$$

- Cálculo de la eficiencia de la fertilización nitrogenada.

$$EFN = cL \times cD \times cI$$

$$EFN = 0.95 \times 0.85 \times 0.85$$

$$EFN = 0.65$$

- Cálculo de la dosis de nitrógeno.

$$DFN = \frac{DN - SN}{EFN}$$

$$DFN = \frac{320 - 63}{0.65}$$

$$DFN = 395 \text{ kg ha}^{-1}$$

Ejemplo 2

Sánchez (1999), toma el enfoque del balance nutrimental, proponiendo una hoja de cálculo en la que se vierte toda la información disponible: análisis químico del suelo (para determinar los contenidos en % del nitrógeno), cultivo, edafoclimática y del fertilizante, para calcular y recomendar la dosis adecuada de fertilización (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4. Cálculo de la dosis de fertilización nitrogenada en chile jalapeño.

Parámetros	Nitrógeno
a. Extracción de nutrimentos por tonelada de producto (kg t ⁻¹ o kg ha ⁻¹)	8.4
b. Rendimiento estimado (t ha ⁻¹)	45.0
c. Extracción de nutrimentos con el rendimiento estimado (kg ha ⁻¹)	380.2
d. Contenido de formas disponibles de nutrimentos en el suelo (mg kg ⁻¹)	147.6
e. Reservas de nutrimentos en la capa arable del suelo (kg ha ⁻¹)	369.0
f. Aprovechamiento de nutrimentos del suelo por el cultivo (kg ha ⁻¹)	50.0
g. Cantidad de nutrimentos disponibles del suelo para el cultivo (kg ha ⁻¹)	-
h. Efecto residual de los rastrojos y raíces de cultivos anteriores (kg ha ⁻¹)	-
i. Efecto residual de los fertilizantes aplicados anteriormente (kg ha ⁻¹)	-
j. Se aplican _____ t ha ⁻¹ de abono orgánico	-
k. Aprovechamiento de nutrimentos de los fertilizantes orgánicos (%)	-
l. Cantidad de nutrimentos disponibles de los fertilizantes orgánicos para el cultivo (kg ha ⁻¹)	-
m. Requerimientos de nutrimentos por el cultivo con base en el rendimiento estimado (kg ha ⁻¹)	195.2
n. Aprovechamiento de nutrimentos de los fertilizantes minerales (%)	50.0
ñ. Necesidades en nutrimentos (kg ha ⁻¹)	391.5
o. Fuente del fertilizante y % de nutriente contenido	33.5
p. Dosis calculada de fertilizantes minerales (kg ha ⁻¹)	1168.6

La cantidad de nitrógeno disponible en el suelo a la profundidad de muestreo (0-0.30 m), se utilizó para seguir el procedimiento de cálculo correspondiente, para determinar la dosis teórica de fertilización nitrogenada para el cultivo de chile jalapeño con base en la relación:

$$DFN = \frac{DNC - SNS}{EF(\%)}$$

Dónde:

DFN = Dosis de fertilización (kg ha^{-1}).

DNC = Demanda del nutrimento por el cultivo (kg ha^{-1}).

SNS = Suministro del nutrimento por el suelo (kg ha^{-1}).

EF = Eficiencia del fertilizante (%).

Ejemplo 3

Cartagena (2002) citando a Bertsch (1998) y Castro (1998), realizó un ejercicio de cálculo del balance nutrimental en el cultivo de papa en Ecuador.

$$NEN = \frac{DC - DS}{EF}$$

Dónde:

NEN = Necesidad efectiva del nutriente (kg ha⁻¹).

DC = Demanda del cultivo (kg ha⁻¹).

DS = Disponibilidad en el suelo (kg ha⁻¹).

EF = Eficiencia del fertilizante (%).

La demanda del cultivo o requerimientos nutricionales del cultivo se presentan en el Cuadro 2.5.

Cuadro 2.5. Requerimientos nutricionales para el cultivo de papa.

Cultivo	Rendimiento t ha ⁻¹	Absorción de nutrientes			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S
Papa	40	175	80	310	20

La disponibilidad en el suelo u oferta del suelo corresponde al análisis químico de suelos (Cuadro 2.6).

Cuadro 2.6. Análisis químico de suelos con la interpretación de los niveles críticos para el cultivo de papa.

Número de la Muestra	Lote	Elementos			
		N	P	S	K
42038	1	5 B	11 B	13 M	0.21 M

N = Nitrógeno, P = Fósforo, S = Azufre, K = Potasio, B = Bajo y M = Medio.

La eficiencia del fertilizante para los elementos: nitrógeno, fósforo, potasio y azufre, se pueden apreciar en el Cuadro 2.7.

Cuadro 2.7. Eficiencia de utilización de los fertilizantes (Bertsch, 1998).

Elemento	Eficiencia %
Nitrógeno	60 - 80
Fósforo	10 - 30
Potasio	50 - 70
Azufre	40 - 50

Para obtener la necesidad efectiva de nutriente nitrogenado se realizó el siguiente procedimiento:

- Cálculo de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo transformando de mg kg^{-1} a kg ha^{-1} .

$$5 \text{ mg kg}^{-1} \times 2 = 10 \text{ kg ha}^{-1}.$$

- Cálculo de la necesidad efectiva de nutriente nitrogenado.

$$NENN = \frac{DC - DS}{EF}$$

$$NENN = \frac{175 - 10}{0.6}$$

$$NENN = 275 \text{ kg ha}^{-1}$$

Ejemplo 4

Según Durán *et al.*, (2004), de acuerdo con la normativa vigente en materia de fertilización nitrogenada especialmente en las denominadas Zonas Vulnerables al Nitrógeno, antes de tomar la decisión de aplicar una determinada cantidad de nitrógeno a un cultivo debemos realizar un balance. Se trata de calcular las necesidades que presenta un cultivo, en función de la producción esperada y restar todas las aportaciones que van a ser realizadas (Cuadro 2.8), como consecuencia de:

- El cultivo anterior.
- La cantidad de estiércol u otras enmiendas orgánicas (purines) aplicadas.
- La materia orgánica que se mineraliza.
- Los restos vegetales que pueden ser incorporados.
- El agua de riego.
- Otras aportaciones.

Cuadro 2.8. Consideraciones prácticas que deben ser contempladas para establecer el programa de fertilización con nitrógeno para el cultivo de maíz.

Variable	Descripción
Factores limitantes	Bajo número de plantas en el momento de la recolección Con 5-6 hojas no debe pasar “sed”. Se forman los granos de la mazorca Cuatro días con “sed” durante la floración pueden reducir la cosecha en un 50%
Extracciones	25-30 kg de nitrógeno por tonelada de grano seco (Humedad 14%) El suelo y el agua de riego contienen nitrógeno que debe ser contemplado en el balance
Asimilación	Un mes antes de la floración: 20% Entre 3 semanas antes y 2 semanas después de la floración: 50% Hasta la madurez del grano: 30%
Aportaciones	Realizar un balance previo Suelos arcillosos: 1/3 en sementera y 2/3 en dos coberteras Suelos francos o arenosos: 1/3 en sementera y 2/3 en tres o más coberteras Primera cobertera: Plantas con 0.4-0.5m Segunda cobertera: Plantas con 0.9-1.0 m
Purines	Antes de la siembra con las labores preparatorias En zonas vulnerables al nitrógeno respetar los limitantes autorizados.

En el Cuadro 2.9 se presenta un esquema de balance para el cultivo de maíz.

Cuadro 2.9. Balance de nitrógeno en una explotación de regadío situada en una zona vulnerable al nitrógeno para el cultivo de maíz grano.

