

Variabilidad espacial de la co-limitación de agua y nitrógeno, efecto sobre
la eficiencia de uso de agua y nitrógeno en maíz

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Producción Vegetal*

Susana María Albarenque

Ingeniera Agrónoma - Universidad Nacional de Entre Ríos- 2007

Lugar de trabajo: EEA Paraná INTA



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director

Octavio Pedro Caviglia

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)
Dr. en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Co-director

Gustavo Ángel Maddonni

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)
Dr. en Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Buenos Aires)

Consejero

Ricardo José Miguel Melchiori

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Entre Ríos)
M.Sc. en Producción Vegetal (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO DE TESIS

Director

Octavio Pedro Caviglia

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)
Dr. en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO

Fernando Salvagiotti

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Córdoba)
Master Science en Producción Vegetal (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Ciencias del Suelo y Agua (University of Nebraska-Lincoln, USA)

JURADO

Juan Pablo Monzon

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Mar del Plata)
Dr. en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Fecha de defensa de la tesis: 12 de AGOSTO de 2015

DEDICATORIA

*Los límites, como los miedos,
frecuentemente son sólo una ilusión (M. Jordan)*

A Emilio

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por estar siempre y apoyarme en mis proyectos

A mi Director Octavio Caviglia por sus aportes y sugerencias

A mis consejeros Gustavo Maddonni y Ricardo Melchiori, por sus rápidas respuestas y valiosos aportes

A mis compañeros del Grupo de Recursos naturales y factores abióticos de la EEA Paraná de INTA por su ayuda y colaboración en diferentes tareas de campo y laboratorio

A mis amigos, los de siempre y los que se han ido sumando y me han acompañado en este camino

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Ing. Agr. Susana María Albarenque

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ABREVIATURAS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.1.1. Variabilidad espacial de la disponibilidad de agua y nitrógeno en el suelo....	2
1.1.2. Co-limitación de recursos	4
1.1.3. Variabilidad temporal de los recursos.....	5
1.2. Hipótesis.....	6
1.3. Objetivos	6
1.4. Estructura del trabajo de tesis	6
CAPITULO 2.....	7
DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS DE MANEJO, DISEÑO EXPERIMENTAL Y CONDICIONES AMBIENTALES	7
2.1. Sitios de estudio.....	8
2.2. Delimitación de zonas de manejo.....	9
2.3. Oferta de N y evapotranspiración de los cultivos	11
2.4. Experimentos de fertilización nitrogenada	12
2.5. Condiciones ambientales, disponibilidad de N y agua.....	13
CAPÍTULO 3.....	18
EFICIENCIA DE USO DE AGUA Y N DE MAIZ POR ZONAS DE MANEJO	18
3.1. INTRODUCCIÓN.....	19
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.2.1. Sitio de estudio y delimitación de zonas de manejo.....	20
3.2.2. Muestreo de suelos y análisis	20
3.2.3. Experimentos de fertilización nitrogenada	20
3.2.4. Estimaciones y variables derivadas.....	20
3.2.5. Análisis estadístico.....	21
3.3. RESULTADOS	21
3.3.1. Biomasa, rendimiento y N vegetal	21
3.3.2. Eficiencia de uso de agua y N	25
3.4. DISCUSIÓN.....	30
3.5. CONCLUSIONES.....	34

CAPITULO 4.....	35
CO-LIMITACIÓN DE AGUA Y N POR ZONAS DE MANEJO: EFECTO SOBRE LA EUA y LA EUN DEL CULTIVO DE MAÍZ.....	35
4.1. INTRODUCCIÓN.....	36
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
4.2.1. Sitio de estudio, muestreo y experimentos de fertilización	37
4.2.2. Índices de estrés y co-limitación.....	37
4.2.3. Análisis de resultados experimentales	38
4.3 RESULTADOS	38
4.3.1. Limitación de agua y N y Co-limitación de ambos recursos	38
4.3.2. Relación de la C_{AN} con la EUA y la EUN_d	41
4.3.3. Sensibilidad de la EUA y EUN_d a la C_{AN}	44
4.4. DISCUSIÓN.....	45
4.5. CONCLUSIONES	47
CAPÍTULO 5.....	48
VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA CO-LIMITACIÓN DE AGUA Y NITRÓGENO: EFECTO SOBRE LA EFICIENCIA DE USO DEL AGUA Y DEL NITRÓGENO	48
5.1. INTRODUCCIÓN.....	49
5.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
5.2.1. Descripción del modelo de simulación SALUS (System Approach to Land Use Sustainability).....	50
5.2.2. Datos climáticos y de suelo	51
5.2.3. Calibración y validación.....	51
5.2.4. Evaluación del modelo de simulación	52
5.2.5. Experimentos de simulación.....	52
5.2.6. Eficiencia de uso de agua y nitrógeno, limitación de agua y N y co-limitación	52
5.2.7. Análisis de resultados	52
5.3. RESULTADOS	53
5.3.1. Validación del modelo: Variables de cultivo y balance hídrico	53
5.3.2. Simulación a largo plazo de experimentos de fertilización nitrogenada por ZM	58
5.3.3. Variabilidad temporal de la EUA, EUN, limitaciones y C_{AN}	59
5.3.4. Variabilidad temporal de las relaciones de la EUA y EUN con la C_{AN}	66
5.4. DISCUSIÓN.....	67
5.5. CONCLUSIONES	70
CAPÍTULO 6.....	71

DISCUSIÓN GENERAL	71
6.1. <i>Síntesis de los resultados obtenidos</i>	72
6.2. <i>Utilidad de la información generada</i>	75
6.3. <i>Posibles líneas de investigación</i>	76
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXO	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.1 Valores medios de materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE) y altura media por zona de manejo para el Lote 1 y Lote 2. Grados de erosión: h0, sin erosión hídrica; h1, erosión hídrica ligera, pérdida <25% espesor del horizonte superficial; h2, erosión hídrica moderada, pérdida entre 25 y 50% del horizonte superficial; h3, erosión hídrica severa, pérdida de más de 50% del horizonte superficial; hx, deposición o acumulación de materiales provenientes de la erosión.....	11
Tabla 2.5.1. Temperatura media diaria, radiación fotosintéticamente activa (PAR) media diaria, precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual (ETP), ocurridas durante a estación de crecimiento del cultivo de maíz las campañas 2011/12 (Lote 1) y 2012/13 (Lote 2). Se muestran los registros históricos (1971-2012).....	13
Tabla 3.3.1. Valores medios de biomasa a madurez fisiológica, rendimiento en grano, N acumulado en el grano (Ng) y N total acumulado (Nacum) por el cultivo de maíz por zona de manejo y tratamiento de fertilización con N en el Lote 1.....	22
Tabla 3.3.2. Valores medios de biomasa, rendimiento en grano, N acumulado en el grano (Ng) y N total acumulado (Nacum) por el cultivo de maíz por zona de manejo y tratamiento de fertilización con N en el Lote 2.....	23
Tabla 3.3.3. Valores medios de N disponible (Nd), eficiencia de uso de N en biomasa (EUN _{db}), eficiencia de uso de N en grano (EUN _{dg}), evapotranspiración del cultivo (ETC), eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA _b) y eficiencia de uso de agua en grano (EUA _g) por zona de manejo (ZM) y tratamiento de fertilización con N (N) en el Lote 1.....	26
Tabla 3.3.4. Valores medios de N disponible (Nd), eficiencia de uso de N en biomasa (EUN _{db}), eficiencia de uso de N en grano (EUN _{dg}), evapotranspiración del cultivo (ETC), eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA _b) y eficiencia de uso de agua en grano (EUA _g) por zona de manejo (ZM) y tratamiento de fertilización con N (N) en el Lote 2.....	27
Tabla 4.3.1. Valores de limitación de agua (L _A), limitación de N (L _N), co-limitación de agua y nitrógeno (C _{AN}), limitación total (T _{AN}) y limitación máxima (M _{AN}), de las 4 ZM evaluadas en el Lote 1. Las limitaciones de agua y N se estimaron con los índices de estrés de agua y N simulados con SALUS.....	39
Tabla 4.3.2. Valores de limitación de agua (L _A), limitación de N (L _N), co-limitación de agua y nitrógeno (C _{AN}), limitación total (T _{AN}) y limitación máxima (M _{AN}), de las 3 ZM evaluadas en el Lote 2. Las limitaciones de agua y N se estimaron con los índices de estrés de agua y N simulados con SALUS.....	39
Tabla 4.3.3. Coeficientes de correlación (r) de las relaciones entre la limitación de agua (L _A), limitación de N (L _N), co-limitación de agua y nitrógeno (C _{AN}), limitación total (T _{AN}), limitación máxima (M _{AN}) con la eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA _b) y grano (EUA _g) y la eficiencia de uso de nitrógeno en biomasa (EUN _{db}) y grano (EUN _{dg}). Las eficiencias de uso de agua y N corresponden a los resultados obtenidos en el ensayo de fertilización realizado en el Lote 1 en 4 ZM. Las limitaciones de agua y N se estimaron con los índices de estrés de agua y N simulados con SALUS.....	40
Tabla 4.3.4. Coeficientes de correlación (r) de las relaciones entre la limitación de agua (L _A), limitación de N (L _N), co-limitación de agua y nitrógeno (C _{AN}), limitación total (T _{AN}), limitación máxima (M _{AN}) con la eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA _b) y grano (EUA _g) y la eficiencia de uso de nitrógeno en biomasa (EUN _{db}) y grano (EUN _{dg}). Las	

eficiencias son resultado del ensayo de fertilización realizado en el Lote 2 en 3 ZM. Las limitaciones de agua y N se estimaron con los índices de estrés de agua y N simulados con SALUS.....41

Tabla 4.3.5. Pendiente de la relación de la eficiencia de uso de agua en biomasa y grano (EUA_b y EUA_g) con la co-limitación de agua y N (C_{AN}) y de la eficiencia de uso de N en biomasa y grano (EUN_{db} y EUN_{dg}) con la C_{AN} , raíz del cuadrado medio de la regresión (RMSE) y sensibilidad de la EUA y la EUN_d a la C_{AN} , en el Lote 1 y Lote 2.....44

Tabla 5.3.1. Coeficiente de determinación (r^2), coeficientes de la regresión lineal entre valores observados y simulados, prueba de ordenada al origen (a) igual a 0 y pendiente (b) igual55

Tabla 5.3.2. Rendimiento medio y respuesta media de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 4 ZM delimitadas en el Lote 1. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.....58

Tabla 5.3.3. Rendimiento medio y respuesta media de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 3 ZM delimitadas en el Lote 2. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.....59

Tabla 5.3.4. Eficiencia de uso de agua y de N promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 4 ZM delimitadas en el Lote 1. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.....60

Tabla 5.3.5 Eficiencia de uso de agua y de N promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 3 ZM delimitadas en el Lote 2. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de las dosis de N la variabilidad espacial.....60

Tabla 5.3.6. Limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N) y co-limitación de agua y N (C_{AN}) promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 4 ZM delimitadas en el Lote 1. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de las dosis de N la variabilidad espacial.....64

Tabla 5.3.7. Limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N) y co-limitación de agua y N (C_{AN}) promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 3 ZM delimitadas en el Lote 2. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de

N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.....64

Tabla Anexo 1. Valores de nitrógeno disponible (Nd), evapotranspiración del cultivo (ETC), biomasa a madurez fisiológica, rendimiento en grano, eficiencia de uso de N en biomasa y en grano (EUN_{db} y EUN_{dg}) y eficiencia de uso de agua en biomasa y en grano (EUA_b y EUA_g) de parcelas regadas en cada zona de manejo (ZM) y tratamiento de fertilización con N en el Lote 1 y Lote 2.....89

Tabla Anexo 2. Características de los suelos utilizados para realizar las simulaciones por ZM y año. SoilID: identificación del suelo, MH: horizonte, ZLYR: profundidad a la base del horizonte (cm), LL: punto de marchitez permanente ($cm^3 cm^{-3}$), DUL: capacidad de campo ($cm^3 cm^{-3}$), SAT: saturación ($cm^3 cm^{-3}$), OC: carbono orgánico (%), Clay: contenido de arcilla (%), Silt: contenido de limo (%), SWCN: conductividad hidráulica en saturación ($cm h^{-1}$).....90

Tabla Anexo 3. Modelos comparados en el Lote 1. Modelo completo, describe los resultados utilizando 4 funciones una para cada ZM; Modelo simple1, describe la relación entre variables con una sola función (5 parámetros); Modelo simple2, que describe los resultados con una única función (2 parámetros).....91

Tabla Anexo 4. Modelos comparados en el Lote 2. Modelo completo, describe los resultados utilizando 4 funciones una para cada ZM; Modelo simple1, describe la relación entre variables con una sola función (4 parámetros); Modelo simple2, que describe los resultados con una única función (2 parámetros).....92

Tabla Anexo 5. Análisis de la variación del error entre modelos de regresión y significancia de la diferencia entre modelos, para la eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b), y en grano (EUA_g), eficiencia de uso de N en biomasa (EUN_{db}) y en grano (EUN_{dg}) del cultivo de maíz en 4 ZM (ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1 y ZM4L1) y 4 tratamientos de fertilización con N (N0, N70, N140 y N210) del Lote 1.....93

Tabla Anexo 6. Análisis de la variación del error entre modelos de regresión y significancia de la diferencia entre modelos, para la eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b) y en grano (EUA_g), eficiencia de uso de N en biomasa (EUN_{db}) y en grano (EUN_{dg}) del cultivo de maíz en 3 ZM (ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2) y 4 tratamientos de fertilización con N (N0, N70, N140 y N210) del Lote 2.....94

Tabla Anexo 7. ANOVA de resultados de simulación de largo plazo. Rendimiento, respuesta a N, eficiencia de uso de agua (EUA), eficiencia de uso de N (EUN_f), limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N) y co-limitación de agua y N (C_{AN}).....97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1. Ubicación del campo experimental de la Estación Experimental Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (31° 50' S; 60° 31' W; 110 m.s.n.m) en la Provincia de Entre Ríos y de los lotes utilizados para la realización de los ensayos de fertilización nitrogenada en maíz en el a) Lote 1 y b) Lote 2. El rectángulo superior indica la ubicación del área de estudio dentro de Argentina.....	9
Figura 2.2.2. Mapas interpolados a una grilla de 5x5m de las variables utilizadas para la delimitación de zonas de manejo en el Lote 1 (a, c, e) y Lote 2 (b, d, f). a y b: CE (mhos m ⁻²); c y d: MO (%) y e y f: altimetría (m).....	10
Figura 2.4.1. Zonas de manejo delimitadas en el Lote 1. Detalle de la disposición de las parcelas de los tratamientos de fertilización con N dentro de las ZM y ubicación de los tubos de acceso de la sonda de neutrones para la medición de humedad de suelo en cada parcela.....	12
Figura 2.4.2. Zonas de manejo delimitadas en el Lote 2. Detalle de la disposición de las parcelas de los tratamientos de fertilización con N dentro de las ZM y ubicación de los tubos de acceso de la sonda de neutrones para la medición de humedad de suelo en cada parcela.....	13
Figura 2.5.1. Balance hídrico mensual calculado como la diferencia entre las precipitaciones mensuales y las ETP mensuales ocurridas durante el período de crecimiento del cultivo de maíz, en el a) Lote 1 y b) Lote 2.....	14
Figura 2.5.2. Contenido inicial de N-NO ₃ en cada uno de los estratos (0-20cm) de suelo de las ZM del a) Lote 1 y b) Lote 2. La comparación de las medias entre las ZM para una misma profundidad de muestreo se realizó mediante un test de LSD (α : 0,05) y la significancia se indicó como ns; *, **, *** (no significativo, P<0,05, P<0,01, P<0,001, respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada profundidad de muestreo.....	15
Figura 2.5.3. Contenido inicial de humedad por estrato de suelo (0-160cm) en cada una de las ZM del a) Lote 1 y b) Lote 2. La comparación de las medias entre las ZM para una misma profundidad de muestreo se realizó mediante un test de LSD (α : 0,05) y la significancia se indicó como ns; *, **, *** (no significativo, P<0,05, P<0,01, P<0,001, respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada profundidad de muestreo.....	16
Figura 2.5.4. Evolución del contenido de agua del suelo (mm) hasta 160cm de profundidad en las 4 ZM del Lote 1 (a) y hasta los 100cm en las 3 ZM del Lote 2 (b) en el tratamiento N ₀ desde la siembra hasta la madurez fisiológica del cultivo de maíz. Símbolos llenos: Lote 1, símbolos vacíos: Lote 2.....	17
Figura 3.3.1. Respuestas relativas al agregado de N (%) para la biomasa y el rendimiento del cultivo de maíz bajo tres disponibilidades de N (promedio de las ZM) en el Lote 1 y Lote 2. Las barras verticales indican el error estándar.....	24
Figura 3.3.2. Respuestas relativas al agregado de N (%) para la biomasa y el rendimiento del cultivo de maíz (promedio por ZM) en el Lote 1 y Lote 2. Las barras verticales indican el error estándar.....	25
Figura 3.3.3. Relación entre la eficiencia de uso de N (EUN _d) y el nitrógeno disponible (Nd) para las 4 ZM y 4 tratamientos de N evaluados en el Lote 1. Símbolos llenos: EUN _{db} = -0.27Nd + 130.4, r ² = 0.77; símbolos vacíos: EUN _{dg} = -0.08x + 44.9, r ² = 0.52.....	28

Figura 3.3.4. Relación entre la eficiencia de uso de N (EUN_d) y el nitrógeno disponible (N_d) para las 3 ZM y 4 tratamientos de N evaluados en el Lote 2. a) EUN_{db} (símbolos llenos), b) EUN_{dg} (símbolos vacíos). ZM1L2: $EUN_{db} = -0.18N_d + 125.2$, $r^2=0.86$; $EUN_{dg} = -0.06N_d + 53.5$, $r^2=0.75$; ZM2L2: $EUN_{db} = -0.26N_d + 132.3$, $r^2=0.99$; $EUN_{dg} = -0.10N_d + 55.0$, $r^2=0.76$; ZM3L2: $EUN_{db} = -0.41N_d + 159.3$, $r^2=0.85$; $EUN_{dg} = -0.15N_d + 64.3$, $r^2=0.98$29