Variable	Cálculos	Resultado kg N ha ⁻¹
a	Cultivo: Maíz Rendimiento grano (14%): 12 t ha ⁻¹ Extracciones (N): 30 kg ha ⁻¹	360
b	Residuos de cultivos anteriores Cultivo anterior: Alfalfa Restos de raíces: 6-8000 kg ha ⁻¹ Nitrógeno aportado: ≤ 200 kg ha ⁻¹	100 ⁽¹⁾
c	Análisis de suelo: N(NO ₃ ⁻) Profundidad (0-30 cm): 20 mg kg ⁻¹ Profundidad (30-60 cm): 10 mg kg ⁻¹ Textura: Franca Densidad: 1.3 t ha ⁻¹	117
d	Materia orgánica: Mineralización Análisis de suelos: 2% Textura: Franca Profundidad: 0.3 m Densidad: 1.3 t ha ⁻¹ Nitrógeno orgánico: 5% Mineralización anual: 1-2%	59
e	Agua de riego Riegos: 10 Dotación: 600 m ³ ha ⁻¹ riego ⁻¹ Nitrato: 5 mg l ⁻¹	30
f	Otras aportaciones: Agua de pozo Riegos: 2 Dotación: 500 m ³ ha ⁻¹ riego ⁻¹ Nitrato: 45 mg l ⁻¹	45
Necesidades del cultivo		A
Aportaciones		c + d + e + f
Aporte con fertilizantes		a - (c + d + e + f)
Programa de abonado		Cobertera 1: 120 kg ha ⁻¹ urea (46% N) Cobertera 2: 120 kg ha ⁻¹ urea (46% N)

(1) No se calcula, ya que se ha analizado el contenido de nitrógeno, en forma de nitrato, presente en el suelo, resultando ser 117 kg ha⁻¹, que es la cantidad que se tomará a efecto del balance.

Ejemplo 5

Cervantes (2006), indica que para el cálculo de la fertilización se basa en el conocimiento del requerimiento del cultivo (extracción); así como, en los niveles de nutrimentos presentes en el suelo, para lo cual es necesario un análisis químico del suelo que permite planificar la fertilización. Asimismo, se debe conocer la dinámica de absorción nutrimental para poder adecuar los aportes a las tasas de extracción, que como ha quedado demostrado varían a lo largo del ciclo del cultivo. Tomando en cuenta lo anterior, la fórmula para calcular la dosis de fertilización es la siguiente:

$$DF = \frac{D - S}{E}$$

Dónde:

- DF = Dosis de fertilización (kg ha⁻¹).
D = Demanda (kg ha⁻¹).
S = Suministro (kg ha⁻¹).
E = Eficiencia de recuperación del fertilizante (%).

Tomando en cuenta el análisis nutrimental (Cuadro 2.10) del suelo en el Campo Agrícola “San Martín” en Chapingo México, se calculó la cantidad de nutrimentos existentes en el volumen de exploración radical y la dosis de fertilización nitrogenada para el cultivo de fresa.

Cuadro 2.10. Análisis químico de suelo del campo Agrícola “San Martín”, Chapingo, Estado de México.

Muestras	pH	Materia Orgánica %	Nitrógeno mg kg ⁻¹
1	6.97	1.61	18.20
2	6.96	1.61	28.00
Media	6.97	1.61	23.10

Entonces, en una profundidad de 0.30 m y una densidad aparente de 1.25 t m⁻³ se tiene:

$$1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2$$

Para una profundidad del suelo de 0.3 m

$$10000 \text{ m}^2 \times 0.3 \text{ m} = 3000 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, si un metro cúbico pesa 1.25 t tenemos:

$$3000 \text{ m}^3 \times 1.25 \text{ t} = 3750 \text{ t ha}^{-1}$$

Ahora, se calculó el valor del suministro del suelo, tomando como ejemplo el nitrógeno (Cuadro 2.10) y se tiene:

$$3750000 \text{ kg ha}^{-1} \times 23.1 \text{ mg kg}^{-1} \times \frac{1}{1000000} = 86.6 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Si se toma en cuenta que la disponibilidad del nitrógeno del suelo es del 50%, entonces el nitrógeno disponible en el suelo de cultivo es:

$$86.6 \text{ kg N ha}^{-1} \times 50 \% = 43.3 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Además la mineralización de la materia orgánica (%) suministra cierta cantidad de nitrógeno, entonces:

$$3750000 \text{ kg ha}^{-1} \times 1.6 \% \text{ M.O.} = 60375 \text{ kg M.O. ha}^{-1}$$

Si se toma como valor que existe 5% de nitrógeno en la materia orgánica, tenemos:

$$60375 \text{ kg M.O. ha}^{-1} \times 5 \% \text{ N} = 3018.7 \text{ kg N ha}^{-1}$$

De los cuales sólo se mineraliza el 2% anual:

$$3018.7 \text{ kg N ha}^{-1} \times 2 \% = 60.3 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Y si consideramos además, 50% de eficiencia:

$$60.3 \text{ kg N ha}^{-1} \times 50 \% = 30.1 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Por aporte de la materia orgánica proveniente del suelo.

Este valor se suma al aporte del suelo:

$$43.41 \text{ kg N ha}^{-1} + 30.18 \text{ kg N ha}^{-1} = 73.4 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Como este valor de $73.4 \text{ kg N ha}^{-1}$, es menor a la extracción de la fresa selección japonesa de 113.4 kg ha^{-1} , se tiene una condición de déficit; por ello, se requiere de fertilización nitrogenada.

$$DF = \frac{113.4 \text{ kg ha}^{-1} - 73.4 \text{ kg ha}^{-1}}{50 \%}$$

$$DF = 79.8 \text{ kg ha}^{-1}$$

Ejemplo 6

Villalobos *et al.*, (2009), mencionan que la ecuación del balance de nitrógeno pueden despreciarse los procesos secundarios.

Una aproximación sería:

$$N_f = \frac{N_c - (N_m - N_i)}{E}$$

Dónde:

N_f = Nitrógeno aplicado como fertilizante (kg ha^{-1}).

N_C = Nitrógeno absorbido en la biomasa (kg ha^{-1}).

N_m = Nitrógeno mineralizable (kg ha^{-1}).

N_i = Nitrógeno inicial en el suelo (kg ha^{-1}).

E = Eficiencia de la fertilización (%).

Sea un cultivo de sorgo en un ambiente tropical, la lluvia y temperaturas medias durante los meses de cultivo son (Cuadro 2.11):

Cuadro 2.11. Precipitación y temperatura en un ambiente tropical para el cultivo de sorgo.

Mes	Precipitación mm	Temperatura °C
1	80	18
2	70	20
3	90	22
4	70	24
5	60	24
6	70	22

El rendimiento potencial (con nitrógeno no limitante) de la zona para el cultivo de sorgo, se presenta en el Cuadro 2.12.

Cuadro 2.12. Rendimiento potencial del cultivo de sorgo.

Rendimiento kg ha⁻¹	Potencial de los años %
3000 - 4000	40
4000 - 5000	30
5000 - 6000	20
6000 - 7000	10

Se trata de proponer la dosis total de nitrógeno recomendable.

Otros datos (Cuadro 2.13):

Cuadro 2.13. Parámetros de suelo, cultivo y fertilizante para sorgo.

Parámetros	Valores	
Suelo	Materia orgánica (0 - 0.3m)	2%
	Materia orgánica (0.3 - 1.0m)	0%
	% N de la materia orgánica	5%
	Densidad aparente	1.3 g cm ⁻³
	Velocidad de mineralización	1.5%/6 meses
Cultivo	% N en grano sobre materia seca	1.6
	% N en paja sobre materia seca	0.6
	% humedad en cosecha	20
	Índice de cosecha	0.4
Fertilizante	Fracción de recuperación del fertilizante	0.4

Se calcula para los posibles rendimientos (tomando el punto medio de cada intervalo) las necesidades de fertilizante. Por ejemplo, si el rendimiento es de 6500 kg ha⁻¹.

$$\text{Rendimiento (materia seca)} = 6500 \times (1 - 0.2)$$

$$\text{Rendimiento (materia seca)} = 5200 \text{ kg ha}^{-1}$$

Cálculo de N_c:

$$N_c = Y \times \left[NC_g + \frac{(1 - IC)}{IC \times NC_r} \right]$$

Dónde:

- N_C = Nitrógeno absorbido en la biomasa (kg ha^{-1}).
 Y = Rendimiento (kg ha^{-1}).
 NC_g = Concentración del nitrógeno producto de la cosecha (%).
 NC_r = Concentración del nitrógeno en el residuo (%).
 IC = Índice de cosecha.

$$N_C = 5200 \times \left[0.0165 + \frac{(1 - 0.4)}{0.4 \times 0.006} \right]$$

$$N_C = 133 \text{ kg ha}^{-1}$$

Cálculo de N_m :

$$N_m = P_s \times S \times D_s \times M.O. \times N \times V_m$$

Dónde:

- N_m = Nitrógeno mineralizable (kg ha^{-1}).
 P_s = Profundidad de suelo (m).
 S = Superficie ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$).
 D_s = Densidad aparente del suelo (kg m^{-3}).
 $M.O.$ = Contenido de materia orgánica (%).
 N = Contenido de nitrógeno de la materia orgánica (%).
 V_m = Velocidad de mineralización (%).

$$N_m = 0.3 \text{ m} \times 10000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \times 1300 \text{ kg m}^{-3} \times \dots$$

$$\dots \times 0.02 \times 0.05 \times 0.015$$

$$N_m = 58.5 \text{ kg ha}^{-1}$$

Suponemos que el nitrógeno inicial (N_i) cero. El nitrógeno lixiviado (N_l) no puede despreciarse a priori, pero tampoco contamos con información para cuantificarlo (se considera incluido en la fracción de recuperación). El nitrógeno perdido por desnitrificación (N_d) y volatilización (N_v) se supondrán despreciables dada la acidez del suelo. El nitrógeno que queda en el suelo al final del balance (N_{fin}) se pretende que sea cero para maximizar la eficiencia y disminuir las pérdidas posteriores a cosecha. Por tanto:

$$N_f = \frac{133 - 58.5}{0.4}$$

$$N_f = 186 \text{ kg ha}^{-1}$$

De forma análoga se obtendrá:

Para rendimiento de 3500 kg ha⁻¹: $N_f = 32.2 \text{ kg ha}^{-1}$.

Para rendimiento de 4500 kg ha⁻¹: $N_f = 83.2 \text{ kg ha}^{-1}$.

Para rendimiento de 5500 kg ha⁻¹: $N_f = 83.2 \text{ kg ha}^{-1}$.

Estrategias posibles:

Fertilizar todos los años con 32.2 kg ha⁻¹. En principio obtendríamos un rendimiento medio de 3500 kg ha⁻¹.

Las pérdidas potenciales de nitrógeno del sistema serían mínimas.

Fertilizar todos los años con 83.2 kg ha⁻¹. Esto nos permite obtener como mucho un rendimiento de 4500 kg ha⁻¹. El rendimiento medio sería de:

$$0.4 \times 3500 + 0.6 \times 4500 = 4100 \text{ kg ha}^{-1}$$

Las pérdidas potenciales del nitrógeno del sistema se incrementarían 40% de los años en 51 kg ha⁻¹. Incremento medio = 0.4 x 51 = 20 kg ha⁻¹.

Fertilizar todos los años 134.3 kg ha⁻¹. El rendimiento medio sería de:

$$0.4 \times 3500 + 0.3 \times 4500 + 0.3 \times 5500 = 4400 \text{ kg ha}^{-1}$$

Las pérdidas potenciales del nitrógeno del sistema se incrementarían 40% de los años en 102 kg ha⁻¹ y 30% de los años en 51 kg ha⁻¹.

Incremento medio = 56 kg N ha⁻¹.

Fertilizar todos los años 186 kg ha⁻¹. El rendimiento medio sería de:

$$0.4 \times 3500 + 0.3 \times 4500 + 0.2 \times 5500 + \dots$$
$$\dots + 0.1 \times 6500 = 4500 \text{ kg ha}^{-1}$$

Las pérdidas potenciales del nitrógeno del sistema se incrementarían 40% de los años en 153 kg ha⁻¹, 30% de los años 102 kg ha⁻¹ y 20% de los años en 51 kg ha⁻¹. Incremento medio de 102 kg ha⁻¹.

2.3. Trabajos de fertilización en brócoli

Magnifico *et al.*, (1979), indican que la acumulación de N, P y K en varias etapas del ciclo cultural de “Medium Late 423” (*Brassica oleracea* L), fue determinada en un experimento de campo al sur de Italia. Las muestras de plantas se obtuvieron cada dos semanas, desde el inicio del trasplante hasta un periodo de 173 días. Las plantas de brócoli absorbieron 559 kg N, 23 kg P y 723 K ha⁻¹. El rendimiento total de peso fresco fue de 148 t ha⁻¹ y peso seco de 16.8 t ha⁻¹. El peso fresco incluyó 12.8 t ha⁻¹ de inflorescencias principales y 19.5 t ha⁻¹ de inflorescencias secundarias.

Letey *et al.*, (1983), indican que los fertilizantes y el riego deben ser manejados para obtener un uso eficiente de los recursos, preservación de la calidad ambiental y máxima producción. Se realizaron dos experimentos de riego por surcos en el cultivo de brócoli (*Brassica oleracea*). El primero consistió en tres dosis de nitrógeno (90, 180 y 270 kg ha⁻¹), dos tratamientos de riego (reposición de agua perdida por evapotranspiración y la evapotranspiración más 30%) y dos procedimientos de aplicación de nitrógeno (aplicación al suelo y en el agua de riego) en un suelo franco arenoso (grueso-arcilloso, mezclado, régimen térmico Typic Xerofluvent). El crecimiento de las plantas aumentó con la aplicación creciente de nitrógeno. Para una aplicación de nitrógeno, existió una mayor producción media con la menor cantidad de agua aplicada. El método de aplicación de nitrógeno tuvo muy poco efecto sobre la producción en los tratamientos bajo riego, pero la producción fue consistentemente mayor para la aplicación de nitrógeno cuando en el suelo se utilizó el tratamiento con mayor cantidad de agua. La relación de nitrógeno en la planta con el nitrógeno aplicado disminuyó con el aumento de la aplicación de nitrógeno, disminuyó con la aplicación de la mayor cantidad de agua y disminuyó con la aplicación en el agua de riego en comparación con la aplicación al suelo. El segundo experimento consistió en dos dosis de nitrógeno (115 y 225 kg ha⁻¹) y dos procedimientos de aplicación de nitrógeno (aplicación al suelo y en el agua de riego) en un suelo franco (fino-limoso mezclado, régimen térmico Calcic Haploxeroll). El rendimiento y la absorción de nitrógeno fueron significativamente altos con 225 kg ha⁻¹ en comparación con 115 kg ha⁻¹ de nitrógeno. La aplicación convencional del nitrógeno al suelo antes de la siembra resultó en

rendimientos significativamente más altos de las inflorescencias de brócoli que la inyección de nitrógeno en el agua de riego. La lixiviación de nitrógeno no fue un factor limitante en las condiciones experimentales.