Figura 3.3.5. Relación de la EUA en biomasa (EUA_b) y grano (EUA_g) con el N_d para las ZM evaluadas en el a) Lote 1: $EUA_b = 0.02N_d + 26.36$, $r^2= 0.11$; $EUA_g = 0.02N_d + 7.61$, $r^2= 0.34$ y b) Lote 2: $EUA_b = 0.07N_d + 17.87$, $r^2= 0.64$; $EUA_g = 0.04N_d + 6.24$, $r^2= 0.70$30

Figura 4.3.1. Relación entre la eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b) y la eficiencia de uso de N en biomasa (EUN_{db}) del cultivo de maíz con la co-limitación de agua y N (C_{AN}) para las 4 zonas de manejo evaluadas en el Lote 1. a) EUA_b , b) EUN_{db} , y para las 3 ZM evaluadas en el Lote 2, c) EUA_b y d) EUN_{db} . Símbolos llenos: Lote 1, símbolos vacíos: Lote 2.....42

Figura 4.3.2. Relación entre la eficiencia de uso de agua (EUA) y la eficiencia de uso de N (EUN_d) del cultivo de maíz con la co-limitación de agua y N (C_{AN}) en los dos Lotes evaluados. a) Lote 1, $EUA_g = -7.31C_{AN} + 21ZM1L1 + 19ZM2L1 + 15ZM3L1 + 19ZM4L1$ ($r^2=0.91$, $p<0.01$), $EUN_{dg} = 177C_{AN} - 70$ ($r^2=0.81$, $p<0.001$), y b) Lote 2, $EUA_g = 36C_{AN} - 11$ ($r^2=0.65$, $p<0.01$), $EUN_{dg} = -86C_{AN} + 114ZM1L2 + 106ZM2L2 + 104ZM3L2$ ($r^2=0.89$, $p<0.01$). En los modelos ajustados, ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1, ZM4L1, ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2, son variables dummy que toman valor 0 o 1, para cada ZM en particular el resto de las ZM toma un valor de 0. Las flechas rojas indican los niveles de C_{AN} en los que la EUA_g y EUN_{dg} se optimizan.....43

Figura 5.2.1. Esquema del modelo de simulación de cultivos SALUS; entradas, módulos y salidas.....50

Figura 5.3.1. Resultados de la validación del modelo SALUS, a) fechas de ocurrencia de distintos estadios fenológicos de maíz simuladas y observadas (V4, V6, V8, V10, V12, V14 y R1) b) rendimiento simulado y observado, c) biomasa simulada y observada, d) nitrógeno acumulado en el grano (N_g) simulado y observado, e) contenido de agua acumulado en el suelo hasta 160cm (Lote 1) y 100cm (Lote 2) en distintas fechas del ciclo del cultivo y f) Evapotranspiración acumulada simulada y observada en diferentes períodos de la estación de crecimiento del cultivo de maíz (vegetativo, floración y llenado de granos). En b, c, d y f, se incluyeron todos los tratamientos evaluados en los ensayos de fertilización nitrogenada (N0, N70, N140, y N210) de las ZM1L1, ZM2L1, ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2. En e: se muestra el agua acumulada en el tratamiento testigo (N0) en las 5 ZM seleccionadas para la validación del modelo, símbolos llenos: Lote 1 y símbolos vacíos: Lote 2. La línea punteada representa la relación 1:1. RMSE: raíz del cuadrado medio del error, %E: porcentaje de error respecto al promedio observado.....54

Figura 5.3.2. Evolución del contenido de agua en el suelo (mm) observado y simulado hasta 160cm de profundidad en el tratamiento N0 desde la siembra hasta la madurez (días desde la siembra, DDS) del cultivo de maíz en el Lote 1, a) ZM1L1, b) ZM2L1, c) ZM3L1 y d) ZM4L1. Círculos llenos: datos observados, círculos vacíos: datos simulados con el modelo SALUS. La flecha roja indica la fecha observada de R1 (floración, Ritchie et al., 1986).....56

Figura 5.3.3. Evolución del contenido de agua en el suelo (cm) observado y simulado hasta 100cm de profundidad en el tratamiento N0 desde la siembra hasta la madurez (días desde

la siembra, DDS) del cultivo de maíz en el Lote 2, a) ZM1L2, b) ZM2L2 y c) ZM3L2. Círculos llenos: datos observados, círculos vacíos: datos simulados con el modelo SALUS.....57

Figura 5.3.4. Probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un valor de EUA_g (a, c, e, g) o EUN_f (b, d, f, h) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha⁻¹) y 4 ZM del lote 1 a y b) ZM1L1, c y d) ZM2L1, e y f) ZM3L1 y g y h) ZM4L1.....61

Figura 5.3.5. Probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un valor un valor de EUA_g (a, c, e) o EUN_{fg} (b, d, f) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha⁻¹) y 3 ZM del Lote 2 a y b) ZM1L2, c y d) ZM2L2 y e y f) ZM3L2.....62

Figura 5.3.6. Probabilidad acumulada de exceder un valor de limitación de agua (L_A ; a, d, g), limitación de N (L_N ; b, e, h) o co-limitación de agua y N (C_{AN} ; c, f, i) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha⁻¹) y 4 ZM del Lote 1. a, b, c) ZM1L1, d, e, f) ZM2L1 y g, h, i) ZM3L1 y j, k, l) ZM4L1.....65

Figura 5.3.7. Probabilidad acumulada de exceder un valor de limitación de agua (L_A ; a, d, g), limitación de N (L_N ; b, e, h) o co-limitación de agua y N (C_{AN} ; c, f, i) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha⁻¹) y 3 ZM del Lote 2. a, b, c) ZM1L2, d, e, f) ZM2L2 y g, h, i) ZM3L2.....66

Figura 6.1.1. Relaciones entre el N, las limitaciones de agua (L_A) y N (L_N), la co-limitación de agua y N (C_{AN}), la eficiencia de uso de agua para producir granos (EUA) y la eficiencia de uso de N (EUN_d Capítulo 4 y EUN_f Capítulo 5, ambas para producir grano). Los símbolos positivo y negativo indican la relación entre las variables, en los casos en que los no se indica es debido a que la relación fue variable. Las flechas junto a las variables representan la variabilidad espacial (verde) y temporal (roja), el tamaño de la flecha indica la magnitud de la variabilidad.....73

Figura Anexo 1. Resultados de la calibración del modelo de simulación SALUS. a) Biomasa simulada y biomasa observada, b) rendimiento simulado y rendimiento observado del cultivo de maíz, c) nitrógeno en grano simulado y observado y d) contenido de agua en el suelo simulado y observado hasta 160cm de profundidad. Los datos observados corresponden a los resultados obtenidos en las ZM3L1 y ZM4L1 del Lote 1, en las que se evaluaron 4 disponibilidades de N: N0, N70, N140 y N210 (kg N ha⁻¹). RMSE: raíz del cuadrado medio del error, %E: porcentaje de error respecto al promedio observado.....96

Figura Anexo 2. Probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un valor de rendimiento de maíz (a, c, e, g) o respuesta a N (b, d, f, h) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg N ha⁻¹) y 4 ZM del Lote 1 a y b) ZM1L1, c y d) ZM2L1, e y f) ZM3L1 y g y h) ZM4L1.....97

Figura Anexo 3. Probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un valor un valor de rendimiento de maíz (a, c, e) o respuesta a N (b, d, f) en simulaciones realizadas para un periodo de 42 años (1971-2013) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha⁻¹) y 3 ZM del Lote 2. a y b) ZM1L2, c y d) ZM2L2 y e y f) Z3L2.....98

ABREVIATURAS

C_{AN}	Co-limitación de agua y N
C_{WN}	Nitrogen and water co-limitation
ETC	Evapotranspiración del cultivo (mm)
ETP	Evapotranspiración potencial (mm)
EUA	Eficiencia de uso de agua (kg mm ⁻¹)
EUA_b	Eficiencia de uso de agua en biomasa (kg MS mm ⁻¹)
EUA_g	Eficiencia de uso de agua en grano (kg grano mm ⁻¹)
EUN	Eficiencia de uso de N (kg kg ⁻¹)
EUN_d	Eficiencia de uso del N _d (kg kg ⁻¹)
EUN_{ab}	Eficiencia de uso de N en biomasa (kg MS kg ⁻¹)
EUN_{dg}	Eficiencia de uso de N en grano (kg grano kg ⁻¹)
EUN_f	Eficiencia de uso de N del fertilizante (kg kg ⁻¹)
L_A	Limitación de agua
L_N	Limitación de N
MO	Materia orgánica del suelo (%)
M_{AN}	Limitación máxima de agua y N
N_{acum}	Nitrógeno total acumulado en el cultivo (Kg N kg ⁻¹)
N_d	Nitrógeno disponible en el suelo (N-NO ₃ kg ha ⁻¹ hasta los 60 cm)
N_g	Nitrógeno acumulado en el grano (kg N kg grano ⁻¹)
N_i	Nitrógeno inicial (N-NO ₃ kg ha ⁻¹ hasta los 60 cm)
N_{min}	Nitrógeno mineralizado (N-NO ₃ kg ha ⁻¹ hasta los 60 cm)
NUE	Nitrogen use efficiency (kg kg ⁻¹)
PAR	Radiación fotosintéticamente activa (Mj.m ⁻² .día ⁻¹)
T_{AN}	Limitación total de agua y N
WUE	Water use efficiency (kg mm ⁻¹)
ZM	Zona de manejo
ZM1L1	Zona de manejo 1 Lote 1
ZM2L1	Zona de manejo 2 Lote 1
ZM3L1	Zona de manejo 3 Lote 1
ZM4L1	Zona de manejo 4 Lote 1
ZM1L2	Zona de manejo 1 Lote 2
ZM2L2	Zona de manejo 2 Lote 2
ZM3L2	Zona de manejo 3 Lote 2

RESUMEN

Variabilidad espacial de la co-limitación de agua y nitrógeno, efecto sobre la eficiencia de uso de agua y nitrógeno en maíz

El rendimiento en grano del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) se encuentra principalmente limitado por agua y nitrógeno (N), presentando la oferta de ambos recursos una importante variabilidad espacial y temporal. Debido a esto, sería esperable la existencia de co-limitaciones de agua y N (C_{AN}) que generarían variaciones intra-lote en la eficiencia de uso de agua (EUA) y del N (EUN). El objetivo de esta tesis fue evaluar el efecto de la variabilidad espacial y temporal de la co-limitación de agua y N sobre la EUA y EUN en el cultivo de maíz en lotes de producción en dos campañas agrícolas consecutivas. Se realizaron ensayos de fertilización nitrogenada por zonas de manejo (ZM) para evaluar la variabilidad espacial en dos lotes de producción (Lote 1 en campaña 2011/12 y Lote 2 en campaña 2012/13) y simulaciones de largo plazo para estudiar la variabilidad temporal de la C_{AN} y su efecto sobre la EUA y la EUN. La EUA y EUN se asociaron estrechamente con la C_{AN} , aunque la EUA resultó más sensible a los cambios en la C_{AN} . Sin embargo, la relación entre la EUA y EUN con la C_{AN} , difirió entre los Lotes evaluados. En el Lote 1 el aumento de la C_{AN} generó aumentos en EUN y disminuciones en EUA, mientras que en el Lote 2 ocurrió lo opuesto. Los niveles de C_{AN} variaron espacial y temporalmente, y se incrementaron con el aumento de la dosis de N. De acuerdo con esto, la C_{AN} puede manejarse a través de la fertilización, sin embargo la dosis a la cual se obtiene la máxima co-limitación varió de acuerdo al lote considerado y a la ZM. La relación encontrada entre EUA y C_{AN} resultó más estable en el tiempo que la relación entre la EUN y la C_{AN} , esta relación podría utilizarse para realizar prescripciones de N por ZM de acuerdo con la disponibilidad de agua al inicio el cultivo.

Palabras clave: eficiencia de uso de agua, eficiencia de uso de N, co-limitación, limitación de agua, limitación de N, zonas de manejo, variabilidad espacial, variabilidad temporal.

ABSTRACT

Effect of Water and Nitrogen co-limitation spatial variability on Water use efficiency and Nitrogen use efficiency

Maize (*Zea mays* L.) grain yield is mainly constrained by water and nitrogen (N), which show a wide spatio-temporal variability. Then, a co-limitation of water and N (C_{WN}) may be anticipated, which may generate WUE and NUE variations. The aim of this thesis was to evaluate the C_{WN} spatial and temporal variability effect on maize WUE and NUE in production fields during two consecutive growing seasons. We carried-out two by management zone (MZ) nitrogen fertilization experiment in two production fields (Field 1 in season 2011/12 and Field 2 in season 2012/13) to evaluate spatial variability of C_{WN} on WUE and NUE. Also, a long term simulation model was used to assess C_{WN} temporal variability effect of C_{WN} on WUE and NUE. These two efficiencies were closely related with C_{WN} . The WUE was more sensitive to changes in C_{WN} than NUE. The relationships between both, WUE and NUE, with C_{WN} were different between fields; in Field 1 there was a positive relationship between C_{WN} and NUE but negative between C_{WN} and WUE, while the opposite occurred in Field 2. The C_{WN} levels varied spatially and temporally, although increase with N rate. Accordingly, C_{WN} would be agronomically managed through fertilization, however required N rate to reach maximum C_{WN} differed among fields and MZ. The relationship between C_{WN} and WUE was more stable across years than the relationship between C_{WN} and NUE, as a consequence it could be used to prescribe N by MZ taking into account initial soil water availability.

Key words: water use efficiency, nitrogen use efficiency, co-limitation, water limitation, nitrogen limitation, management zones, temporal variability.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El rendimiento en grano de los cultivos depende de la disponibilidad de recursos (oferta de radiación, agua y nutrientes), la habilidad para capturar estos recursos (eficiencia de captura), la eficiencia de utilización de los mismos para el crecimiento y la partición del crecimiento hacia los destinos reproductivos (Hunt et al., 1990). En el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), el agua y el nitrógeno (N) son los recursos que principalmente limitan el rendimiento en grano en la región Pampeana (e.g. Otegui et al., 1995; Andrade et al., 1996; Caviglia y Melchiori, 2011; Maddonni, 2012; Teixeira et al., 2014).

1.1.1. Variabilidad espacial de la disponibilidad de agua y nitrógeno en el suelo

El agua y el N disponible en el suelo presentan variaciones espaciales dentro de los lotes de producción que se asocian principalmente a diferencias en las propiedades físico químicas del suelo, la topografía, el clima y factores de manejo agronómico (Mamo et al., 2003; Basso et al., 2001), lo que origina complejas interacciones que determinan variaciones espaciales en el crecimiento de los cultivos, generando en consecuencia, cambios en la captura y eficiencia de uso de estos recursos.

El manejo tradicional uniforme de los insumos en un mismo lote de producción, donde no se considera la posible existencia de variabilidad espacial en la disponibilidad de los recursos, puede generar impactos negativos en términos ambientales y económicos (Pierce y Nowak, 1999). La aplicación de dosis de fertilización con N uniformes, donde los requerimientos de un cultivo y la disponibilidad del nutriente varían espacialmente, genera desajustes entre la oferta y las necesidades del cultivo (Huggins y Pan, 1993).

La agricultura de precisión es la aplicación de principios y tecnologías para el manejo de la variabilidad espacial y temporal, con el objetivo de mejorar el rendimiento del cultivo y la calidad ambiental, el éxito del manejo preciso está determinado por el grado en que la variabilidad espacial es temporalmente estable (Pierce and Nowak, 1999).

Una de las alternativas existentes para el manejo de la variabilidad espacial es la delimitación de zonas de manejo (ZM), las que consisten en subregiones dentro de los lotes que expresan una combinación relativamente homogénea de factores determinantes del rendimiento y para las que es apropiada una proporción única de insumos (Doerge, 1999).

Existen varios enfoques para delinear ZM, entre ellos, Franzen et al. (2002) sugirieron que sería razonable usar la topografía para definir zonas homogéneas en campos agrícolas, mientras que Johnson et al. (2003) usaron mediciones de la conductividad eléctrica aparente para delinear ZM en maíz, ya que ésta permite caracterizar la variabilidad espacial de propiedades de suelo como el contenido de agua, la salinidad y el contenido de arcilla (Corwin et al., 2006; Moral et al., 2011; Peralta et al., 2013; Córdoba et al., 2013). Relevamientos detallados de suelo, han permitido identificar el grado de erosión y la asociada baja fertilidad físico-química, como las características que más claramente permiten diferenciar zonas por su productividad potencial (Timlin et al., 1998).

Por otra parte, cada zona debe mostrar diferente respuesta del cultivo a los fertilizantes y a otros insumos, y estas respuestas necesitan ser confiablemente estimadas antes de tomar decisiones de manejo (Miao et al., 2006).

En sistemas de producción en secano, la disponibilidad de agua para el cultivo depende principalmente de las precipitaciones efectivas durante el ciclo y del agua

almacenada en el suelo previo a la siembra. La precipitación efectiva es aquella parte de la lluvia que queda almacenada en la zona de raíces y puede ser usada por los cultivos, no incluye escurrimiento ni la percolación de agua fuera de la zona de raíces (USDA, 1993). Así, la precipitación efectiva se ve afectada por las características de las lluvias (cantidad, frecuencia, intensidad), la textura del suelo, la estructura y la profundidad de la zona de raíces (Brouwer y Heibloem, 1986).