Beverly *et al.*, (1986), indican que los agricultores por lo general aplican grandes cantidades de nitrógeno y agua en la producción comercial de hortalizas. Como los costos de los dos insumos aumentan y con la creciente preocupación por la lixiviación de nitratos y la contaminación de las fuentes de agua, la necesidad de información para la óptima gestión de los recursos se incrementa. Se investigaron los efectos combinados de la aplicación de cinco dosis de nitrógeno (0, 87, 190, 255 y 331 kg ha⁻¹) y una variable de riego continuo (0.0114 a 0.329 m de agua o 0.05 a 1.52 veces la evaporación neta) aplicados por un sistema de rociadores en línea en brócoli (*Brassica oleracea* L., grupo Botrytis) con niveles de crecimiento y rendimiento. Los niveles de crecimiento en general aumentaron con el agua y los tratamientos de nitrógeno, aunque aparecieron algunas interacciones. Los pesos frescos cosechados siguieron aumentando en todos los tratamientos aplicados, con rendimientos máximos de 20 t ha⁻¹. El rendimiento respondió al nitrógeno y el agua aplicada después del trasplante de acuerdo con la ecuación:

$$Y = - 1.03 + 0.0498 N - 8.73 \times 10^{-5} N^2 + 1.23 \times 10^{-3} NW + 0.272 W - 8.20 \times 10^{-3} W^2$$

Donde Y es el rendimiento, N es nitrógeno y W es el agua aplicada después del trasplante. El análisis de la superficie de respuesta resultante indicó que en estas condiciones frecuentes de riego por aspersión (aproximadamente dos veces por semana), dosis relativamente baja de nitrógeno (140 kg ha⁻¹), la combinación de nitrógeno con agua produjo un costo más bajo por un rendimiento de 10 t ha⁻¹. Además, aumentó el rendimiento con cantidades más altas de nitrógeno y de agua, también debe considerarse la calidad.

Magnifico *et al.*, (1989), indican que el crecimiento y la acumulación de macro y micro elementos en varias etapas del ciclo cultural de dos cultivares de brócoli raab (*Brassica rapa* L) fueron determinadas en un campo experimental en el sur de Italia. Las muestras de

las plantas se obtuvieron cada dos semanas comenzando el momento de adelgazamiento y continuando por 112 y 126 días, para Di Gennaio y Di Marzo, respectivamente. A pesar de los diferentes ciclos culturales, los dos cultivares tuvieron casi la misma relación en cuanto al rendimiento y elemento absorbido. Las plantas Di Marzo y Di Gennaio (50000 plantas ha^{-1}) removieron en promedio cerca de 460 kg N, 140 kg P_2O_5 , 692 kg K_2O , 330 kg Ca, 75 kg Na y 42 kg Mg. Los microelementos sólo se determinaron en Di Gennaio, 77 kg S, 20 kg Al, 12 kg Fe, 1 kg Mn, 479 g Zn, 443 g Sr, 411 g B, 72 g Cu, 26 g Mo, 23 g Ni y 20 g Cd. El crecimiento total promedio de la materia fresca fue de 136 t ha^{-1} , que incluyó a 14 t ha^{-1} de inflorescencias principales y 28 t ha^{-1} de inflorescencias secundarias, y 14 t ha^{-1} de materia seca. El crecimiento más alto y tasas de remoción desde la emisión de tallo hasta la producción principal de inflorescencias fueron registrados.

Soto (1991), indica que en dos experimentos consecutivos que se llevaron a cabo, en 1988 y 1989, en la Estación Experimental Carlos Durán en Tierra Blanca, Cartago, a 2400 m.s.n.m. En 1988, cuatro dosis de nitrógeno (0, 100, 200 y 300 kg ha^{-1}), así como tres poblaciones (70000, 100000 y 300000 plantas ha^{-1}) fueron evaluados en hileras dobles de 1.0 m de distancia, con filas dobles de 0.3 m de distancia y en la fila de separación 28.5, 20.0 o 15.4 cm entre plantas. Las variables medidas fueron: 1) inflorescencias de exportación, 0.10-0.17 m de diámetro, peso sobre 125 g, excelente compactación y sin tallos huecos; 2) inflorescencias de calidad "A", con un diámetro de 0.10-0.17 m y un peso bajo de 125 g; 3) inflorescencias de calidad "B" de con un diámetro menor de 0.17 m de diámetro. En las dosis más bajas de nitrógeno se obtuvieron los mayores rendimientos de las inflorescencias de exportación con las poblaciones más bajas, pero se elevaron las dosis hasta 300 kg N ha^{-1} , el mayor rendimiento (17.5 t ha^{-1}) ocurrió con 100000 plantas ha^{-1} ; la calidad A mostró un efecto similar, con un rendimiento máximo 23.6 t ha^{-1} para 300 kg N ha^{-1} y la interacción de 130000 plantas ha^{-1} ; para la calidad B, el mayor rendimiento (6.0 t ha^{-1}) se alcanzó con 130000 plantas ha^{-1} y sin nitrógeno. La incidencia de tallo hueco fue inferior 1%, a pesar de los niveles 50% para la misma región en años anteriores. En 1989, se evaluó el nitrógeno a 200, 250, 300, 350 y 400 kg ha^{-1} en la interacción con las mismas poblaciones. Las inflorescencias fueron calificadas como: 1) exportable, 0.10-0.17 m de diámetro, más de 125 g de peso, excelentemente compactado y sana; 2) exportable sin tallo

huevo, lo mismo que 1 más el tallo sólido; 3) no exportable, carecen de una de las características de exportación anteriores. La interacción de 100000 plantas y 350 kg N ha⁻¹ resultó con el mayor rendimiento de las inflorescencias exportables (16.7 t ha⁻¹); las inflorescencias exportables sin tallo hueco fueron 62% y 100000 plantas ha⁻¹ con 350 o 400 kg N ha⁻¹ tuvieron los rendimientos más altos (8.8 y 9.5 t ha⁻¹), pero las diferencias no fueron significativas; las inflorescencias no exportables sólo aumentaron cuando la población aumentó. Se concluye que 100000 plantas ha⁻¹ y 350 kg N ha⁻¹ ofrecen la mejor combinación para la producción de inflorescencias de exportación. Además, la incidencia de tallo hueco no se puede atribuir a la población o alta dosis de nitrógeno, sino a otros factores del cultivo.

Liu y Shelp (1993a), indican que se realizó un estudio de tres años para investigar la respuesta del crecimiento en campo de brócoli cultivados en diferentes regímenes de manejo (varias relaciones de NH₄:NO₃, la adición de un inhibidor de la nitrificación conocido como nitrapirina y nutrición de boro). Ninguno de los tratamientos influyó en el rendimiento y la composición de N en la savia del xilema y floema y tejido de la planta. El nitrógeno total (NH₄, NO₃ y aminoácidos) y la concentración molar de NH₄ en la savia del xilema disminuyeron durante el período de crecimiento. El NH₄ constituyó hasta 20% de la savia del xilema -N, lo que sugiere que esta forma de nitrógeno, así como el NO₃, están siendo absorbidas del suelo. La recuperación sustancial de NO₃ en la savia del xilema (30-70% N) indicó que con un adecuado suministro de nitrógeno, al menos una parte del NO₃ que ingresa se reduce en el brote. Las concentraciones de NH₄, NO₃, aminoácidos y proteínas en los tejidos disminuyeron durante la temporada de crecimiento y en la parte superior del brote. La concentración de NO₃ en las inflorescencias, con niveles de 1 a 154 mg N kg⁻¹ de peso fresco, se consideran como niveles bajos para las normas europeas, en tanto que algunos de estos en el follaje superaron los niveles permisibles. La diferencia de acumulación de NO₃ en los cultivares fueron evidentes y entre los sitios de estudio.