La capacidad de un suelo de almacenar agua varía de acuerdo a propiedades como la textura, el contenido de materia orgánica, el estado estructural y la profundidad del perfil (Jamison y Kroth, 1957). Estas propiedades varían espacialmente, no sólo por las diferencias en el tipo de suelo, sino también por efecto de la erosión hídrica, que reduce la profundidad del perfil, a la vez que incrementa la generación de pérdidas por escurrimiento debido a la reducción en la capacidad de infiltración generalmente asociada al deterioro de la agregación y/o exposición de las capas de textura más fina (Frye et al., 1982; Verity y Anderson, 1990; Gachene et al., 1997; Chagas y Grottoola, 1994; Michelena et al., 1989).

Ante una determinada oferta de agua, la eficiencia en el uso del agua (EUA) es la relación entre la acumulación de biomasa, expresada como biomasa total del cultivo (EUA_b) o rendimiento en grano (EUA_g), y el agua consumida por el cultivo, expresada como evapotranspiración (ETC) (Sinclair et al., 1984).

Las prácticas de manejo que tienden a aumentar la proporción de agua transpirada por el cultivo, en detrimento de la pérdida por evaporación del suelo, producen aumentos en la EUA (Sinclair et al., 1984) debido a que la transpiración está directamente ligada a la fotosíntesis, y por consiguiente al rendimiento del cultivo (Dardanelli et al., 2003). La nutrición adecuada puede mejorar la EUA (DiPaolo y Rinaldi, 2008), aunque aún en cultivos bien nutridos puede existir una alta evaporación de agua desde el suelo (Caviglia y Sadras, 2001; Sadras et al., 2011). La fertilización nitrogenada uniforme en lotes donde las necesidades de un cultivo varían, podría aumentar variaciones espaciales en la EUA por no tener en cuenta la variabilidad en los requerimientos de N, así podría generar aumentos de la EUA en las zonas que resulten fertilizadas en exceso y disminuciones en las que la fertilización sea deficitaria.

La disponibilidad de N durante el ciclo del cultivo de maíz, varía de acuerdo al contenido inicial de N en el suelo, las vías de ganancia como la mineralización neta durante la estación de crecimiento y los aportes por fertilización. Se ha informado que más del 60% del N del suelo puede perderse (Kant et al., 2011; Raun y Johnson, 1999), y estas pérdidas se deben a una combinación de volatilización, denitrificación, escurrimiento, lixiviación y consumo de los microorganismos (i.e. inmovilización).

La disponibilidad de N varía espacialmente en diferentes posiciones en el paisaje (Jowkin y Schoenau, 1998; Dharmakeerthi et al., 2005; Muschetti Piana, 2012), principalmente debido a variaciones en la mineralización neta (Robertson et al., 1993; Zak et al., 1990), la que es afectada por el contenido de materia orgánica (MO), textura, contenido de agua, estructura del suelo, temperatura, pH y relación C/N de los residuos.

En la provincia de Entre Ríos los suelos presentan una variabilidad potencialmente alta, por sus características geológicas y geomorfológicas, lo que se ve reflejado en la heterogeneidad de los tipos de suelos, la topografía y la dinámica del agua en ambientes ondulados (Melchiori, 2007). En estos ambientes, los efectos de la erosión hídrica generan variaciones en el suelo, debido a que el escurrimiento superficial disminuye la MO en las zonas más susceptibles y aumenta en las más bajas por acumulación. Por otro lado, el movimiento del rastrojo ocasionado por el escurrimiento superficial de agua aumenta la temperatura del suelo en las partes donde éste queda descubierto, generando cambios

espaciales no sólo en la capacidad de almacenar agua, sino también en la oferta de N (Urricarriet y Lavado, 1999).

La eficiencia de uso de N (EUN), es la relación entre la acumulación de biomasa, expresada como biomasa total del cultivo (EUN_b) o rendimiento en grano (EUN_g), y el N disponible en el suelo para el cultivo durante su ciclo de crecimiento (Huggins y Pan, 1993). La EUN depende principalmente de la disponibilidad total de N para el cultivo (N fertilizante + N suelo) (Lemaire y Gastal, 2009), alcanzando valores a nivel mundial de sólo un 33% (Raun y Johnson, 1999). Las principales causas de la baja EUN son las pérdidas de N del sistema (volatilización, denitrificación, escurrimiento, lixiviación, inmovilización) (Raun y Schepers, 2008), la falta de sincronía entre la demanda del cultivo y el aporte de N desde el suelo (Shanahan et al., 2008; Cassman et al., 2002), las aplicaciones uniformes de N en lotes con variabilidad espacial (Schmidt et al., 2007) y la influencia de las condiciones ambientales durante la estación de crecimiento sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo (Hatfield y Prueger, 2004). Entre las alternativas de manejo que existen para aumentar la EUN, se encuentran las aplicaciones divididas de N sincronizando la oferta con el momento de mayor demanda del cultivo (Raun y Johnson, 1999) y el uso de dosis variables según los requerimientos de cada zona o sitio específico.

Existen antecedentes sobre los efectos conjuntos de la disponibilidad de agua y del N sobre el rendimiento en varios cultivos (Gregory et al., 1997; Nielsen y Halvorson, 1991; Kallsen et al., 1984) así como también sobre las eficiencias de uso de estos recursos (Bolton, 1981; Ping et al., 2008). En la última década ha sido documentado el impacto individual de la variabilidad espacial de la disponibilidad de agua (Sadler et al., 2000a; Júnior et al., 2005; Nasetto, 2009) y del N (Khosla et al., 2002; Washmon, 2002; Everett y Pierce, 1996; Jin y Jiang, 2002) sobre el rendimiento o las eficiencias, pero son menos frecuentes los estudios que consideran la variación espacial de ambos recursos sobre la eficiencia de uso de los mismos. Resulta llamativa la falta de información al respecto, ya que el crecimiento de un cultivo está comúnmente limitado por varios recursos simultáneamente (Sinclair y Park, 1993).

1.1.2. Co-limitación de recursos

El crecimiento y rendimiento de un cultivo puede estar positivamente relacionado con el grado de co-limitación de recursos, ya que un cultivo puede maximizar su crecimiento cuando diferentes recursos lo limitan similarmente, más que cuando el crecimiento es severamente limitado por un único factor (Bloom et al., 1985). La co-limitación es un concepto relacionado a la existencia de estreses múltiples, y determina una proporción significativa de la diferencia entre los rendimientos alcanzados y los máximos rendimientos (i.e. brecha de rendimiento; Sadras, 2004). La respuesta de los cultivos a deficiencias de múltiples nutrientes, es una evidencia de la presencia de co-limitación de factores en los sistemas agrícolas (Kho, 2000). La respuesta a múltiples nutrientes o recursos ha sido evaluada en diversos trabajos como lo hicieron Doberman et al. (1998), quienes reportaron que el rendimiento de arroz se incrementa con el agregado de PKS, pero no responde a combinaciones como P, PK o KS. Craine et al. (2008) estudiaron la co-limitación de N y P en pastizales de Sudáfrica, y determinaron que la adición por separado de N o P no generó incrementos significativos de la biomasa a diferencia de la adición conjunta de N y P que produjo un 50% de aumento en la biomasa producida. En investigaciones anteriores, Sadras (2005) informó que el rendimiento de trigo (*Triticum aestivum* L.) está positivamente asociado con la co-limitación de agua y N (C_{AN}).

Se han utilizado diferentes enfoques metodológicos para estimar la C_{AN} en diferentes cultivos. Sadras (2005) calculó la C_{AN} en trigo a través de los índices de estrés

de agua y N estimados con modelos de simulación agronómica. A diferencia de este, Cossani et al. (2010) estimaron los índices de estrés fijando arbitrariamente rendimientos potenciales, consumo de agua y absorción de N y estudiaron la C_{AN} a partir de la captura de un recurso, i.e. agua o N, en parcelas que están co-limitadas tanto por agua como por N.

A nivel de lote de producción, las variaciones temporales y espaciales de la disponibilidad de agua y N generan limitaciones de agua y N también variables, por lo que sería esperable la existencia de variaciones espaciales de las co-limitaciones que generarían cambios en la eficiencia de uso de agua y del N.

El incremento en la disponibilidad de N conduce generalmente a una disminución en la EUN, debido a que la absorción de N continúa aun cuando se alcanza el máximo rendimiento (Lemaire y Gastal, 2009). En contraste, la EUA responde positivamente a la oferta de N (Cassman et al., 2002; Sadras, 2007) hasta alcanzar un valor máximo, que sería coincidente con la disponibilidad de N con la que se logra el máximo rendimiento. Kim et al. (2008) analizaron la EUA y EUN de maíz con diferentes niveles de riego y dosis de N, y encontraron que el impacto del N sobre la EUA es mayor que el impacto del agua sobre la EUN, obteniendo incrementos de 31% en la EUA por fertilización y sólo de 9% en la EUN por riego. Esto sugiere que la EUA resultaría más sensible a la co-limitación que la EUN.

Debido a que existe variabilidad espacial y temporal en la disponibilidad de agua y N, y a las dispares respuestas de la EUN y EUA a la disponibilidad de recursos, es un objetivo relevante determinar en diferentes ZM el nivel de disponibilidad de N al cual se maximiza la EUA con una mínima reducción en la EUN, evitando impactos negativos en el ambiente y mejorando el beneficio económico.

1.1.3. Variabilidad temporal de los recursos

Si bien el uso de ZM para la caracterización espacial de las propiedades del suelo y el cultivo es importante para el manejo sitio específico, considerar los efectos temporales de la variabilidad climática en la expresión de la variación espacial de los cultivos, es considerado de similar importancia (Schepers et al., 2004).

La variabilidad espacial del suelo puede influenciar el rendimiento, los requerimientos de N, la mineralización de N, el N disponible en el suelo y el agua disponible para el cultivo, mientras que la variabilidad temporal puede influenciar la expresión de la variabilidad espacial (Mamo et al., 2003) y la respuesta del cultivo a las prácticas de manejo. Eghball y Varvel (1997) y Lamb et al. (1997) encontraron que en condiciones de secano la variabilidad temporal del rendimiento del cultivo de maíz fue más dominante que la variabilidad espacial, indicando que los patrones espaciales del rendimiento se ven afectados por las variaciones climáticas interanuales. En otros estudios, Schepers et al. (2004) informaron que la variabilidad espacial del rendimiento de maíz estuvo más fuertemente relacionada a las ZM en años de precipitaciones medias, comparados con años secos o húmedos.

Debido a que los antecedentes no son concluyentes y al hecho de que el rendimiento del cultivo depende de complejas interacciones temporales (Batchelor et al., 2002) entre propiedades del suelo, condiciones ambientales, y prácticas de manejo del N, el efecto de la C_{AN} sobre la EUA y la EUN requerirían numerosos experimentos de campo realizados a largo plazo. Los modelos de simulación, pueden utilizarse para evaluar los efectos de la variabilidad temporal (O'Neal et al., 2002; Batchelor et al., 2002; Basso et al., 2010) de diferentes estrategias de manejo sobre la disponibilidad de agua (Sadler et al., 2000a; Oliver et al., 2010) y de N (Basso et al., 2011; Di Paolo y Rinaldi, 2008), así como de sus interacciones temporales sobre la eficiencia de uso de los recursos (Rinaldi, 2004). El uso de modelos de simulación de cultivos para simular la variabilidad espacial y temporal de la

eficiencia de uso de agua y nitrógeno y el efecto que tiene la co-limitación de agua y N sobre estas eficiencias, aportaría información valiosa para el manejo de la fertilización nitrogenada por ZM permitiendo determinar una combinación óptima de las eficiencias de uso de agua y nitrógeno.

1.2. Hipótesis

- 1.2.1 En un lote de producción de maíz existe variabilidad espacial en el grado de co-limitación por los recursos agua y N.
- 1.2.2 La EUA resulta más sensible que la EUN al grado de co-limitación de agua y N.
- 1.2.3 Empleando modelos de simulación es posible determinar por ZM un grado de co-limitación de agua y N que permite maximizar la EUA con una mínima reducción en la EUN.

1.3. Objetivos

- 1.3.1. Evaluar la variación espacial de la disponibilidad de agua y de nitrógeno, y las EUA y EUN del cultivo de maíz en lotes de producción.
- 1.3.2. Estudiar la relación entre el grado de co-limitación de agua y N y la EUA y EUN en lotes de producción de maíz en secano.
- 1.3.3. Estimar mediante simulaciones de largo plazo, el impacto del manejo de la fertilización con N sobre el grado de co-limitación y las EUA y EUN en ZM delimitadas en dos lotes de producción.

1.4. Estructura del trabajo de tesis

En el presente trabajo se analizó la variabilidad espacial de la co-limitación de agua y N, y su efecto sobre la eficiencia de uso de estos recursos en maíz. Para cumplir con los objetivos planteados se realizaron experimentos de campo a nivel de lote, y se calibró y validó un modelo de simulación para estimar la variabilidad espacial y temporal del rendimiento y la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada. La estructura de la tesis comprende 6 capítulos. En el Capítulo 1 se presenta la introducción al problema, y en el Capítulo 2 se describe la metodología empleada. Los resultados se encuentran organizados en 3 capítulos. En el Capítulo 3 se incluyen los resultados de la evaluación de la disponibilidad, captura y la eficiencia de uso del N y del agua por ZM. En el Capítulo 4 se presenta la cuantificación de la C_{AN} por ZM, y el efecto de ésta sobre el rendimiento, la EUN y la EUA en el cultivo de maíz para poner a prueba las hipótesis 1 y 2. En el Capítulo 5 se analiza la variabilidad espacio-temporal de la C_{AN} , a través del uso del modelo de simulación SALUS, evaluando distintas estrategias de manejo de fertilización nitrogenada para la optimización de las eficiencias de uso de estos recursos por ZM (poniendo a prueba la hipótesis 3). Finalmente, en el Capítulo 6 se presenta una integración de los resultados en una discusión general, destacando el alcance de los mismos y las futuras líneas de investigación surgidas a partir de esta tesis.

CAPITULO 2

DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS DE MANEJO, DISEÑO EXPERIMENTAL Y CONDICIONES AMBIENTALES

2.1. Sitios de estudio

Se realizaron dos ensayos en lotes ubicados en el campo experimental de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (31° 50' S; 60° 31' O; 110 m.s.n.m) (Figura 2.1.1) durante las campañas 2011/12 (Lote 1) y 2012/13 (Lote 2). El clima de la región se caracteriza por una temperatura media anual de 18.3 °C, que varía mensualmente entre 12.8 y 23.8 °C. La precipitación media anual es de 1025 mm y durante la estación de crecimiento del cultivo de maíz (desde septiembre a marzo), desde septiembre a marzo las lluvias promedian 770 mm.

Durante la campaña 2011/12 el ensayo se realizó en un lote de 14 ha (Lote1, Figura 2.1.1a), sobre un suelo clasificado como Argiudol ácuico de la Serie Tezanos Pinto (Barneveld, 1972) perteneciente a la familia fina, mixta, térmica (Soil Survey Staff, 2010), con diferentes grados de erosión. En la campaña 2012/13 el ensayo se llevó a cabo en un lote de 12 ha del campo anexo de la experimental Paraná del INTA (Lote 2, Figura 2.1.1b), en el que predominan tres tipos de suelos Argiudol vértico de la Serie la Jaula (Barneveld, 1972) perteneciente a la familia fina, montmorillonítica, térmica (Soil Survey Staff, 2010); un Argiudol ácuico de la Serie Campo Anexo (Barneveld, 1972) perteneciente a la familia arcillosa fina, mixta, neutra térmica (Soil Survey Staff, 2010), y un Argiudol ácuico de la Serie Oro Verde (Plan Mapa de Suelos, 1998) perteneciente a la familia fina, mixta, térmica (Soil Survey Staff, 2010). Ambos lotes han sido cultivados con una rotación trigo/soja maíz bajo siembra directa desde 1995. La carta de suelos de la EEA Paraná del INTA está realizada a una escala 1:5.000, y el grado de erosión de las series de suelos se determinó de acuerdo por lo descripto en las Normas de reconocimiento de suelos (Etchevehere, 1998). Los grados de erosión determinados en los lotes evaluados estuvieron representados por: h0, sin erosión hídrica; h1, erosión hídrica ligera, pérdida <25% espesor del horizonte superficial; h2, erosión hídrica moderada, pérdida entre 25 y 50% del horizonte superficial; h3, erosión hídrica severa, pérdida de más de 50% del horizonte superficial; y hx, deposición o acumulación de materiales provenientes de la erosión.

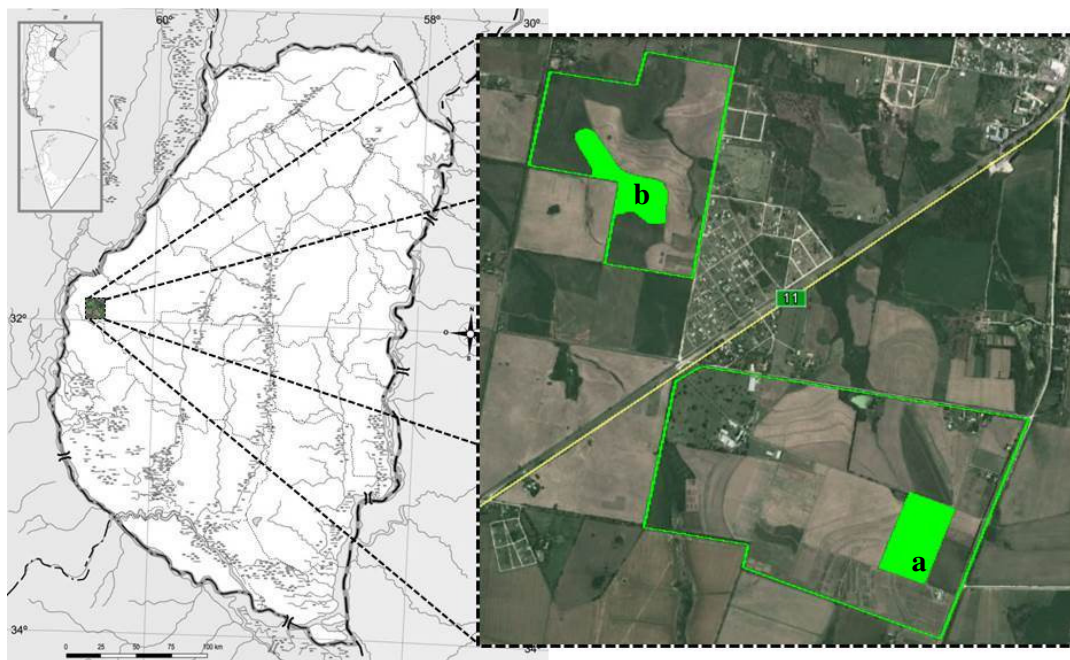


Figura 2.1.1. Ubicación del campo experimental de la Estación Experimental Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria ($31^{\circ} 50' S$; $60^{\circ} 31' O$; 110 m.s.n.m) en la Provincia de Entre Ríos y de los lotes utilizados para la realización de los ensayos de fertilización nitrogenada en maíz en el a) Lote 1 y b) Lote 2. El rectángulo superior indica la ubicación del área de estudio dentro de Argentina.

2.2. Delimitación de zonas de manejo

Se utilizó información disponible de los contenidos de materia orgánica (MO), la conductividad eléctrica (CE) y la elevación para delimitar ZM, utilizando el software Management Zone Analyst (Mizzou-ARS 2000) (Figura 2.2.2). Es un software que permite la delimitación de zonas de manejo a partir de información espacial cuantitativa de campo. Brevemente, MZA permite realizar una clasificación difusa no supervisada, comparando todas las observaciones entre sí y agrupando las observaciones similares en grupos o zonas, basados en los parámetros de clasificación y número de zonas máximas que el usuario especifica (Fridgen et al. 2004). La clasificación es no supervisada porque no se necesita información previa de las variables de clasificación generando agrupaciones naturales de los datos, y es difusa debido a que un mismo dato puede pertenecer a diferentes grupos. El software calcula dos índices (NCE, tasa normal de entropía y FPI, índice de rendimiento) para orientar al usuario en el número óptimo de zonas de manejo.

La MO fue muestreada con una grilla regular de 30 x 30 m. Se extrajeron muestras compuestas de 10-15 sub-muestras en un área de aproximadamente 2 m de diámetro alrededor de cada punto de la grilla, usando un calador de 2 cm de diámetro hasta una profundidad de 20 cm. Cada punto de la grilla se geo-referenció usando un GPS (eTrex Legend, Garmin International Inc., Olathe, KS, USA). Las muestras de suelo se secaron al aire y se tamizaron por una malla de 2 mm, el C orgánico se midió utilizando un auto-analizador LECO modelo TRU SPEC (Leco Corp. St. Joseph, MI, USA), la MO se estimó a partir del C usando un factor de 1.72. La CE a 30 cm de profundidad del suelo se determinó usando la rastra Veris 3100 (Veris 3100, Division of Geoprove Systems, Salina, KS).

Los mapas de MO, CE y elevación se interpolaron, utilizando el método de distancia inversa ponderada, a una grilla común de 5x5m en el software AFS (AFS, 2000) (Figura 2.2.1a-d). Los datos espaciales se exportaron como archivos de texto (.csv) para su utilización conjunta en el software MZA. El archivo .csv generado con AFS contiene la información de MO, CE y elevación con las correspondientes coordenadas.

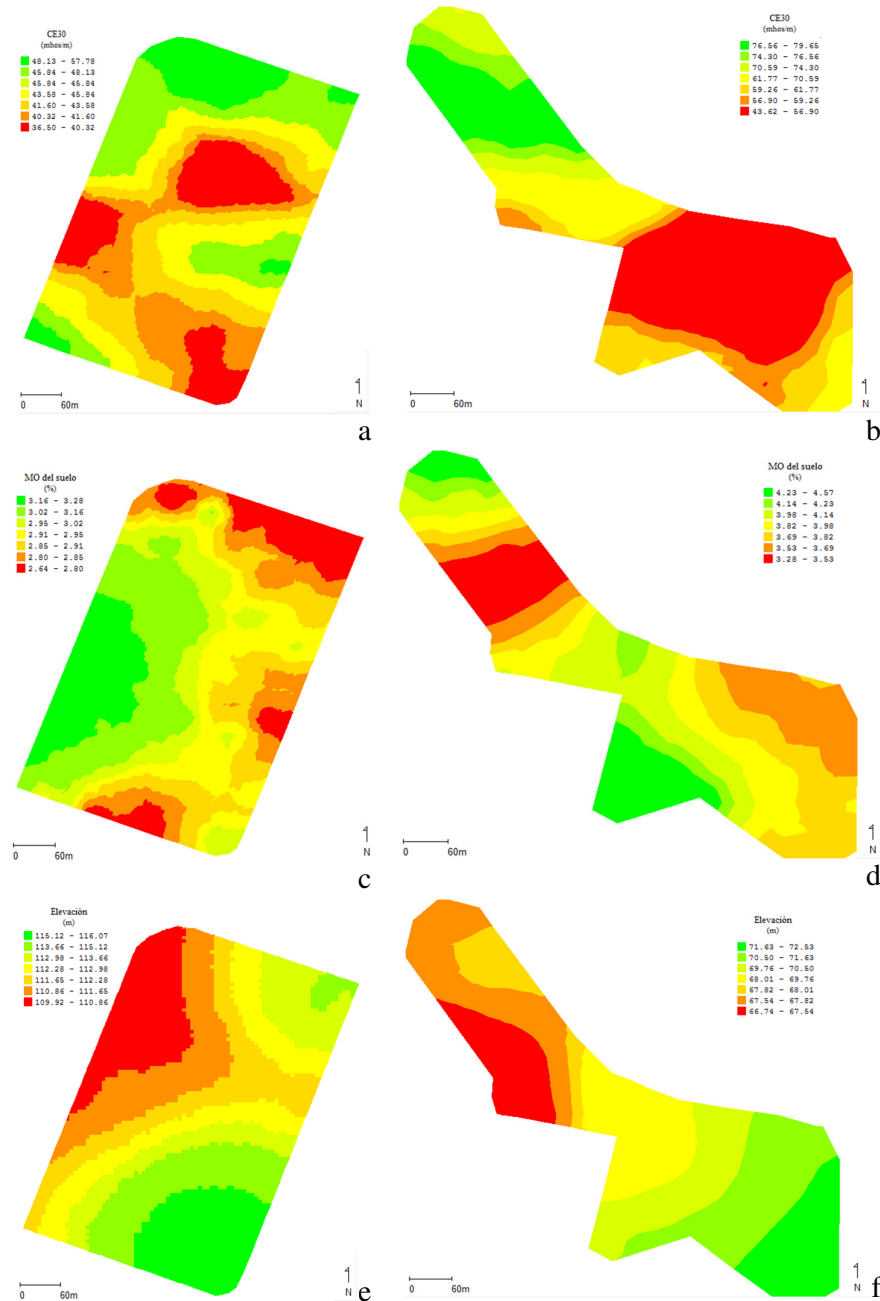


Figura 2.2.2. Mapas interpolados a una grilla de 5x5m de las variables utilizadas para la delimitación de zonas de manejo en el Lote 1 (a, c, e) y Lote 2 (b, d, f). a y b: CE (mhos m^{-2}); c y d: MO (%) y e y f: altimetría (m).

En el Lote 1 se identificaron cuatro ZM: Zona 1 (ZM1L1), posición topográfica de media loma, erosión h1 y 2.89%MO; Zona2 (ZM2L1), posición topográfica de media loma,

erosión h0 y 3.17%MO; Zona 3 (ZM3L1); posición topográfica de loma, erosión h3 y 2.83%MO; y Zona 4 (ZM4L1), posición topográfica baja, hx (horizontes de acumulación de suelo) y 2.97%MO (Tabla 2.2.1).

En el Lote 2 se identificaron tres zonas de manejo: Zona 1 (ZM1L2), posición topográfica baja, erosión h0 y 4.5 %MO; Zona 2 (ZM2L2) posición topográfica media, erosión h0 y 3.8 %MO; y Zona 3 (ZM3L2), posición topográfica de media loma, erosión h1 y 3.6 %MO (Tabla 2.2.1).

Tabla 2.2.1 Valores medios de materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE) y altura media por zona de manejo para el Lote 1 y Lote 2. Grados de erosión: h0, sin erosión hídrica; h1, erosión hídrica ligera, pérdida <25% espesor del horizonte superficial; h2, erosión hídrica moderada, pérdida entre 25 y 50% del horizonte superficial; h3, erosión hídrica severa, pérdida de más de 50% del horizonte superficial; hx, deposición o acumulación de materiales provenientes de la erosión.

Año	Zona	MO (%)	CE (mhos/m)	Altura media (msnm)	Grado de Erosión
Lote 1	ZM1L1	2.89	43.5	114	h1
	ZM2L1	3.17	43.4	111	h0
	ZM3L1	2.83	48.7	112	h3
	ZM4L1	2.97	40.7	110	hx
Lote 2	ZM1L2	4.40	59	71	h0
	ZM2L2	3.84	48	70	h0
	ZM3L2	3.70	75	68	h1

2.3. Oferta de N y evapotranspiración de los cultivos

En los dos lotes evaluados se realizaron muestreos de suelo dirigidos por ZM a la siembra y madurez fisiológica del cultivo de maíz. Se tomaron muestras compuestas hasta los 60 cm de profundidad para la determinación del contenido de N-NO₃. Las muestras de suelo se secaron al aire, se molieron y tamizaron a un tamaño inferior a 2 mm. El contenido inicial de N de NO₃ en el suelo (Ni) se determinó por el método del ácido fenoldisulfónico (Bremner, 1965). El N disponible (Nd) para el cultivo durante el ciclo, se estimó como la sumatoria del Ni, el N aplicado como fertilizante y el N mineralizado durante el ciclo del cultivo (Nmin). El Nmin se estimó a partir del N acumulado en plantas de parcelas sin fertilizar hasta R6 (Ritchie et al., 1986) y la variación del contenido de nitratos en el suelo desde la siembra hasta R6, de acuerdo a lo propuesto por Meisinger (1984), quien considera que el cambio en el N del sistema es cero o aceptablemente pequeño.

En ambos lotes, y para estimar la evapotranspiración del cultivo se midió el contenido de humedad del suelo semanalmente desde la siembra del cultivo hasta la madurez fisiológica (R6, Ritchie et al., 1986) en cada una de las parcelas de cada ZM (Figura 2.4.1 y 2.4.2), utilizando una sonda de neutrones (Troxler, mod. 4300; Troxler Electronic Laboratories Inc., Research Triangle Park, NC, USA). Así, se midieron un total de 48 parcelas en el Lote 1 y 36 en el Lote 2. Las mediciones de humedad de suelo se realizaron en capas de 10 cm desde la superficie hasta 60 cm, y cada 20 cm hasta una profundidad de 160cm. Para realizar la calibración de la sonda de neutrones se realizaron muestreos de suelo para la determinación de la humedad gravimétrica en diferentes momentos del ciclo del cultivo a fin de tener un rango más amplio en las condiciones de humedad de suelo.

El contenido de agua útil del suelo se calculó como la sumatoria de la diferencia entre la humedad gravimétrica ($H_v \cdot \text{densidad aparente}$) por estrato y el punto de marchitez permanente (LL), multiplicado por el espesor del estrato. Las constantes hídricas fueron evaluadas en cada lote y ZM (Tabla Anexo 2).

2.4. Experimentos de fertilización nitrogenada

En cada lote y dentro de cada una de las ZM, se evaluaron 4 tratamientos con distintos niveles de disponibilidad de N, dispuestos en parcelas de 10 hileras de ancho y 20 m de largo con 3 repeticiones (Figura 2.4.1 y 2.4.2). Los tratamientos se analizaron con un diseño factorial de dos factores (ZM y N). En el Lote 1 con 4 niveles cada uno, y en el Lote 2 con tres niveles para la ZM y cuatro niveles de N. Los tratamientos incluyeron 4 niveles de N a la siembra: 70 kg N ha^{-1} (70N: $\text{Ni}_{(0-60\text{cm})} + \text{N fertilizante}$), 140 kg N ha^{-1} (140N: $\text{Ni}_{(0-60\text{cm})} + \text{N fertilizante}$), 210 kg N ha^{-1} (210N: $\text{Ni}_{(0-60\text{cm})} + \text{N fertilizante}$) y un testigo (N0) al que no se le aplicó N ($\text{N}=\text{Ni}$). Donde $\text{Ni}_{(0-60\text{cm})}$ es el contenido de N de nitratos previo a la siembra de cultivo (profundidad 0 a 60 cm). Adicionalmente, en cada Lote y en cada ZM evaluada se instalaron dos parcelas con riego por goteo en los tratamientos N0 y 210N.

En ambas campañas el híbrido utilizado fue Nidera AX882 HCLMG, implantado en siembra directa, con una densidad de $75000 \text{ plantas m}^{-2}$, en hileras distanciadas a 0.525m. Se realizó una fertilización fosfatada de 100 kg ha^{-1} de superfosfato triple de calcio, en la línea de siembra. Las fechas de siembra fueron el 20 de octubre y el 20 de septiembre, para las campañas 2011/2012 y 2012/13, respectivamente.

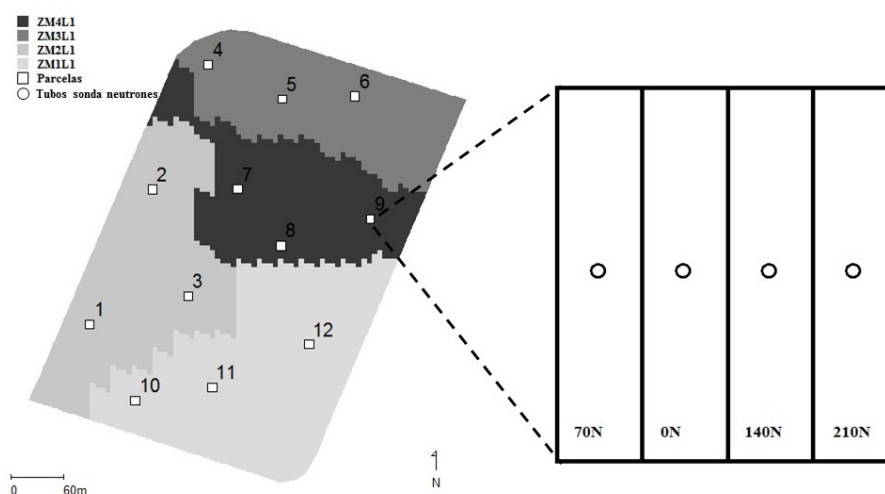


Figura 2.4.1. Zonas de manejo delimitadas en el Lote 1. Detalle de la disposición de las parcelas de los tratamientos de fertilización con N dentro de las ZM y ubicación de los tubos de acceso de la sonda de neutrones para la medición de humedad del suelo en cada parcela.

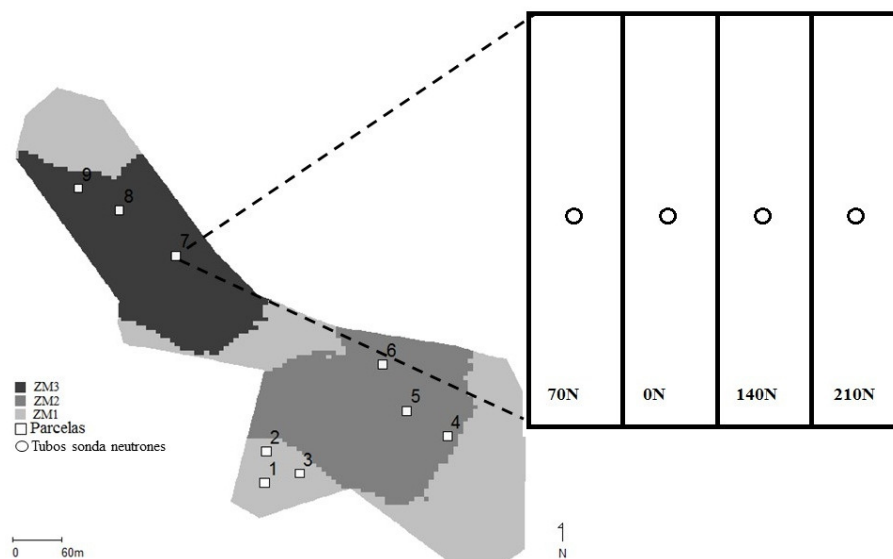


Figura 2.4.2. Zonas de manejo delimitadas en el Lote 2. Detalle de la disposición de las parcelas de los tratamientos de fertilización con N dentro de las ZM y ubicación de los tubos de acceso de la sonda de neutrones para la medición de humedad de suelo en cada parcela.

2.5. Condiciones ambientales, disponibilidad de N y agua

Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo en el Lote 1 fueron de 417 mm, un 25% menor que las precipitaciones históricas para el mismo período (Tabla 2.5.1). Durante el período de 30 días centrado en floración (27 de diciembre) las precipitaciones totalizaron 53 mm, representando sólo el 60% de la evapotranspiración potencial (ETP) del cultivo. El balance entre precipitaciones y ETP fue negativo en todos los meses (Figura 2.5.1a) pero con mayor intensidad durante los meses de diciembre y enero.

Tabla 2.5.1. Temperatura media diaria, radiación fotosintéticamente activa (PAR) media diaria, precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual (ETP), ocurridas durante dos estaciones de crecimiento del cultivo de maíz: campañas 2011/12 (Lote 1) y campaña 2012/13 (Lote 2). Se muestran los registros históricos (1971-2012).