Liu y Shelp (1993b), indican que las plantas de brócoli (*Brassica oleracea* Itálica) crecieron en el invernadero y se suministró continuamente 18 mM de nitrógeno en la siguiente relación de NH₄:NO₃: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 y 0:100. En la madurez comercial, se

determinaron las características de la planta y repartición de nitrógeno en la savia del xilema y floema y en el tejido vegetal. Las plantas suministradas exclusivamente con amonio eran pequeñas, mostraron signos de necrosis marginal en las hojas inferiores y se acumuló amonio en el follaje. El rendimiento máximo y tiempo mínimo de cosecha, junto con la mínima acumulación de nitrato y amonio se encontraron en la relación de 75:25. Las concentraciones de amonio en la savia del xilema disminuyeron linealmente con la disminución de la porción de amonio en la solución nutritiva, mientras que las concentraciones de nitrato alcanzaron cuando un máximo de nitrato constituyó 50% del N suministrado. La familia del glutamato dominó la composición de los aminoácidos en la savia del xilema y floema jugos, pero no varió mucho con la relación $\text{NH}_4:\text{NO}_3$. Se sugiere que la concentración de amonio en la savia del xilema se puede utilizar para evaluar la relación de NH_4 vs NO_3 utilizada por el brócoli en condiciones de campo.

Everaarts (1994), indica que un incremento en la cantidad de nitrógeno suministrado al brócoli (*Brassica oleracea* Itálica) condujo a un aumento de la incidencia de la podrición de la inflorescencia, resultando en una disminución de la cantidad de producto comercializable. Se encontraron indicios de que el peso de la inflorescencia y el contenido de materia seca en la inflorescencia están probablemente involucrados indirectamente en el desarrollo de la pudrición de la inflorescencia con un suministro bajo de nitrógeno. El índice de cosecha no se vio influenciada por los tratamientos. La identificación de los mecanismos que dieron lugar a la pudrición de la inflorescencia limitados a bajos niveles de nitrógeno, podrían ayudar a identificar las características para detectar en los programas de evaluación agronómica de variedades de brócoli bajo suministro normal de nitrógeno.

Zebarth *et al.*, (1995), indican que una comprensión de las relaciones entre la tasa de fertilización nitrogenada, la recuperación de nitrógeno en los cultivos, el nitrógeno inorgánico residual en el suelo y el rendimiento de los cultivos puede ayudar en la formulación de recomendaciones equilibradas de fertilizantes nitrogenados en los cultivos y disminuir el riesgo ambiental. Se aplicó el nitrógeno en tres plantaciones de brócoli, con dosis de nitrógeno de 0, 125, 250, 375, 500 y 625 kg ha^{-1} con una aplicación al voleo de nitrato de amonio, 50% al momento del trasplante y 50% después de 2 semanas del

trasplante. El rendimiento comercial de los cultivos, rendimiento de materia seca y la acumulación de nitrógeno y nitrógeno inorgánico extraíble a 0.75 m de profundidad del suelo se determinaron en la cosecha. El rendimiento comercial de los cultivos, medido como peso fresco en las inflorescencias, incrementó con el aumento de la dosis de nitrógeno a un máximo entre dosis de 435 y 560 kg ha⁻¹. El nitrógeno acumulado en la parte aérea de la planta de incrementó con el aumento de la dosis de nitrógeno y alcanzó un máximo de 345 a 465 kg ha⁻¹. La recuperación aparente del fertilizante nitrogenado en la parte aérea de la planta disminuyó linealmente entre 46 y 93% a una dosis de 125 kg N ha⁻¹ y entre 20 y 44% en la dosis de 625 kg N ha⁻¹. La recuperación aparente del fertilizante nitrogenado en la inflorescencia se redujo linealmente de entre 14 y 25% a una dosis de 125 kg N ha⁻¹ y entre 8 y 14% con la dosis de 625 kg N ha⁻¹. El perfil del suelo con nitrato-N a 0.75 m de profundidad en la cosecha aumentó con la dosis de aplicación de N en forma curvilínea y con un promedio de 3 kg N ha⁻¹ sin nitrógeno aplicado hasta 420 kg N ha⁻¹ en la dosis máxima de nitrógeno. Se discute el potencial para desarrollar una prueba de nitrato en el suelo para predecir el requerimiento de fertilizante nitrogenado en brócoli.

Vimala *et al.*, (1997). indican que se obtuvieron las absorciones de nutrientes: N, P, K, Ca y Mg en 96, 19, 132, 44 y 23 kg ha⁻¹, respectivamente. La relación de la absorción de nutrientes fue 4:1:6:2:1 de N: P: K: Ca: Mg. Sólo 27% de N, 22% P, 16% K, 6% de Ca y 10% Mg, de la absorción total de nutrientes fueron removidos en la inflorescencia para un rendimiento económico de 5.6 t ha⁻¹. El resto se encontró en las hojas, tallos y raíces. La absorción de micronutrientes fue de menos de 0.5 kg ha⁻¹. Los datos presentados se pueden utilizar como una guía para la formulación de las necesidades de fertilización en brócoli cultivados en turba.

Padilla (1998), indica que se midió la parte económica, la biomasa aérea total y la absorción de N, P y K por ésta a la cosecha de brócoli cultivados con niveles crecientes de gallinaza, en un Typic Argiustoll (Coatlinchán, México) y un Vertisol (Villagrán, Gto, México) para determinar el requerimiento interno de N, P y K y el índice de cosecha, que definen la demanda nutrimental de los cultivos en un modelo conceptual simplificado así como contrastar la absorción de N, P y K asociada al rendimiento obtenido con la estimada

a partir de datos reportados en la literatura. La producción de materia seca y la absorción de N, P y K de brócoli fue afectada por las condiciones edafoclimáticas y de manejo particulares de cada sitio. En Coatlinchán el rendimiento de inflorescencias principales y secundarias de brócoli en fresco fue 19 t ha^{-1} ; en Villagran el rendimiento fue de 2.5 t ha^{-1} , donde la estación y condiciones de crecimiento fueron atípicos. La adición de gallinaza (0 a 20 t ha^{-1}) tampoco produjo incrementos significativos con las concentraciones de N, P y K en Coatlinchan, en tanto que en Villagrán los incrementos fueron ligeros lo que se asoció a factores ambientales que impidieron el desarrollo normal del cultivo. Se concluyó que en Coatlinchán, la ausencia de respuesta se debió al alto nivel de nitrógeno inorgánico en el suelo, el que supuestamente fue aportado durante la estación de crecimiento por un agente externo (agua de riego, agua de lluvia). El índice de cosecha promedio asociado a los rendimientos más altos obtenidos fueron 0.3 para el brócoli. Estos valores coincidieron con los reportados en otras investigaciones, sin embargo, no se puede aseverar que estos fueron independientes del rendimiento y las condiciones edafoclimáticas. En Villagrán el índice de cosecha se incrementó con las dosis de gallinaza, sin embargo también hubo restricciones en el crecimiento. Las concentraciones de N, P y K promedio que se asocian con los rendimientos más altos obtenidos fueron 3.6% , 0.4% y 1.4% , respectivamente.