Mes	Temperatura media °C			PAR MJ.m ⁻² .día ⁻¹		Precipitaciones mm			ETP mm			
	Lote 1		Promedio histórico	Lote 2		Promedio histórico	Lote 2		Promedio histórico	Lote 2		Promedio histórico
	1	2		1	2		1	2		1	2	
Sep	-	16.7	15.2	-	8.1	8.0	-	47	54	-	94	98
Oct	17.6	19.1	18.1	8.6	8.4	9.6	73	236	105	110	105	131
Nov	22.9	22.9	20.9	11.8	11.4	11.2	130	95	110	165	155	158
Dic	23.9	24.2	23.4	12.9	11.4	11.8	53	257	116	184	170	180
En	26.4	25.0	24.8	12.8	12.2	11.4	47	34	118	195	176	180
Feb	25.1	23.5	23.8	10.0	10.5	9.9	115	82	108	139	137	139
Total	23.2	23.0	21.0	11.2	10.8	10.3	417	750	611	792	839	886

Durante la segunda campaña (Lote 2), las precipitaciones durante el ciclo del cultivo totalizaron unos 750 mm, siendo un 23% mayor que las precipitaciones históricas para el mismo período (Tabla 2.5.1). Esto generó balances positivos, entre las precipitaciones y la

evapotranspiración, en tres de los seis meses de crecimiento del cultivo (Figura 2.5.1b) y que las precipitaciones durante el período centrado en floración (12 de diciembre) excedieran en 58% a la demanda de evapotranspiración del cultivo.

Las temperaturas de noviembre, diciembre, enero y febrero, estuvieron levemente por encima de la temperatura media histórica, así como el promedio. La radiación fotosintéticamente activa se ubicó dentro de los valores normales (Tabla 2.5.1), resultando levemente mayor a la histórica en los meses de Diciembre y Enero de la primera campaña y en el mes de Enero de la segunda campaña.

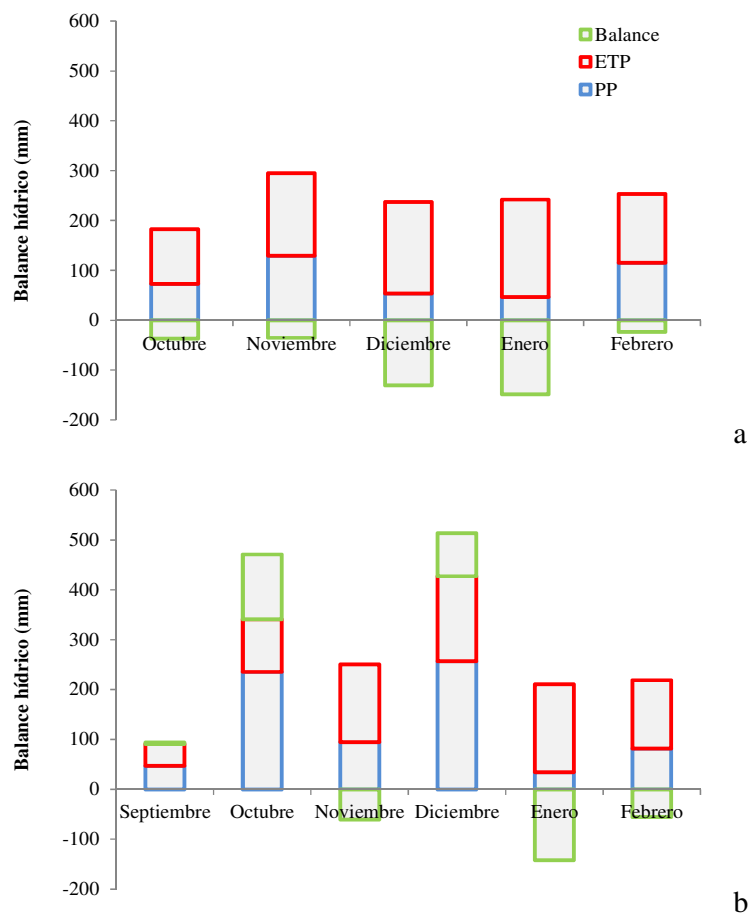
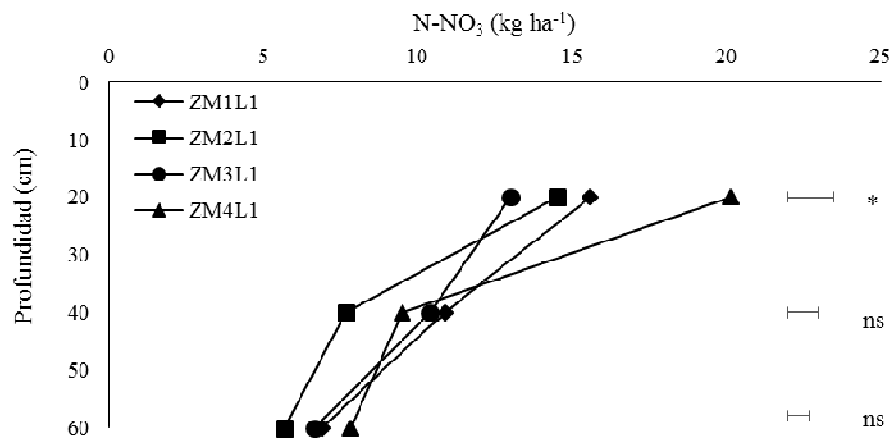
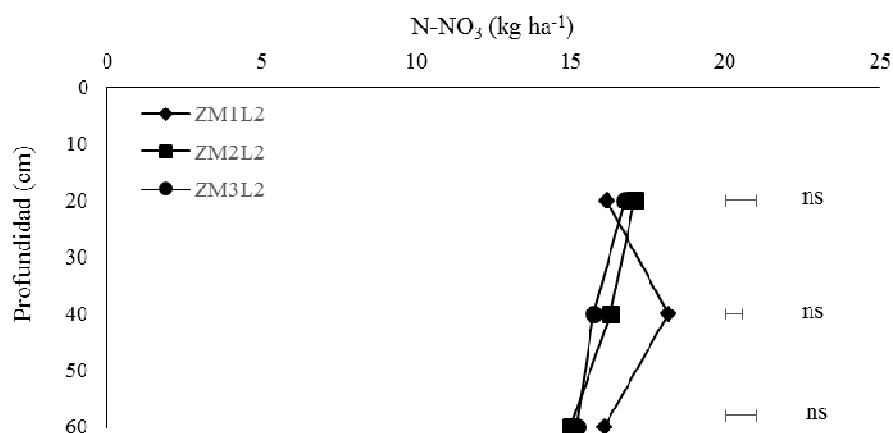


Figura 2.5.1. Balance hídrico mensual calculado como la diferencia entre las precipitaciones y las ETP mensuales ocurridas durante el período de crecimiento del cultivo de maíz, durante la primera a) y segunda campaña b).

En el Lote 1, el N_i varió entre ZM y profundidades ($p < 0.05$). Los valores iniciales de las ZM1L1, ZM2L1 y ZM3L1, resultaron similares (34, 29 y 31 kg N-NO₃ ha⁻¹, para ZM1L1, ZM2L1 y ZM3L1; respectivamente) e inferiores al de la ZM4L1 (39 kg N-NO₃ ha⁻¹). La distribución de N-NO₃ en el perfil de suelos fue similar entre ZM con un mayor contenido de N-NO₃ en el estrato superior y menores contenidos en los estratos inferiores, notándose una diferencia entre ZM en el estrato superior donde la ZM4L1 tuvo un contenido de N-NO₃ 40% superior al de las otras zonas (Figura 2.5.2a). El N aplicado como fertilizante sólo varió entre ZM entre un 2 y 12%, respecto a la dosis media para los tratamientos de N70 y N210, respectivamente, debido a la escasa magnitud de las diferencias en el N_i a la siembra del cultivo.



a



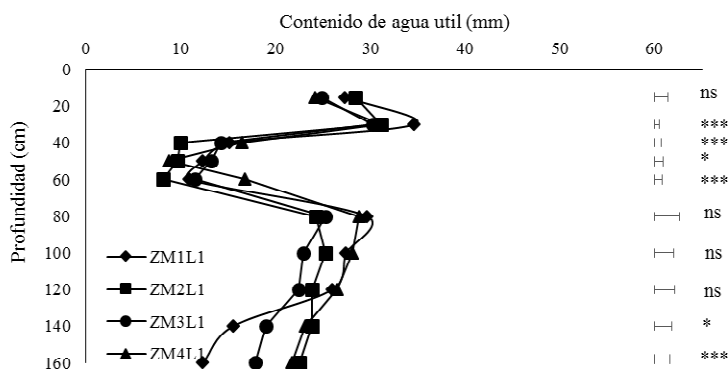
b

Figura 2.5.2. Contenido inicial de N-NO₃ en cada uno de los estratos (0-20cm) de suelo de las ZM del a) Lote 1 y b) Lote 2. La comparación de las medias entre las ZM para una misma profundidad de muestreo se realizó mediante un test de LSD (α : 0,05) y la significancia se indicó como ns; *, **, *** (no significativo, $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$, respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada profundidad de muestreo.

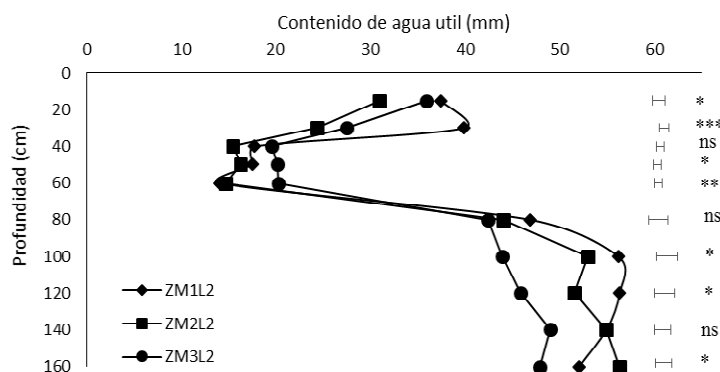
La disponibilidad inicial de N en el Lote 2 resultó superior a la del Lote 1, similar entre ZM y profundidades ($p > 0.05$). La distribución de N-NO₃ en el perfil del suelo de este lote fue similar entre ZM y más uniforme que en el Lote 1 (Figura 2.5.2b). Las escasas diferencias del Ni entre ZM generó dosis de fertilizante con escasa variación (2 y 14%) entre ZM.

El N mineralizado durante el período de crecimiento del cultivo (N_{min}) fue afectado significativamente por la ZM en ambos lotes. En el Lote 1, el N_{min} alcanzó valores de 97, 93, 72 y 108 kg N ha⁻¹ en la ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1 y ZM4L1, respectivamente. En la ZM4L1 se registró el mayor aporte de N por mineralización, superando entre un 10 y 34% al N_{min} de las otras zonas. En el Lote 2, se observaron diferencias significativas entre ZM, el N_{min} fue de 128, 51 y 62 kg N ha⁻¹, en la ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente. La variación en la dosis de N entre ZM alcanzó un valor promedio del 52%.

La disponibilidad inicial de agua mostró un patrón de distribución en profundidad similar entre ZM para ambos Lotes (Figura 2.5.3 a y b). En ambos lotes, se detectaron efectos significativos de la ZM y la profundidad sobre el contenido de agua útil del suelo ($p < 0.05$), así como una interacción significativa ZM x profundidad. En el Lote 1, no hubo diferencias en el contenido de agua entre ZM en los primeros 15cm de suelo. A partir de los 30 cm y hasta los 60cm hubo diferencias significativas en el contenido de agua, variando la ZM con mayor disponibilidad de agua. Entre 80 cm y 120 cm no hubo diferencias significativas en el agua útil entre las diferentes ZM. En los 140 cm la ZM1L1 tuvo 33% menos de agua que las ZM2L1 y ZM4L1, y un 18% menos que la ZM3L1. Ampliándose las diferencias con la profundidad, ya que la ZM1L1 tuvo entre 30 y 40% menos de agua respecto de las otras ZM (Figura 2.5.3a).



a



b

Figura 2.5.3. Contenido inicial de agua útil en el suelo (mm) por estrato (0-160cm) en cada una de las ZM del a) Lote 1 y b) Lote 2. La comparación de las medias entre las ZM para una misma profundidad de muestreo se realizó mediante un test de LSD (α : 0,05) y la significancia se indicó como ns; *, **, *** (no significativo, $P < 0,05$, $P < 0,01$, $P < 0,001$, respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media para cada profundidad de muestreo

En el Lote 2, la mayor ocurrencia de precipitaciones en el período previo a la siembra del cultivo, 230 mm en el período Junio-Septiembre de la campaña 2012 (50% >normal), mientras que en la campaña 2011 las precipitaciones en el mismo período sólo alcanzaron el 60% (94 mm en el mismo período) de lo que ocurre normalmente, lo que generó diferencias en el contenido total de agua entre los lotes (Figura 2.5.3). Las mayores diferencias en el contenido de agua útil del suelo en el Lote 2 se observaron en los primeros

30 cm de suelo, donde se verificó hasta los 15 cm que la ZM2L2 tuvo un 15% menos de agua que la ZM1L2 y ZM3L2; mientras que entre los 15 y 30 cm de profundidad la ZM2L2 y ZM3L2 tuvieron un 34% menos de agua útil respecto a la ZM1L2. Entre 40 y 80 cm de profundidad las diferencias entre ZM en el contenido de agua fueron menores, y variaron entre 14 y 29% (Figura 2.5.3b). Por debajo de los 100cm se detectó la presencia de una napa con lo cual les mediciones del contenido total de agua y el cálculo del balance (ver Capítulo 3) se realizaron para la profundidad 0-100cm.

La evolución del contenido de agua en el perfil del suelo (Figura 2.5.4 a) del Lote 1, tuvo una tendencia similar entre ZM detectándose diferencias entre éstas (mayores contenidos en la ZM4L1) en los meses de diciembre y enero, durante los cuales la recarga del perfil fue escasa debido a las bajas precipitaciones.

En el Lote 2, la evolución del contenido de agua en el suelo fue similar entre ZM (Figura 2.5.4 b), con una tendencia en la ZM1L2 a presentar menores contenidos de agua.

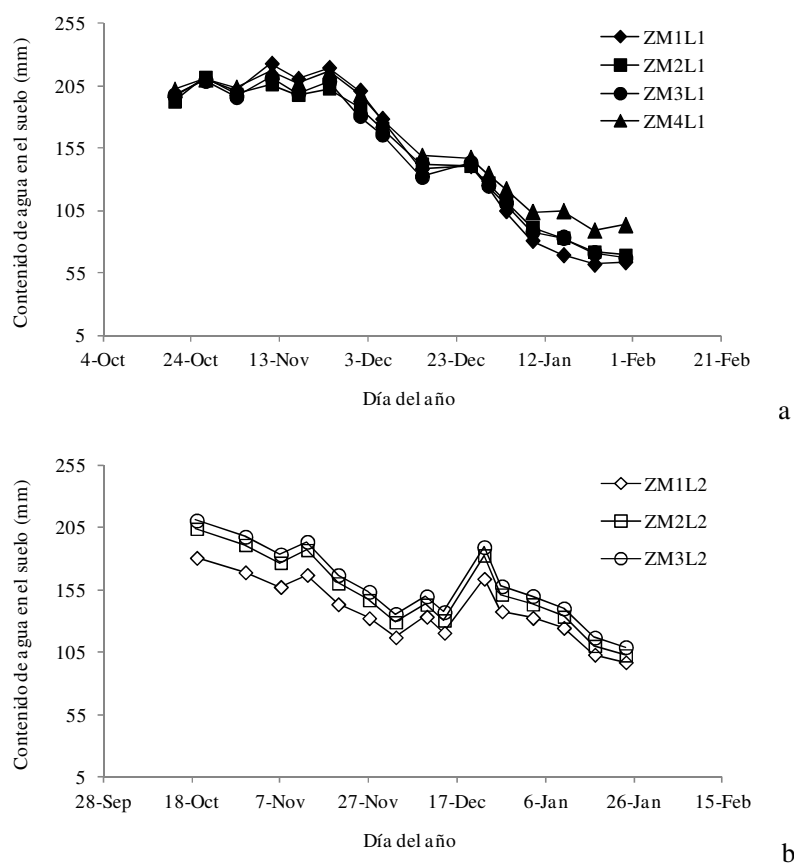


Figura 2.5.4. Evolución del contenido de agua del suelo (mm) hasta 160cm de profundidad en las 4 ZM del Lote 1 (a) y hasta los 100 cm en las 3 ZM del Lote 2 (b) en el tratamiento N0 desde la siembra hasta la madurez fisiológica del cultivo de maíz. Símbolos llenos: Lote 1, símbolos vacíos: Lote 2.

CAPÍTULO 3
EFICIENCIA DE USO DE AGUA Y N DE MAÍZ POR
ZONAS DE MANEJO

3.1. INTRODUCCIÓN

El rendimiento del cultivo de maíz se encuentra principalmente limitado por agua y nitrógeno (N), presentando la oferta de ambos recursos una importante variabilidad espacial y temporal a lo largo del ciclo y entre años. En estas situaciones, donde los requerimientos del cultivo y la disponibilidad del nutriente pueden variar espacialmente, la aplicación de dosis uniformes de N genera desajustes entre la oferta y las necesidades del cultivo (Stafford et al., 1996; Schmidt et al., 2007; Gao et al., 2012).

La aplicación de dosis de N menores a las requeridas limita el rendimiento del cultivo en aquellos sectores del lote con menor disponibilidad de N, representando una reducción en la productividad y los ingresos económicos, mientras que en aquellos sectores con alta disponibilidad de N este manejo resulta en dosis mayores a las requeridas, reduce el beneficio económico y genera un riesgo potencial para el ambiente (Mamo et al., 2003). La aplicación de N en exceso, aumenta la probabilidad de pérdidas por lixiviación del N excedente en el suelo (Schmidt et al., 2007), con el consecuente riesgo de contaminación de aguas.