Everaarts y Willigen (1999), indican que los métodos de aplicación del fertilizante fueron al voleo, en banda y directa. La absorción máxima de nitrógeno por el cultivo fue de alrededor de 300 kg ha^{-1} . En un experimento la colocación en banda influyó positivamente en la absorción de nitrógeno. La aplicación directa no influyó en la absorción de nitrógeno. La aplicación de nitrógeno dio como resultado una producción más alta de materia seca en la inflorescencia, pero la eficiencia de utilización de nitrógeno para la producción de materia seca en la inflorescencia disminuyó con mayores cantidades de nitrógeno aplicados. La aplicación de nitrógeno disminuyó el contenido de materia seca de las inflorescencias. En la mitad de los experimentos de aplicación en banda del fertilizante nitrogenado resultó en una producción extra de materia seca en la inflorescencia y contenidos bajos de materia seca en la inflorescencia. En la proporción óptima de aplicación de nitrógeno colocado en banda, el índice de cosecha de nitrógeno en los experimentos varió del 27 a 30% . La cantidad de nitrógeno mineral en el suelo a la cosecha generalmente aumentó con las

cantidades crecientes de nitrógeno aplicado. La aplicación en banda resultó solamente en un experimento en cantidades más bajas de nitrógeno mineral en el suelo durante la cosecha. El nitrógeno mineral en el suelo a la cosecha puede distribuirse horizontalmente en forma desigual, tanto con la aplicación de directa y en banda del fertilizante nitrogenado; la cantidad de nitrógeno desconocido en la cosecha aumentó con cantidades crecientes de nitrógeno aplicadas, pero fue siempre menor que la cantidad de nitrógeno en los residuos de los cultivos. En las tasas óptimas de aplicación de nitrógeno en banda, la cantidad de nitrógeno en los residuos de cosecha varió de 120 a 155 kg ha⁻¹. Con la producción de brócoli, el nitrógeno en los residuos de los cultivos constituye la principal fuente de pérdida potencial de nitrógeno para el medio ambiente.

Rincón *et al.*, (1999), indican que se ha estudiado y cuantificado el crecimiento vegetativo y absorción de nutrientes en un cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* L) cv. Marathon, con una densidad de plantación de 5 plantas m⁻². Las plantas se muestrearon cada 15-20 días durante 87 días después del trasplante. La producción total de materia seca en el periodo de muestreo fue de 6.2 t ha⁻¹, contribuyendo las inflorescencias con 39.1% del total. El índice de área foliar fue de 4.4 a los 87 días después del trasplante, consiguiéndose la mayor eficiencia foliar expresada como asimilación neta media entre el 0 y 31 días después del trasplante. Las cantidades totales de macronutrientes absorbidos por el cultivo para una producción total de 19.2 t ha⁻¹ fueron expresadas en kg ha⁻¹: 243.9 N, 28.7 P, 240.9 K, 221.3 Ca y 23.0 Mg. La mayor acumulación de N, P y Mg se produjo durante el periodo de máximo crecimiento de las inflorescencias y la de K y Ca se produjeron al final del periodo de cultivo.

Matsumoto *et al.*, (1999). indican que la respuesta a la absorción de nitrógeno en pimiento, rábano chino, el brócoli, la col, chingensai, espinaca, nabo, lechuga y zanahoria fue probado en un suelo con una mezcla de salvado de arroz y paja de arroz (SPA) con una relación C/N de 19. La concentración de nitrógeno inorgánico en el suelo sin sembrar fue menor, pero las concentraciones de aminoácidos y proteínas fueron mucho mayores en el tratamiento con SPA que en el suelo testigo (sin nitrógeno adicional). La absorción de nitrógeno por el pimiento y la lechuga hoja fue mayor en el suelo testigo que con el

tratamiento SPA. Por el contrario, la absorción de nitrógeno por chingensai, zanahoria y espinacas era mayor en el tratamiento de SPA que en el suelo a pesar de un estado del nitrógeno inorgánico consistentemente más bajos. Estos resultados sugieren que la respuesta de la absorción de nitrógeno a nitrógeno orgánico aplicado depende de los cultivos. Resultados similares fueron obtenidos mediante el uso de materiales orgánicos como la torta de colza (TC) y heces secas de ganado (HSG con una menor relación C/N que SPA). La absorción de nitrógeno por el pimiento y la lechuga fue menor para el nitrógeno orgánico que con el sulfato de amonio (SA), mientras que la absorción de nitrógeno por la zanahoria, chingensai y espinacas fue mayor para TC que para AS.

Castellanos *et al.*, (2001), indican que se ha encontrado que las reservas de agua subterránea en el Centro de México están disminuyendo y las concentraciones de NO_3^- -N de algunos pozos de riego están excediendo 10 ppm. Existe la necesidad de desarrollar buenas prácticas de manejo (BMPs) que pueden incrementar el uso eficiente del agua y del nitrógeno para hortalizas como el brócoli (*Brassica oleracea* Itálica) en esta región. Se realizaron tres experimentos en campo durante 1996 y 1998 en la Estación Experimental del INIFAP en Celaya, Guanajuato, México para desarrollar BMPs en la región. Con el objeto de determinar el nivel de suficiencia de nitrógeno en el tejido vegetal, se realizaron estudios en la hoja más recientemente madura y totalmente expandida (HMRM) en el peciolo seco y en el extracto celular del mismo (ECP), habiendo analizado nitrógeno total y NO_3^- -N, respectivamente en estas porciones vegetales. Los rendimientos máximos comercializables de 24.5 a 27.0 t ha⁻¹ se alcanzaron con dosis de 400 a 425 kg N ha⁻¹. Los niveles de suficiencia de nitrógeno en el HMRM estaban en el rango 5.5 a 6.0% durante el desarrollo de la inflorescencia y luego se redujo 4.0 a 5.0% durante la etapa de cosecha. La concentración crítica de NO_3^- -N en el peciolo varió de 15000 a 20000 mg kg⁻¹, al inicio del ciclo, y de 3500-5000 mg kg⁻¹ en la etapa de pre cosecha. El nivel adecuado de NO_3^- -N en el extracto celular de peciolo varió de 1600 a 2000 mg L⁻¹ al inicio del ciclo, y de 500 a 800 mg L⁻¹ en pre cosecha. La fertilización del brócoli con 400 kg N ha⁻¹ proporcionó beneficios al subsiguiente cultivo de maíz (*Zea mays* L), en niveles equivalentes 60% de los conseguidos con la fertilización nitrogenada. Este estudio muestra que mediante el riego por goteo, la aplicación directa del N, el monitoreo del nivel de N a lo largo del ciclo de

crecimiento y la rotación de cultivos con gramíneas, se logra incrementar la eficiencia en el uso del nitrógeno en sistemas de cultivo de hortalizas-gramínea, al mismo tiempo que se podría incrementar la materia orgánica del suelo contribuyendo a la protección de la calidad ambiental en el centro de México.

Thompson *et al.*, (2002), indican que la producción de brócoli en el suroeste de EE.UU. es altamente dependiente de insumos, agua y fertilizantes nitrogenados para lograr óptimos rendimientos y calidad. Las características del agua y la respuesta del nitrógeno en el riego por goteo en el subsuelo no han sido reportadas. Los experimentos de campo se llevaron a cabo en el sur de Arizona durante 1993 hasta 1996. Los objetivos fueron determinar: (i) respuesta del brócoli al riego por goteo en el subsuelo a un rango de tensión de humedad del suelo (THS), (ii) efectos e interacciones del agua y la fertilización nitrogenada en el rendimiento y calidad de los cultivos y (iii) absorción estacional y diaria del nitrógeno. Los experimentos consistieron en combinaciones factoriales en tres regímenes de riego (bajo, medio y alto) y cuatro dosis de nitrógeno (60-500 kg ha⁻¹ de nitrógeno). El riego se aplicó diariamente con el objetivo de mantener la THS y todas las dosis de nitrógeno se aplicaron mediante fertirrigación. Con respecto al rendimiento comercial, la THS óptima fue de 10 kPa en suelo arenoso, como se indicaron en los modelos de superficie de respuesta. Los rendimientos comerciales en todos los tratamientos variaron de < 3 a > 18 t ha⁻¹. El rendimiento comercial se vio afectado de manera significativa por la dosis de nitrógeno durante las tres estaciones y por la THS durante dos de las tres estaciones. No hubo significancia para las interacciones THS x dosis de nitrógeno en el rendimiento comercial. Los parámetros de calidad (peso la inflorescencia y diámetro) fueron muy sensibles a las dosis de nitrógeno que con THS y había pocos interacciones significativas THS x dosis de nitrógeno para la calidad del brócoli. El brócoli acumuló hasta 320 kg N ha⁻¹ en la biomasa, y los flujos de la absorción de nitrógeno fueron altos hasta 5 kg N ha⁻¹ d⁻¹ en la primera etapa de crecimiento (825-1000 unidades calor después del trasplante).