Considerar las diferencias de potencialidad productiva ajustando de manera variable la disponibilidad de nitrógeno podría mejorar la eficiencia de uso del N. La delimitación de zonas de manejo (ZM) es una alternativa que considera la variabilidad espacio-temporal de los recursos y permite aumentar la eficiencia de uso de N (Franzen et al., 2002; Schepers et al., 2004). Las zonas de diferente productividad o de manejo, representan subregiones homogéneas dentro de un lote para las que resulta apropiada una proporción única de insumos (Doerge, 1999). Cada zona debe mostrar diferente respuesta del cultivo a los fertilizantes y a otros insumos, y estas respuestas necesitan ser confiablemente estimadas antes de tomar decisiones de manejo (Miao et al., 2006).

La implementación de tecnologías de dosis variable por ZM, permitiría aumentar la EUN, minimizando el impacto negativo sobre el ambiente y aumentando los beneficios económicos (Booltink et al., 2001). Determinar la cantidad óptima de N de fertilizante para satisfacer las necesidades del cultivo y simultáneamente minimizar el impacto ambiental y económico no es un tarea simple (Robertson y Vitousek, 2009). La dosis óptima de N varía espacial y temporalmente, dentro de un mismo lote de acuerdo a la heterogeneidad del suelo y de acuerdo a las variaciones intra e interanuales del clima (Basso et al., 2007).

El contenido de agua del suelo también varía espacialmente de acuerdo a las variaciones en las precipitaciones, la topografía y las propiedades del suelo (Lascano et al., 1999; Sadler et al., 2000b; Batchelor et al., 2002) y esto afecta la cantidad de N que el cultivo acumula durante su ciclo (Lemaire y Gastal, 2009). Por esta razón sería esperable que existiendo diferencias espaciales en la disponibilidad de agua y nitrógeno, la respuesta del cultivo varíe entre ZM. La EUN también depende de la respuesta del cultivo ante diferencias en la disponibilidad de agua y N durante la estación de crecimiento del cultivo, lo que sugiere que la evaluación de estas interacciones podrían producir guías útiles para el uso eficiente del agua y el N (Hatfield y Prueger, 2004).

El incremento en la disponibilidad de N conduce generalmente a una disminución en la EUN (Lemaire y Gastal, 2009); en contraste, la EUA responde positivamente a la oferta de N (Hatfield et al., 2001), al menos hasta un umbral donde se alcanza el máximo rendimiento del cultivo. Por lo tanto, resulta relevante para proponer prácticas de manejo eficiente de los recursos en lotes de producción de maíz, el estudio de las interacciones entre la disponibilidad de agua y nitrógeno y su efecto sobre la eficiencia de uso de estos recursos.

El objetivo del presente capítulo fue evaluar la variación espacial de la disponibilidad de agua y de nitrógeno, la biomasa, el rendimiento y las eficiencias de uso de agua y nitrógeno del cultivo de maíz.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Sitio de estudio y delimitación de zonas de manejo

El sitio de estudio correspondió al descrito en la sección 2.1 y la delimitación de zonas de manejo a la descrita en la sección 2.2 del Capítulo 2.

3.2.2. Muestreo de suelos y análisis

El muestreo de suelos y sus análisis se realizaron de acuerdo a lo descrito en la sección 2.3 del Capítulo 2.

3.2.3. Experimentos de fertilización nitrogenada

Se utilizaron los datos de los experimentos descritos en la sección 2.4 del Capítulo 2, en los que se evaluaron 4 tratamientos de disponibilidad de N, N0, N70, N140 y N210.

3.2.4. Estimaciones y variables derivadas

El rendimiento del cultivo se determinó cosechando manualmente un área de 10 m². La determinación de biomasa aérea al momento de madurez fisiológica del cultivo (R6, Ritchie y Hanway, 1982), se realizó mediante la recolección de 10 plantas consecutivas en cada parcela. Las muestras se secaron en estufa con circulación de aire forzada a una temperatura de 65°C, hasta peso constante. Se molieron y tamizaron a 1 mm y se determinó la concentración de N en grano (%Ng) y en las estructuras vegetativas de la planta en R6 (%Nv) por combustión seca utilizando un autoanalizador LECO modelo TruSpec (Leco Corp., St. Joseph, MI, USA). El nitrógeno acumulado en las estructuras vegetativas del cultivo se estimó como el producto entre la biomasa del cultivo sin granos y %Nv. De manera similar el N acumulado en los granos (Ng, kg N ha⁻¹) se determinó como el producto entre el rendimiento en granos (base seca) y %Ng.

La respuesta del cultivo a N se estimó para cada variable de cultivo estudiada, de la siguiente manera:

$$\text{Respuesta a N} = Y_N - Y_{N0} \quad [1]$$

donde Y_N es el rendimiento o la biomasa del tratamiento con agregado de N (N70, N140 o N210) y Y_{N0} es el rendimiento o la biomasa del tratamiento sin el agregado de N (N0). La respuesta relativa a los testigos se calculó como:

$$\text{Respuesta relativa (\%)} = \left(\frac{\text{Respuesta a N}}{Y_{N0}} \right) \times 100 \quad [2]$$

donde, Y_{N0} es el rendimiento o la biomasa del tratamiento sin el agregado de N (N0).

La eficiencia de uso de nitrógeno en grano (EUNg) y en biomasa (EUNb), se calculó como:

$$EUN_{dg} \text{ (kg grano kg Nd}^{-1}\text{)} = \frac{Y}{Nd} \quad [3]$$

$$EUN_{db} \text{ (kg MS kg Nd}^{-1}\text{)} = \frac{B}{Nd} \quad [4]$$

donde, Y es el rendimiento en grano del cultivo (kg grano ha⁻¹), B la biomasa aérea acumulada hasta R6 (kg MS ha⁻¹) y Nd (kg N ha⁻¹) el N disponible en el suelo para el cultivo (Huggins y Pan, 1993).

La lámina de agua evapo-transpirada por el cultivo (ETC) se estimó como el balance entre la variación de almacenaje de agua en el suelo entre fechas y la precipitación efectiva en ese período, de la siguiente manera:

$$ETC \text{ (mm)} = \sum_{i=m}^n \Delta H_i + P_e \quad [5]$$

$$\sum_{i=m}^n \Delta H_i = H_{m+1} - H_m + H_{m+2} - H_{m+1} + \dots + H_{n-1} - H_n \quad [6]$$

donde, ΔH_i es la sumatoria de las variación de almacenaje entre fechas sucesivas de medición de humedad de suelo, y Pe la precipitación efectiva ocurrida durante el ciclo de crecimiento del cultivo.

La precipitación efectiva se estimó de acuerdo a al método de la curva número desarrollado por el Soil Conservation Service (USDA, 1993). En el Lote 1 la CN varió según condición de humedad antecedente entre 75 y 95 en la ZM1L1, mientras que en las restantes ZM varió entre 70 y 94. En el Lote 2, la CN abarcó un rango entre 75 y 95, en las tres ZM evaluadas. En este lote, los tres tipos de suelos evaluados pertenecen al mismo grupo hidrológico.

En el Lote 2 se verificó la presencia de una napa fluctuante entre los 100 y 120cm de profundidad, dependiendo de la posición en el paisaje y del punto de muestreo, por esta razón el balance de ese año se realizó teniendo en cuenta sólo las mediciones de humedad hasta los 100cm de profundidad.

La eficiencia de uso de agua en grano (EUA_g) y en biomasa (EUA_b) (Sinclair et al., 1984) se calculó como:

$$EUA_g \text{ (kg grano mm}^{-1}\text{)} = \frac{Y}{ETC} \quad [3]$$

$$EUA_b \text{ (kg MS mm}^{-1}\text{)} = \frac{B}{ETC} \quad [4]$$

donde, Y es el rendimiento en grano del cultivo (kg grano ha^{-1}), B la biomasa aérea acumulada hasta R6 (kg MS ha^{-1}), y ETC la lámina de agua evapotranspirada durante el período de crecimiento del cultivo (Sinclair et al., 1983).

3.2.5. Análisis estadístico

Para cada año estudiado se realizó un análisis de varianza (ANOVA), para evaluar los efectos de las ZM, N y su interacción, sobre la biomasa del cultivo, el rendimiento, el Nd, el N absorbido por el cultivo (N acumulado en granos, en biomasa y total), la ETC, la EUN_d y la EUA. Se realizaron comparaciones de medias mediante el test de LSD. Se realizaron regresiones lineales para evaluar los cambios en EUN_d y EUA de acuerdo al Nd. Para la realización de los análisis estadísticos se utilizó el software Infostat (Di Rienzo et al., 2002).

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Biomasa, rendimiento y N vegetal

En el Lote 1, la acumulación de biomasa hasta madurez del cultivo no difirió entre tratamientos de disponibilidad de N ($p > 0.05$), pero sí lo hizo por efecto de la ZM ($p < 0.001$), siendo en promedio de 13934 kg ha^{-1} (Tabla 3.3.1). La acumulación de biomasa fue 37% mayor en la ZM1L1, ZM2L1 y ZM4L1, respecto a la ZM3L1.

Tabla 3.3.1. Valores medios de biomasa a madurez fisiológica, rendimiento en grano, N acumulado en el grano (Ng) y N total acumulado (Nacum) por el cultivo de maíz por zona de manejo y tratamiento de fertilización con N en el Lote 1.

ZM	N	Biomasa kg ha ⁻¹	Rendimiento kg ha ⁻¹	Ng kg N ha ⁻¹	Nacum kg N ha ⁻¹
ZM1L1	0	13760	5822	63	101
	70	14958	5721	59	103
	140	15389	6782	94	143
	210	17108	7074	100	187
ZM2L1	0	13966	4980	52	90
	70	13035	5563	61	94
	140	16803	6399	90	163
	210	14855	6877	100	162
ZM3L1	0	10533	3454	38	71
	70	9482	3393	40	67
	140	11926	4076	55	113
	210	11518	4387	74	135
ZM4L1	0	13909	5157	64	116
	70	14822	5442	65	123
	140	15169	6400	100	164
	210	15719	8237	101	186
Promedios					
ZM1L1		15304 a	6350(13) [#] a	79 a	134 a
ZM2L1		14665 a	5955(19) a	76 a	127 a
ZM3L1		10865 b	3827(33) b	52 b	97 b
ZM4L1		14905 a	6309(34) a	83 a	147 a
N0		13042	4853(24) A	54 A	95 A
N70		13074	5030(29) A	56 A	97 A
N140		14800	5914(26) A B	85 B	146 B
N210		14822	6189(32) B	94 B	168 C
ANOVA					
ZM		***	***	***	***
N		ns	*	***	***
ZMxN		ns	ns	ns	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), minúsculas indican diferencias entre ZM y mayúsculas entre tratamientos de disponibilidad de N. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ns: no significativo. [#]Entre paréntesis se informa el CV (%)

En el Lote 2 la acumulación de biomasa por el cultivo se vio afectada por la disponibilidad de N ($p < 0.001$) y ZM ($p < 0.001$). La producción de biomasa fue similar entre los tratamientos con menor disponibilidad de N (N0 y N70), mientras que los tratamientos con mayor disponibilidad de N (N140 y N210) acumularon 30% más biomasa. La biomasa resultó 45% mayor en la ZM1L2, respecto a la ZM2L2 y ZM3L2, entre las que no se verificó diferencias significativas (Tabla 3.3.2).

Tabla 3.3.2. Valores medios de biomasa a madurez fisiológica, rendimiento en grano, N acumulado en el grano (Ng) y N total acumulado (Nacum) por el cultivo de maíz por zona de manejo y tratamiento de fertilización con N en el Lote 2.

ZM	N	Biomasa kg ha ⁻¹	Rendimiento kg ha ⁻¹	Ng kg N ha ⁻¹	Nacum kg N ha ⁻¹
ZM1L2	0	17788	8025	75	158
	70	16563	7444	68	135
	140	20889	10074	117	203
	210	22590	10947	128	224
ZM2L2	0	10578	4899	44	79
	70	12136	4582	42	93
	140	16340	7131	66	127
	210	16657	7670	79	139
ZM3L2	0	12870	4705	37	80
	70	10650	5296	46	79
	140	14886	6147	56	121
	210	13528	6324	66	102
Promedios					
ZM1L2		19457 a	9122(20) a	97 a	180 a
ZM2L2		13928 b	6071(34) b	57 b	110 b
ZM3L2		12984 b	5618(23) b	51 b	96 b
N0		13745 A	5877(34) A	52 A	105 A
N70		13116 A	5774(35) A	52 A	102 A
N140		17372 B	7784(26) B	79 B	150 B
N210		17592 B	8314(29) B	91 B	155 B
ANOVA					
ZM		***	***	***	***
N		***	***	***	***
ZMxN		ns	ns	ns	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), minúsculas indican diferencias entre ZM y mayúsculas entre tratamientos de fertilización nitrogenada. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ns: no significativo. #Entre paréntesis se informa el CV (%)

En el Lote 1, el rendimiento del cultivo de maíz se vio significativamente afectado por efecto del N y ZM ($p < 0.001$), resultando 62% mayor en las ZM1L1, ZM4L1 y ZM2L1 respecto a la ZM3L1 (Tabla 3.3.1). La respuesta media a N por ZM fue mayor en las ZM2L1 y ZM4L1, intermedia en la ZM1L1 y menor en la ZM3L1. En el Lote 2 el rendimiento del cultivo de maíz mostró variaciones significativas ($p < 0.001$) debidas a la disponibilidad de N, y fue un 50 y 60% mayor en la ZM1L2 respecto a los alcanzados en las ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente (Tabla 3.3.2). La respuesta media en el Lote 2 fue de 1600 kg ha⁻¹ y varió de acuerdo al tratamiento de N ($p < 0.01$), siendo nula para el tratamiento N70, de 1907 kg ha⁻¹ para N140 y 2437 kg ha⁻¹ para N210. La mayor respuesta se observó en la ZM2L2, fue intermedia en la ZM1L2 y menor en la ZM3L2.

En el Lote 1, tanto el Ng como el Nacum variaron significativamente por efecto del N ($p < 0.05$) y la ZM ($p < 0.001$), absorbiendo más N los cultivos con las mayores disponibilidades de N, y presentando los cultivos de la ZM3L1 los menores valores de Ng y Nacum (Tabla 3.3.1). En el Lote 2, el Ng y el Nacum variaron de acuerdo a N y ZM ($p < 0.001$), presentando los cultivos de la ZM1L2 los mayores valores. En esta ZM el Ng fue 79% mayor que en las otras ZM, y el Nacum fue 64 y 88% mayor respecto a la ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente.

El aumento en la disponibilidad de N generó incrementos (porcentuales) mayores sobre los rendimientos que sobre la biomasa (Figura 3.3.1) y las respuestas relativas del rendimiento a la disponibilidad de N fueron significativas ($p < 0.01$) en el Lote 2 ($p < 0.01$) y variaron entre 0 y 41%, mientras que en el Lote 1 estuvieron entre 4 y 37%.

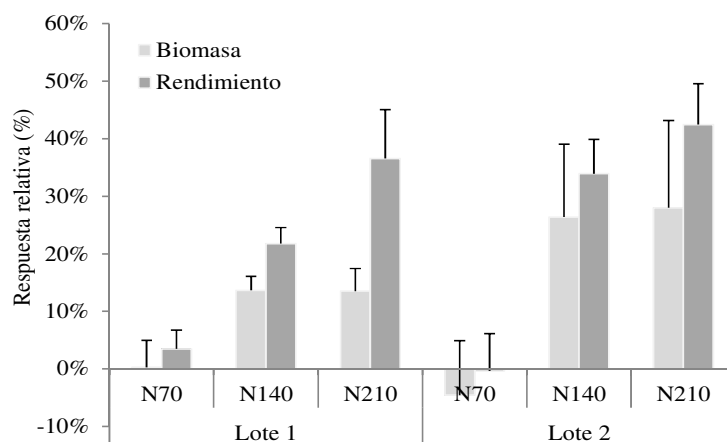


Figura 3.3.1. Respuestas relativas al agregado de N (%) para la biomasa y el rendimiento del cultivo de maíz bajo tres disponibilidades de N (promedio de las ZM) en el Lote 1 y Lote 2. Las barras verticales indican el error estándar.

En el Lote 1, si bien la respuesta relativa de la biomasa promedio de las distintas ofertas de N no fue significativa ($p > 0.05$), esta resultó mayor en la ZM1L1 (Figura 3.3.2). En el Lote 2, la respuesta relativa varió de acuerdo con la ZM ($p < 0.05$) y la máxima respuesta se registró en la ZM2L2 (42%). Con respecto al rendimiento, la mayor respuesta relativa a N se alcanzó en la ZM4L1 del Lote 1 (ca. 30%) y en la ZM2L1 del Lote 2 (28%).

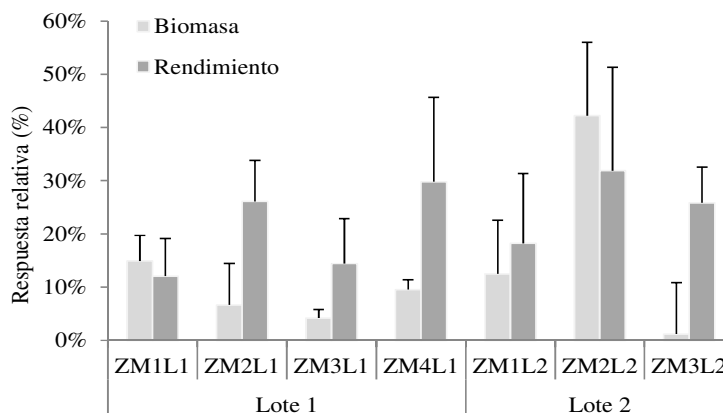


Figura 3.3.2. Respuestas relativas al agregado de N (%) para la biomasa y el rendimiento del cultivo de maíz (promedio por ZM) en el Lote 1 y Lote 2. Las barras verticales indican el error estándar.

3.3.2. Eficiencia de uso de agua y N

En el Lote 1, el Nd varió por efecto del N y de las ZM (Tabla 3.3.3), abarcando un rango entre 126 a 303 kg N ha⁻¹. La ZM3L1 fue la de menor disponibilidad de N, con 11 y 17% menos de Nd que las otras zonas. El Nd aumentó, de manera esperable, con el tratamiento de fertilización con N entre 29 y 240%, respecto al tratamiento testigo (N0) (Tabla 3.3.3). La variación media por efecto de la fertilización fue de 38%, mientras que la variación media atribuible al efecto de la ZM fue de 8%. En el Lote 2, se verificaron efectos significativos de ZM y N (Tabla 3.3.4). En la ZM1L2 el Nd alcanzó 245 kg N ha⁻¹, siendo significativamente superior al disponible en las otras zonas, donde fue de 168 kg N ha⁻¹ en la ZM2L2 y de 179 kg N ha⁻¹ en la ZM3L2. El Nd aumentó hasta 2.4 veces con el tratamiento de fertilización con N (Tabla 3.3.4), respecto al tratamiento sin fertilización. La variación media generada por la fertilización fue mayor que la variación media por efecto de la ZM, siendo de 40% y 21%, respectivamente.

En el Lote 1, la EUN_d en biomasa y en grano, se modificó significativamente sólo por efecto de N ($p < 0.001$), disminuyendo con el aumento de la disponibilidad de N (Tabla 3.3.3). A pesar de no hallarse diferencias significativas en la EUN_{db} y EUN_{dg} por efecto de la ZM, en la ZM3L1 se observaron eficiencias menores que en las otras ZM.

En el Lote 2 la EUN_{db} y la EUN_{dg}, se vieron afectadas significativamente por el N ($p < 0.001$), verificándose una interacción significativa entre ZM y N ($p < 0.001$ y $p < 0.05$, respectivamente) (Tabla 3.3.4). En la ZM1L2 y ZM2L2, si bien la EUN_{db} disminuyó con el aumento de N, el tratamiento que claramente se diferenció del resto fue N210, donde se obtuvieron las menores EUN_{db}. En la ZM3L2, el rango de variación de la EUN_{db} fue mayor que en las otras zonas, y todos los tratamientos se diferenciaron significativamente. La EUN_{dg} en las ZM1L2 y ZM2L2 tuvo un rango de variación menor que en la ZM3L2, y las diferencias entre tratamientos de fertilización no fueron tan marcadas. En la ZM3L2 los tratamientos de menor disponibilidad de N (N0 y N70) tuvieron mayor EUN_{dg} que los tratamientos de mayor disponibilidad de N (N140 y N210) (Tabla 3.3.4).

Tabla 3.3.3. Valores medios de N disponible (Nd), eficiencia de uso de N en biomasa (EUN_{db}), eficiencia de uso de N en grano (EUN_{dg}), evapotranspiración del cultivo (ETC), eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b) y eficiencia de uso de agua en grano (EUA_g) por zona de manejo (ZM) y tratamiento de fertilización con N (N) en el Lote 1.

ZM	N	Nd kg ha ⁻¹	EUN_{db} kg MS kg N ⁻¹	EUN_{dg} kg grano kg N ⁻¹	ETC mm	EUA_b kg MS mm ⁻¹	EUA_g kg grano mm ⁻¹
ZM1L1	0	131	105	45	425	32	14
	70	168	90	34	429	35	13
	140	238	65	29	422	37	16
	210	308	56	23	437	39	16
ZM2L1	0	122	114	41	428	33	11
	70	163	80	34	477	28	12
	140	233	72	27	501	34	13
	210	303	49	23	444	34	15
ZM3L1	0	103	102	34	446	24	8
	70	142	68	25	443	21	8
	140	212	56	20	445	27	9
	210	282	42	16	449	26	10
ZM4L1	0	147	98	37	403 A	34	13
	70	178	85	32	411 A	36	13
	140	248	63	27	524 B	30	13
	210	318	50	21	477 B	33	13
Promedios							
ZM1L1		211 bc	79	33	428	36 a	15
ZM2L1		205 b	79	31	463	32 a	13
ZM3L1		185 a	67	24	446	24 b	9
ZM4L1		223 c	74	29	454	33 a	13
N0		126 a	105 a	39 a	426 a	31	11
N70		163 b	81 b	31 b	440 ab	30	12
N140		233 c	64 c	26 bc	473 c	32	13
N210		303 d	49 d	21 c	452 bc	33	14
ANOVA							
ZM		***	ns	ns	ns	***	ns
N		***	***	***	**	ns	ns
ZMxN		ns	ns	ns	**	ns	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), mayúsculas indican diferencias entre tratamientos de disponibilidad de N dentro de la ZM, minúsculas indican diferencias entre ZM y minúscula *cursiva* indican diferencias entre tratamientos de disponibilidad de N. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ns: no significativo

La ETC en el Lote 1 se vio afectada significativamente por efecto de N ($p < 0.01$) y se verificó interacción significativa entre N y ZM ($p < 0.01$). La ETC en promedio, fue mayor en los tratamientos de mayor disponibilidad de N (Tabla 3.3.3). Al realizar un análisis por ZM, sólo se verificaron diferencias significativas en la ETC en la ZM3L2, donde N0 y N70 tuvieron una menor ETC que N140 y N210 (Tabla 3.3.3). A diferencia del Lote 1, en el Lote 2 la ETC varió por efecto de la ZM ($p > 0.01$) siendo en promedio 498 en la ZM1L2 y 474 mm en las ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente (Tabla 3.3.4).

Tabla 3.3.4. Valores medios de N disponible (Nd), eficiencia de uso de N en biomasa (EUN_{db}), eficiencia de uso de N en grano (EUN_{dg}), evapotranspiración del cultivo (ETC), eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b) y eficiencia de uso de agua en grano (EUA_g) por zona de manejo (ZM) y tratamiento de fertilización con N (N) en el Lote 2.

ZM	N	Nd kg ha ⁻¹	EUN_{db} kg MS kg N ⁻¹	EUN_{dg} kg grano kg N ⁻¹	ETC mm	EUA_b kg MS mm ⁻¹	EUA_g kg grano mm ⁻¹
ZM1L2	0	178	100 A	45 A	500	36	16
	70	198	84 AB	38 AB	495	33	15
	140	268	78 B	38 AB	497	42	20
	210	338	67 C	32 B	501	45	22
ZM2L2	0	99	108 A	50 A	488	22	10
	70	121	102 A	37 B	467	26	10
	140	191	87 AB	38 AB	482	34	15
	210	261	65 B	30 B	477	35	16
ZM3L2	0	92	138 A	52 A	462	28	10
	70	115	93 B	46 A	469	22	11
	140	229	65 C	27 B	468	32	13
	210	280	48 D	22 B	477	29	13
Promedios							
ZM1L2		245 a	82	38	498 a	39 a	18 a
ZM2L2		168 b	90	39	479 b	29 b	13 b
ZM3L2		179 b	86	37	469 b	28 b	12 b
N0		123 a	115	49	484	28 a	12 a
N70		145 a	93	40	477	27 a	12 a
N140		229 b	77	34	482	36 b	16 b
N210		293 c	60	28	485	36 b	17 b
ANOVA							
ZM		***	ns	ns	***	***	***
N		***	***	***	ns	**	**
ZMxN		ns	***	*	ns	ns	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), mayúsculas indican diferencias entre tratamientos de disponibilidad de N dentro de la ZM, minúsculas indican diferencias entre ZM y minúscula *cursiva* indican diferencias entre tratamientos de disponibilidad de N. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ns: no significativo

En cuanto a la EUA, en el Lote 1 sólo se verificó efecto significativo de ZM sobre la EUA_b , la que fue menor en la ZM3L1. La EUA_g promedio fue de 12 kg mm⁻¹, y si bien no hubo efectos significativos de ZM ($p > 0.05$) sobre esta variable, en la ZM3L1 la EUA_g fue 38% menor que en las otras ZM. En el Lote 2 tanto la EUA_b como la EUA_g , variaron por efecto de la ZM y de N ($p < 0.001$ y $p < 0.01$, respectivamente). La EUA_b en la ZM1L2 resultó 35% mayor que en la ZM2L2 y 41% mayor que en la ZM3L2. La EUA_g fue 31 y 41% mayor en la ZM1L2 respecto a la ZM2L2 y ZM3L2 (Tabla 3.3.4). La EUA_b fue similar entre N0 y N70, y 24% menor a la alcanzada con las dosis de N140 y N210. De manera similar, la EUA_g , con las dosis N0 y N70, resultó 27% menor respecto a las dosis mayores (N140 y N210).

En el Lote 1, la EUN_{db} se relacionó lineal y negativamente con el Nd ($r^2 = 0.77$, $p < 0.05$) al igual que la EUN_{dg} ($r^2 = 0.52$, $p < 0.05$), observándose mayor impacto (mayor pendiente, $p < 0.001$) de Nd sobre la EUN_{db} que sobre la EUN_{dg} (Figura 3.3.3).

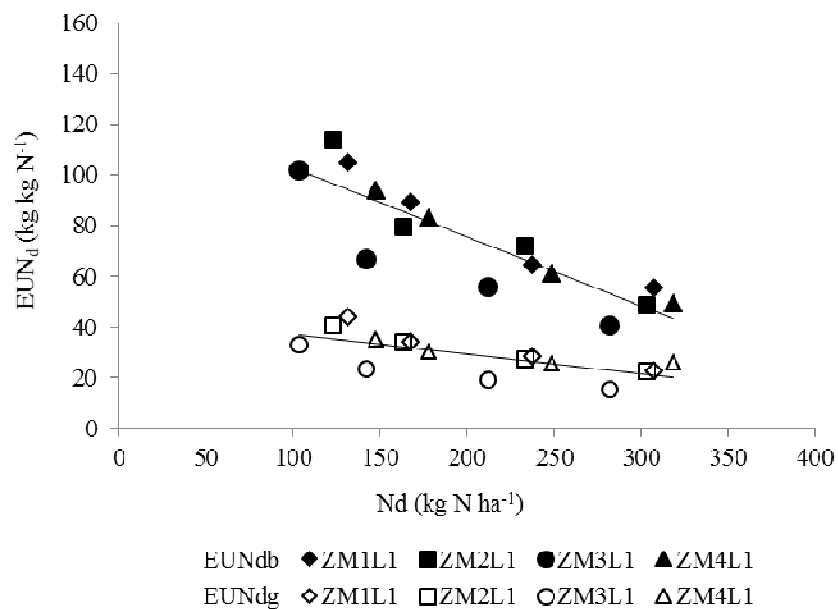
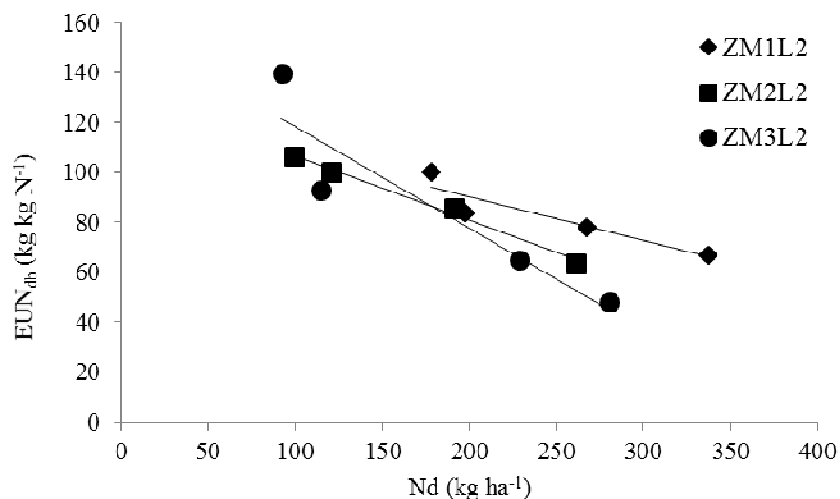
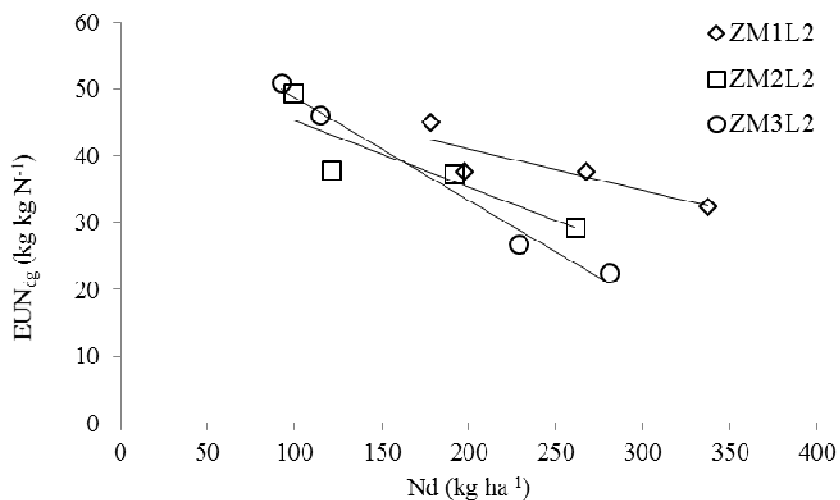


Figura 3.3.3. Relación entre la eficiencia de uso de N (EUN_d) y el nitrógeno disponible (Nd) para las 4 ZM y 4 tratamientos de N evaluados en el Lote 1. Símbolos llenos: $EUN_{db} = -0.27Nd + 130.4$, $r^2 = 0.77$; símbolos vacíos: $EUN_{dg} = -0.08x + 44.9$, $r^2 = 0.52$.

En el Lote 2, debido a que se verificó una interacción ZMxN significativa sobre la EUN se realizó un ajuste de la relación con el Nd por ZM (Figura 3.3.4). En todas las ZM, tanto la EUN_{db} como la EUN_{dg} (Figura 3.3.4 a y b, respectivamente), se relacionaron lineal y negativamente con el Nd ($r^2 = 0.85-0.99$ para EUN_{db} , $r^2 = 0.75-0.99$ para EUN_{dg}).



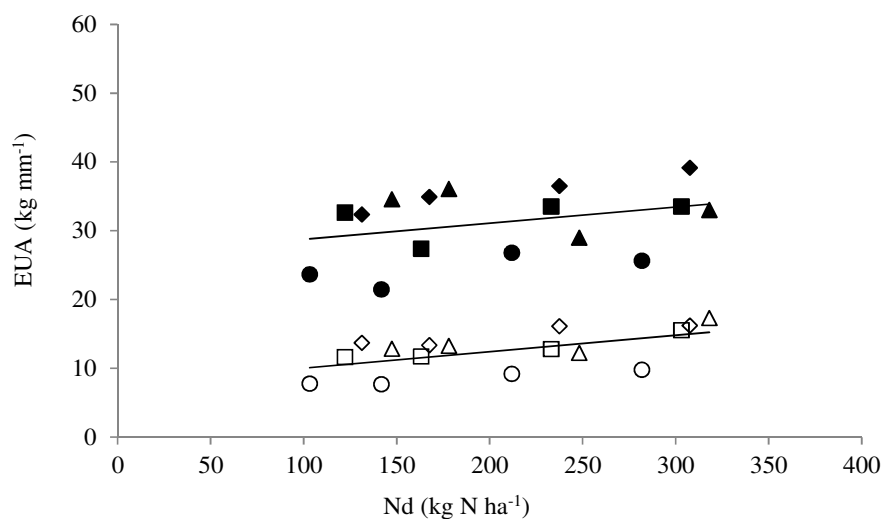
a



b

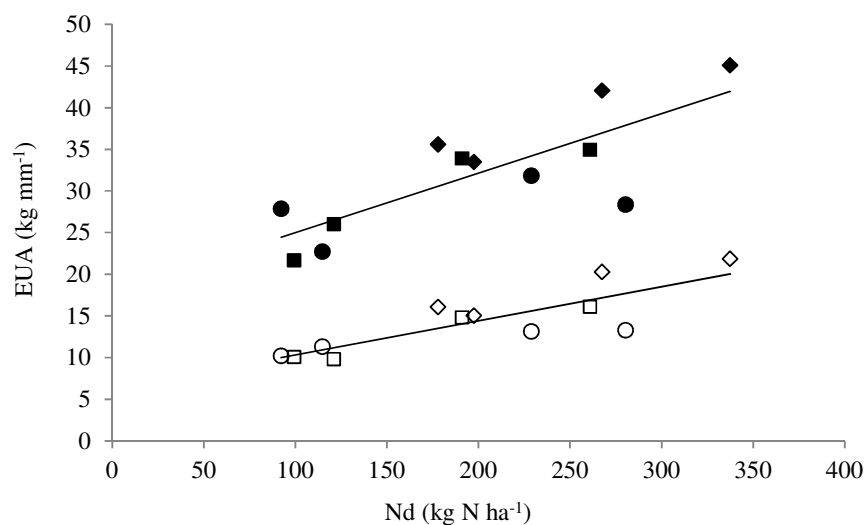
Figura 3.3.4. Relación entre la eficiencia de uso de N (EUN_d) y el nitrógeno disponible (N_d) para las 3 ZM y 4 tratamientos de N evaluados en el Lote 2. a) EUN_{db} (símbolos llenos), b) EUN_{dg} (símbolos vacíos). ZM1L2: $EUN_{db} = -0.18N_d + 125.2$, $r^2=0.86$; $EUN_{dg} = -0.06N_d + 53.5$, $r^2=0.75$; ZM2L2: $EUN_{db} = -0.26N_d + 132.3$, $r^2=0.99$; $EUN_{dg} = -0.10N_d + 55.0$, $r^2=0.76$; ZM3L2: $EUN_{db} = -0.41N_d + 159.3$, $r^2=0.85$; $EUN_{dg} = -0.15N_d + 64.3$, $r^2=0.98$.