Villalobos *et al.*, (2005), indican que el propósito del presente estudio fue definir las tensiones de humedad para maximizar el rendimiento y la calidad del florete en brócoli, cultivar Patriot. El experimento se estableció en un Vertisol. La plantación se estableció a

doble hilera en surcos separados a 1.0 m, la distancia entre hileras fue de 0.25 m y 0.30 m entre plantas, con una densidad de población de 66000 plantas ha⁻¹. Se evaluaron seis tratamientos en bloques al azar con cuatro repeticiones: 1) acolchado plástico a 28 kPa, 2) seco a 45 kPa, 3) semiseco a 36 kPa, 4) medio a 28 kPa, 5) semihúmedo a 20 kPa, 6) húmedo a 12 kPa de tensión de humedad en el suelo. El cultivo presentó un consumo de agua de 24.5, 27.3, 31.0, 35.8, 40.0 y 45.7 cm de lámina en los tratamientos de acolchado, seco, semiseco, medio, semihúmedo y húmedo, respectivamente. Los mayores valores de grosor de tallo, altura de planta, cobertura de área foliar, número de tallos secundarios y acumulación de biomasa se presentaron en el tratamiento húmedo. El máximo rendimiento comercial se obtuvo en el tratamiento semihúmedo con la aplicación el riego a 20 kPa de tensión. El vigoroso crecimiento vegetativo en el tratamiento húmedo no favoreció el desarrollo del florete y el rendimiento disminuyó con relación al tratamiento semihúmedo.

Vidal *et al.*, (2006), indican que la mayoría de los suelos agrícolas de México tienen un buen abastecimiento de potasio, porque están en zonas áridas o volcánicas, la ceniza es rica en este nutrimento. Estos suelos no requieren la fertilización potásica en cultivos básicos, pero es una práctica usual para los cultivos más demandantes. La información sobre la fertilización de cultivos hortícolas es insuficiente, especialmente en fertirriego. Por tanto, el objetivo del presente estudio fue obtener información para generar recomendaciones de fertilización potásica de brócoli en fertirriego. El experimento se desarrolló en Montecillo, estado de México, en invernadero, con el cultivar de brócoli Heritage, usando un Vertisol de Celaya, Guanajuato, de marzo a julio de 2003. Se usó un diseño de bloques completos al azar con ocho tratamientos: dos manejos de cultivo (convencional y fertirriego) y cuatro niveles de K ($K_0=0$, $K_1=70$, $K_2=140$ y $K_3=210$ mg K kg⁻¹ suelo; 9 kg suelo por maceta); cada tratamiento se repitió 12 veces. Los resultados se analizaron estadísticamente como factorial 2 x 4, con dos repeticiones para cada uno de los cuatro muestreos realizados durante el desarrollo del cultivo y cuatro repeticiones a la cosecha. Las variables de respuesta fueron rendimiento, peso de la biomasa (fresco y seco), concentración de potasio en la planta y la dinámica del potasio hidrosoluble, intercambiable y no intercambiable del suelo. Los rendimientos medios de brócoli en fertirrigación fueron 33.5% superiores a los de manejo convencional. Las extracciones de potasio por el cultivo en fertirrigación fueron

83.8% superiores a las del cultivo con manejo convencional. El tratamiento K_2 elevó significativamente el rendimiento de brócoli pero sólo con el manejo convencional. Hubo mayor absorción de potasio en el fertirriego por un suministro más adecuado de agua, lo que ayuda a economizar agua y fertilizante.

Arévalo *et al.*, (2007), indica que la aplicación de fertilizantes nitrogenados tiene el propósito de complementar el aporte de nitrógeno edáfico para satisfacer la demanda del cultivo; sin embargo, el uso inapropiado de estos insumos aumenta la cantidad de nitrato residual en el suelo (N_r) y el riesgo de su posterior lixiviación, independientemente si se trata de fertilizantes sintéticos (F_s) u orgánicos. Con el objetivo de comparar el efecto de la fertilización sobre el N_r , se hizo un ensayo de respuesta a la aplicación de nitrógeno, considerando al brócoli como cultivo indicador por su alta demanda de este nutriente. Se emplearon F_s o abono verde, aplicado este último al omento del trasplante (A_{v1}) o 15 días previos al mismo (A_{v2}). La respuesta del brócoli fue cuadrática (300 kg ha^{-1} como dosis óptima fisiológica) con un rendimiento máximo de 1.94, 1.55 y $1.31 \text{ kg planta}^{-1}$, para F_s , A_{v1} y A_{v2} , respectivamente. Los F_s dejaron menos N_r , seguido por A_{v1} y A_{v2} , por lo que se concluye que si no se aplican los fertilizantes orgánicos de manera oportuna se incrementará en N_r , con el consecuente riesgo de su lixiviación y contaminación de los mantos freáticos.

Vågen *et al.*, (2007), indican que los efectos de las tres dosis de nitrógeno ($0, 120$ y 240 kg ha^{-1}) y dos fechas de trasplante (mayo o junio/julio) en el rendimiento y nitrógeno absorbido en el cultivar temprano Milady y cultivar tardío Marathon fueron investigados en tres tipos de suelos franco limosos variando el nitrógeno mineral en la parte sur de Noruega desde 1999 hasta 2001. En todos los cultivos que recibieron fertilización la absorción de nitrógeno inició rápidamente alrededor de las tres semanas después del trasplante. El rendimiento relativo de las inflorescencias de brócoli incremento conforme incrementaron las reservas del suelo (fertilizante nitrogenado más nitrógeno mineral) en el trasplante de $200\text{-}250 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrógeno y luego se estabilizó. Los dos tipos de fertilizaciones bajas fueron más restrictivas a los rendimientos en las plantaciones tempranas que en las plantaciones tardías. Un incremento general en el índice de cosecha con el aumento de la

dosis de nitrógeno refleja más fuerte del nitrógeno sobre el rendimiento de las inflorescencias que en el total por encima de la producción de biomasa aérea. La aparente recuperación del fertilizante nitrogenado disminuyó al aumentar la dosis de nitrógeno y fue en promedio 74% en el total de biomasa aérea y 25% en las inflorescencias de brócoli. A pesar de una mayor absorción de nitrógeno, el nivel medio del suelo del nitrógeno mineral a la cosecha aumentó de 12 kg ha⁻¹ de nitrógeno en las parcelas sin fertilizar a 27 y 78 kg ha⁻¹ de nitrógeno en las parcelas que recibieron de 120 a 240 kg ha⁻¹ de nitrógeno, respectivamente; este incremento fue más fuerte a principios de que en trasplantes tardíos y más fuerte en Milady que en Maratón. El rendimiento de las inflorescencias de brócoli fue similar en los dos cultivares, pero Milady tenía una producción de biomasa total más bajo y por lo tanto un índice de cosecha superior, presumiblemente debido a la iniciación temprana de las inflorescencias.

Cartagena (2009), indica que el brócoli es una de las hortalizas de mayor importancia económica, por su acelerado incremento en las exportaciones en diversos países latinoamericanos, entre los que destaca México (327.1 mil toneladas), Guatemala (53 mil toneladas) y Ecuador (48.7 mil toneladas). Sin embargo, existen problemas en el uso eficiente del nitrógeno y por ello es necesario hacer énfasis en la investigación que ayude a mejorar la fertilización nitrogenada. El objetivo de la investigación es generar en condiciones de campo el requerimiento interno de nitrógeno para brócoli para cuantificar su demanda nutrimental, como uno de los componentes de la metodología del balance nutrimental del cálculo de las recomendaciones de fertilizantes. El experimento se realizó en el Laboratorio de Ingeniería de Riego del Campo Experimental Tlapeaxco de la Universidad Autónoma Chapingo, México; desde septiembre hasta diciembre del 2008; bajo un diseño de parcela dividida en bloques completamente al azar, cuatro repeticiones y 12 tratamientos. Los tratamientos fueron resultado de los factores: híbridos de brócoli (Avenger y Heritage) y dosis de nitrógeno (0, 50, 150, 300 y 450 kg ha⁻¹ y testigo absoluto). Se evaluó en la biomasa aérea total: peso seco, peso fresco y nitrógeno acumulado. Del estudio resultó que la cantidad de nitrógeno acumulado está directamente asociado con la producción de peso seco, hasta alcanzar su rendimiento máximo y es independiente de los híbridos de brócoli; el requerimiento interno de nitrógeno fue igual en

los híbridos a pesar de obtenerse diferentes rendimientos; los rendimientos máximos de la inflorescencia se obtuvieron con la dosis de 300 kg ha⁻¹ de nitrógeno; con producciones de 17.7 t ha⁻¹ en el híbrido Avenger y 14.6 t ha⁻¹ en el híbrido Heritage.

Fraire *et al.*, (2010), indican que en 2005 y 2006 se evaluaron ocho y doce cultivares comerciales de brócoli respectivamente, en Apaseo el Grande, Guanajuato, México, en tres densidades de plantación (55000, 65000 y 75000 plantas ha⁻¹), en parcelas de 48 m². Al momento de la cosecha se midió diámetro del florete, hueco del tallo y número de minifloretes y se registró la pérdida de peso a temperatura ambiente (18-25°C) en las 40 h posteriores a la cosecha. Los resultados mostraron que la densidad de plantación tiene un efecto inversamente proporcional al diámetro del florete y al hueco en el tallo. Densidad de 55000 plantas ha⁻¹ produjo mayor diámetro de florete y de hueco en el tallo, mientras que la densidad de 75000 plantas ha⁻¹ produjo menos diámetro de florete. El cultivar Mónaco presentó el mayor rendimiento de florete. Ironman tuvo el menor diámetro de hueco en el tallo. El número de minifloretes no estuvo influenciado por la densidad de plantación, pero sí por el cultivar ya que las variedades Grandísimo y Avenger superaron a los demás en cantidades de minifloretes. La menor pérdida de peso se registró en floretes a una densidad de plantación de 65000 plantas ha⁻¹.

Torres (2011), indica que la región de Tepeaca-Tecamachalco, es una de las principales zonas productoras de brócoli en el estado de Puebla-México, en el lugar se encuentran diferentes granjas avícolas, lo que permite que la pollinaza sea un insumo en cantidad y disponibilidad para los agricultores que lo utilizan como fuente orgánica para la fertilización del brócoli y otros cultivos junto con cultivos minerales. Se caracterizó el sistema de producción de brócoli, con información obtenida mediante la técnica de la encuesta, se encontró que en el sistema de producción de brócoli se usan altas dosis de pollinaza, 11 t ha⁻¹. El productor de brócoli siembra una alta diversidad de cultivos. El brócoli tiene altos costos de producción. Una vez conocidas las dosis de fertilización utilizadas se realizó un experimento con diferentes dosis de fertilización órgano mineral y marcado el mineral con ¹⁵N, para conocer el comportamiento del nitrógeno, teniendo una vez obtenidas las muestras se procedió a cuantificar el nitrógeno total y ¹⁵N mediante el

método kjeldahl e isotópico respectivamente. Los resultados del experimento muestran que la adición de pollinaza estimula la inmovilización del nitrógeno en el suelo y del agregado como fertilizante sintético. Esta inmovilización se ve reflejada en una menor absorción de nitrógeno del cultivo, sin embargo, combinaciones adecuadas de nitrógeno orgánico más sintético pueden estimular la disponibilidad y absorción de nitrógeno en el sistema. Es necesario realizar estudios enfocados a identificar y cuantificar el paradero (pérdida a la atmósfera y/o lixiviación) de nitrógeno que ingresa al sistema de producción, así como el análisis económico de esta práctica de fertilización.

En el Cuadro 2.14, se presenta un resumen de los trabajos realizados en fertilización nitrogenada en el cultivo de brócoli.

Cuadro 2.14. Rendimiento, densidad de plantas, nitrógeno aplicado y acumulado en el cultivo de brócoli.

Rendimiento t ha ⁻¹	Densidad plantas ha ⁻¹	Nitrógeno		Híbrido	Autor
		aplicado kg ha ⁻¹	acumulado kg ha ⁻¹		
5.6	25650	120	96	Four week old	Vimala (1997)
9.4	44400	196		Emperor	Everaarts (1994)
9.7	50000	300		Liberty	Arevalo (2007)
10.5	35000	270		Green Comet	Letey (1983)
12.0	50000	300	58	Di Marzo	Magnífico (1989)
15.4	130000	300		Green Valiant	Soto (1991)
15.8	50000	300	78	Di Gennaio	Magnífico (1989)
16.0	31000	300	356	Heritage	Torres (2011)
16.9	57000	240	72	Milady	Vågen (2007)
17.5	100000	300		Green Valiant	Soto (1991)
17.7	22000	300	309	Avenger	Cartagena (2009)
18.9	57000	240	69	Marathon	Vågen (2007)
18.9	100000	500	236	Claudia	Thompson (2002)
19.2	62000	456	243	Marathon	Rincón (1999)
20.0	66666	339	353	Marathon	Padilla (1998)
20.0	35000	331		Green Comet	Beverly(1986)
20.4	77500	436	342	Emperor	Zebarth (1995)
21.5	66000	400		Heritage	Vidal (2005)
24.5	65000	425	449	Patriot	Castellanos (2001)
27.0	70000	400	341	Legacy	Castellanos (2001)
31.7	66000	400		Patriot	Villalobos (2005)
32.3	20000	135	559	Medium Late	Magnífico (1979)

2.4. Resumen de la revisión de literatura

Entre los factores involucrados en el incremento del rendimiento se encuentra el uso intensivo de los fertilizantes nitrogenados. El uso exagerado de nitrógeno ocasiona un crecimiento vegetativo excesivo, retrasa la maduración, mayor sensibilidad a enfermedades y en condiciones extremas, afecta negativamente el rendimiento de los cultivos.

Existen distintas metodologías que se utilizan para la generación de recomendaciones de fertilización en los cultivos, las cuales generalmente incluyen parámetros de clima, cultivo, suelo y manejo. Entre estas metodologías está el denominado Modelo Simplificado, la cual considera que cuando la demanda de nutrientes de la biomasa de los cultivos no es satisfecha por el suministro de nutrientes que es capaz de entregar el suelo, se produce un déficit que debe ser superado con la adición de fertilizantes.

En el caso del brócoli, los investigadores han realizado trabajos de fertilización nitrogenada sin encontrar una dosis que represente la variación del suelo, clima, variedades y densidades de población, y más aún existe una marcada tendencia a aplicar dosis de nitrógeno que sobrepasan los requerimientos del cultivo. Por este motivo, se propone aplicar el Modelo Simplificado para la generación de dosis de fertilización y calcular los componentes que lo integran como son la demanda nutrimental, suministro de nitrógeno del suelo y eficiencia de la fertilización nitrogenada.