La EUA_b (Lote 1, $r^2 = 0.11$, $p < 0.05$; Lote 2, $r^2 = 0.64$, $p < 0.05$) y la EUA_g ($r^2 = 0.34$ y 0.71 , $p < 0.05$ para Lote 1 y Lote 2; respectivamente) se relacionaron lineal y positivamente con el N_d , en ambos lotes (Figura 3.3.5a y b). El impacto del N_d sobre la EUA , tanto en biomasa como en grano, fue similar entre Lotes, es decir, las pendientes de las relaciones no difirieron entre Lotes ($p > 0.05$).



EUA_b ◆ ZM1L1 ■ ZM2L1 ● ZM3L1 ▲ ZM4L1
 EUA_g ◇ ZM1L1 □ ZM2L1 ○ ZM3L1 △ ZM4L1

a



EUA_b ◆ ZM1L2 ■ ZM2L2 ● ZM3L2
 EUA_g ◇ ZM1L2 □ ZM2L2 ○ ZM3L2

b

Figura 3.3.5. Relación de la EUA en biomasa (EUA_b) y grano (EUA_g) con el Nd para las ZM evaluadas en el a) Lote 1: $EUA_b = 0.02Nd + 26.36$, $r^2 = 0.11$; $EUA_g = 0.02Nd + 7.61$, $r^2 = 0.34$ y b) Lote 2: $EUA_b = 0.07Nd + 17.87$, $r^2 = 0.64$; $EUA_g = 0.04Nd + 6.24$, $r^2 = 0.70$.

3.4. DISCUSIÓN

El agua que puede almacenar un suelo varía de acuerdo a su textura, el contenido de materia orgánica, el estado estructural y la profundidad del perfil (Jamison y Kroth,

1957). Debido a las diferencias entre las ZM del Lote 1 en cuanto a la profundidad del perfil de suelo por efecto de la erosión, la posición en el paisaje y el contenido de MO (Tabla 2.2.1), se verificaron diferencias significativas en el contenido inicial de agua entre ZM. Estos resultados resultan similares a los hallados por Gregoret et al. (2011) y Muschetti Piana (2012) quienes atribuyeron las diferencias entre ZM a la topografía y a las marcadas diferencias texturales de los suelos presentes en los lotes evaluados. A diferencia de estos autores y a lo registrado en el Lote 1, las condiciones climáticas previas a la siembra del cultivo en el Lote 2, resultaron favorables para el almacenamiento de agua, explicando la falta de diferencias entre ZM en el contenido inicial de agua. La profundidad de suelo oscila entre 90 y 115 cm en el Lote 1 y entre 110 y 130 cm en el Lote 2. Sumado a esto en el Lote 2, las precipitaciones previas a la siembra (período Junio-septiembre) totalizaron 230 mm, siendo 53% mayor respecto a las precipitaciones que ocurren normalmente en ese período, mientras que en el Lote 1 (campaña 2011/12) las precipitaciones durante dicho período fueron de 38% menor que lo normal (94.3 mm).

Por el contrario a lo observado para el contenido de agua, en ambos lotes se verificaron diferencias entre ZM en Ni y Nd. En el Lote 1, la ZM4L1 es una zona donde se produce acumulación de sedimentos y agua por hallarse en la parte más baja del paisaje, lo que genera mayor humedad superficial. Si bien su contenido de MO no fue mayor que en las otras ZM, estas condiciones pudieron favorecer la mineralización de N y por esto los niveles de Ni y Nd resultaron superiores a los de las otras ZM (Tabla 3.3.3). Estos resultados coinciden con lo documentado por Dharmakeerthi et al. (2005) y Gregoret et al. (2011) quienes hallaron diferencias en la disponibilidad de N de acuerdo a la posición topográfica de la ZM, con mayores disponibilidades de N en las posiciones más bajas del lote. La ZM3L1, ubicada en una media loma con un grado de erosión severo (>50% de pérdida del horizonte superficial), probablemente debido a esto las condiciones para la mineralización fueron menos favorables. En el Lote 2, la ZM1L2 se diferenció de las otras por tener un Ni y Nd significativamente mayor. Esta ZM si bien se encuentra en una posición más elevada respecto a las otras ZM (Tabla 2.2.2) evidencia una escasa pendiente y ausencia de efectos de erosión. Asimismo, en esta ZM la acumulación de agua fue más favorable para la mineralización de N, y presentó el mayor contenido de materia orgánica, condiciones que favorecen el proceso. Por otra parte, las variaciones en el tipo de suelo, la historia agrícola, el contenido de MO y las diferencias en el agua disponible entre los Lotes estudiados, podrían explicar las diferencias en la disponibilidad inicial de N entre años.

El Ng y Nacum estuvieron dentro del rango de valores reportados en la bibliografía (Ciampitti y Vyn, 2013; Caviglia et al., 2014). La fertilización con la dosis máxima (N210) produjo incrementos respecto al testigo de 43% en el Ng y de 32% en Nacum. En estudios realizados por Muschetti Piana (2012), donde se evaluaron tecnologías de fertilización uniforme y sitio-específica de acuerdo a la productividad de ZM, el Ng fue mayor en la zona de mayor productividad. Los resultados hallados en este trabajo concuerdan con este resultado, ya que en ambos Lotes se verificaron diferencias en el Ng y Nacum de las distintas ZM, presentando los menores valores los cultivos de las ZM de menor productividad (ZM3L1, ZM2L2, ZM3L2). Probablemente estas diferencias se relacionan con la disponibilidad de agua durante el crecimiento de los cultivos. Kim et al. (2008) evaluaron la influencia del régimen hídrico sobre el uso de N, e informaron aumentos del Ng entre 20 y 6% y del Nacum entre 18 y 10% por efecto del riego, afirmando que existe una relación sinérgica entre el agua y la absorción de N.

Las respuestas de rendimiento al agregado de N fueron bajas o nulas en el Lote 1, considerado como año seco, mientras que en el Lote 2 con mínimas restricciones de agua, el N produjo cambios significativos en el rendimiento del cultivo. En un trabajo previo

realizado con simulaciones de largo plazo, Albarenque et al. (2010), determinaron que la respuesta a la fertilización nitrogenada en años Niña (seco) sería menor a la obtenida en años Niños (húmedos) y Neutros, debido a que las precipitaciones de los meses en que ocurre el período crítico del maíz sembrado en fecha óptima (noviembre-diciembre) se verían afectadas por los diferentes escenarios climáticos.

La respuesta absoluta y relativa en rendimiento no difirió significativamente entre ZM, no obstante, es relevante señalar que la información utilizada para la zonificación no contempló información de rendimiento de cultivos anteriores, con lo cual las diferencias observadas entre zonas podrían no tener efectos importantes sobre el rendimiento. Experiencias realizadas por Córdoba et al. (2013), en la región pampeana no han evidenciado diferencias grandes en rendimiento cuando la zonificación se realizó en base a conductividad eléctrica y propiedades de suelo.

En un trabajo reciente, en el que se consideraron dos años de estudio por ZM, Melchiori et al. (2011) observaron que la variación del rendimiento entre años fue mayor que la variación dentro de los lotes, incluso considerando la variación inducida por la fertilización. Si bien en esta tesis se hallaron diferencias de rendimiento entre ZM en cada lote estudiado, probablemente las condiciones ambientales contrastantes entre campañas, podrían condicionar la expresión de la variabilidad espacial. Al respecto, Schepers et al. (2004) estudiaron el efecto de la variabilidad temporal (e.g. años) sobre la variabilidad espacial de maíz, y hallaron que la variabilidad espacial del rendimiento está más fuertemente relacionada a las ZM en años de precipitaciones medias, comparados con años secos o más húmedos que lo normal. Similarmente, Jaynes y Colvin (1997) remarcan que los patrones de rendimiento no están determinados sólo por las propiedades del suelo sino también por las condiciones climáticas. Whelan y McBratney (2000), también reportaron para trigo que la variación en el rendimiento atribuible a la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo, fue mucho menor que la variación inducida por la variabilidad climática. En este sentido, los mismos autores, indican que el manejo por zonas sólo debería considerarse en situaciones donde la variación espacial sea mayor que la variación temporal.

Adicionalmente, Hattfield y Prueger (2004) señalan que en los estudios de variabilidad espacial de los rendimientos, la clasificación de los años en secos o húmedos, debería considerar la dinámica temporal de las precipitaciones durante el crecimiento de los cultivos.

En esta tesis se realizaron ensayos en dos campañas en distintos lotes, con lo cual no fue posible determinar el efecto de la variabilidad temporal. Para esto, se ha propuesto en diversos trabajos el empleo de modelos de simulación (Paz et al., 1999; Sahaschai Kongtoir and Boonampho, 1999; Diaz-Ambrona et al., 2005; Thorp et al., 2007; Bertocco et al. 2008; Basso et al., 2009; Oliver et al., 2010) que permiten contemplar las variaciones climáticas en una serie histórica para la región, en las distintas ZM.

Las variaciones de rendimiento entre lotes y zonas modificaron la EUN dentro de los rangos que se reporta en la bibliografía para el cultivo de maíz (Moll et al., 1982; Ma et al., 1999; Kim et al. 2008, Muschetti Piana et al., 2010, Caviglia et al., 2014). Los resultados obtenidos mostraron una relación lineal negativa entre la EUN, para producir granos y biomasa, y la disponibilidad de N, situación observada en diversos trabajos (Hatfield y Prueger, 2004). Otros trabajos en los que se relacionó la EUN con la disponibilidad de N, han reportado también disminuciones de la EUN ante aumentos en la disponibilidad de N, pero con una relación asintótica (Belder et al., 2005; Lemaire y Gastal, 2009).

Las condiciones más restrictivas para el crecimiento del Lote 1, se vieron reflejadas en las menores EUN_{db} y EUN_{dg} con respecto a las del Lote 2. O'Neill et al. (2004), en experimentos realizados en Nebraska, determinaron que la EUN fisiológica (kg grano kg

N absorbido⁻¹) fue mayor en parcelas con adecuada disponibilidad hídrica respecto a la observada en condiciones de déficit hídrico. Más recientemente Kim et al. (2008), observaron aumentos promedio en la EUN de 9% por efecto del riego. Los resultados de esta experiencia, mostraron que la EUN varió entre 0 y 68% en el Lote 1, y entre 2 y 42% en el Lote 2. Kim et al. (2008), señalan que si los rendimientos son limitados por estrés hídrico a través del paisaje, entonces la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada se verá afectada por la posición en el paisaje, lo que afectará la eficiencia con la que el cultivo usa el N y el agua. Si bien la EUN_d no mostró variaciones espaciales en los lotes estudiados (Tabla 3.3.3 y 3.3.4), en el Lote 1 la EUN_{db} y la EUN_{dg} fueron 13% y 22% menores en la ZM3L1 (Tabla 3.3.3) que en las restantes ZM, debido al menor Nd que limitó la acumulación de biomasa (-27%) y el rendimiento (-38%). El Nd de esta ZM fue entre 9 y 17% menor que en el resto de las ZM, debido a que la mineralización en esa zona fue entre 22 y 25% menor que en las otras ZM. Además, el alto grado de erosión observado en la ZM3L1 habría generado condiciones productivas más pobres que las observadas en las demás zonas. En contraste, trabajos realizados en el noroeste de la provincia de Bs As, por Muschetti Piana (2012) reportaron diferencias en la EUN_{dg} y EUN_{db} entre ZM, siendo estas mayores en las zonas de lomas arenosas de baja productividad donde el N fue más limitante.

La EUA fue mayor en zonas de mayor productividad y se asoció positivamente con el Nd. Esta relación entre EUA y la disponibilidad de N ha sido documentada previamente por varios autores (Teixeira et al., 2014; Brueck, 2008; Hatfield y Prueger, 2004; Lamm et al., 2001; Halvorson et al., 2004). La adecuada disponibilidad de N afecta la expansión foliar, la duración del área foliar y retarda la senescencia de las hojas (Lemaire y Gastal, 2009), por ende incrementa la proporción de agua transpirada. Sumado a esto, incrementos en el Nd producen mejoras en la EUR (Caviglia y Sadras, 2001, Teixeira et al., 2014), la cual se vincula directamente con la EUA e indirectamente con la EUN. Los valores de EUA_g determinados en este trabajo variaron entre 8 y 22 kg grano mm⁻¹, de manera similar a lo observado por Pedrol et al. (2008) y Barbieri et al. (2012), para condiciones de riego y secano.

La EUA_b aumentó entre 0 y 17% por efecto de la fertilización nitrogenada mientras que la EUA_g aumentó entre 0 y 25% en el Lote 1. En el Lote 2, la mejora por efecto de la fertilización en la EUA_b y en la EUA_g fue de 10 a 48%. Resultados obtenidos por Kim et al. (2008) reportaron incrementos de 31% en la EUA_g por incrementos de la fertilización con N de 0 a 112 kg N ha⁻¹, mientras que la EUA_b aumentó 23% en las mismas condiciones. Recientemente, en un trabajo en el que se evaluó el impacto de la limitación de agua y nitrógeno sobre la biomasa y las eficiencias de uso de recursos (radiación, agua y N), Teixeira et al. (2014) reportaron que el maíz bien fertilizado (>250kg N ha⁻¹) fue un 20% más eficiente en el uso del agua respecto a un testigo sin fertilizar.

El efecto del riego sobre la EUN_d fue mayor que el efecto de la fertilización sobre la EUA en el Lote 1, debido a que en esta campaña la disponibilidad hídrica fue muy restrictiva en especial alrededor de la floración. Contrariamente, en el Lote 2 donde la disponibilidad de agua para el cultivo fue adecuada, el efecto de la fertilización nitrogenada incrementó más la EUA, que el riego la EUN_d (Tabla Anexo 1).

A diferencia de lo observado sobre la EUN_d, la EUA_b evidenció variaciones espaciales en ambos Lotes, mientras que la EUA_g varió espacialmente sólo en el Lote 2. Si bien no se detectaron efectos significativos en los IC (p>0.05), las variaciones en la EUA entre ZM pueden explicarse por las variaciones porcentuales en rendimiento y biomasa entre ZM, las que fueron mayores que las diferencias observadas en la ETC, y cambiaron solo entre 10 y 5 % por efecto del N y ZM, respectivamente. Hatfield y Prueger (2004), en evaluaciones realizadas en otras condiciones reportaron cambios leves en ETC por efecto de las dosis de N al igual que los resultados de este trabajo, pero contrariamente reportan

cambios muy importantes en la ETC por efecto del suelo a diferencia de lo hallado en esta tesis. Probablemente, esto se deba a que los suelos evaluados en el presente trabajo fueron menos contrastantes que los evaluados por estos autores.

En este trabajo, se evaluaron condiciones climáticas diferentes entre años en distintos lotes, con lo cual no se puede inferir directamente el efecto relativo de cada fuente de variación de manera directa, no obstante resulta claro que la respuesta en la eficiencia de uso de los recursos depende de la magnitud o intensidad de su limitación. Resulta relevante contar con más años de resultados por lote que abarquen condiciones ambientales diferentes por sitio, para determinar si la magnitud de la variabilidad espacial justificaría el manejo por zonas y para determinar la magnitud de la variabilidad temporal.

3.5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que a pesar de no verificarse diferencias entre las ZM evaluadas en la disponibilidad inicial de agua, las diferencias entre ZM en cuanto a disponibilidad de N, propiedades del suelo y posición en el paisaje permitieron determinar variabilidad espacial en la producción de biomasa, el rendimiento, el N_g , el N_{acum} , el N_d y la EUA del cultivo de maíz. Las diferencias productivas entre zonas discriminaron una zona de baja productividad en el Lote 1 (ZM3L1) y una zona de alta productividad en el Lote 2 (ZM1L2).

La respuesta absoluta y relativa en rendimiento no difirió significativamente entre ZM en ambos lotes, poniendo de manifiesto la necesidad de contar con más años de estudios por lote para evaluar la utilidad del empleo de tecnologías de agricultura de precisión en los lotes evaluados.

La EUN_d y EUA, se relacionaron de manera contrastante con el N_d , e.i. la EUN_d disminuyó con el aumento de N_d y la EUA respondió de manera inversa. El manejo variable de N debería considerar esta relación, para no generar disminuciones significativas en la EUA.

Los resultados obtenidos, no justificarían de manera concluyente la conveniencia del ajuste de manejo por zonas delimitadas mediante el empleo de variables de suelo (MO, CEa, y altura) como estrategia para aumentar la eficiencia de uso de los recursos.

CAPITULO 4

CO-LIMITACIÓN DE AGUA Y N POR ZONAS DE MANEJO: EFECTO SOBRE LA EUA y LA EUN DEL CULTIVO DE MAÍZ

4.1. INTRODUCCIÓN

La limitación de recursos sobre el crecimiento de las plantas ha sido estudiada muy tempranamente, así las referencias históricas en la temática comienzan con los estudios de Von Liebig en 1895 cuando formuló la ley del mínimo, indicando que el recurso con menor disponibilidad es el que limita el crecimiento aun cuando los demás recursos estén en cantidades suficientes. Así, estableció que el crecimiento es proporcional a la disponibilidad del recurso más escaso. Años más tarde, Liebscher (1895) enunció la ley del óptimo, estableciendo que las plantas usan más eficientemente un recurso escaso cuando los otros recursos están más cercanos al óptimo. De manera complementaria a lo planteado por Von Liebig, la ley de los rendimientos decrecientes establecida por Mitscherlich (1909), establece que cada agregado adicional de un recurso limitante produce un aumento de rendimiento decreciente. Si bien estas leyes han sido confirmadas experimentalmente, los cultivos responden a la modificación de la disponibilidad de los recursos de manera conjunta (Sinclair y Park, 1993).

De manera más reciente, Kho (2000) desarrolló el concepto de limitación (L_i) de un recurso i , como la relación entre la respuesta del cultivo (dY) y el incremento en el recurso X (dY/dX) con la eficiencia de uso del recurso (Y/X):

$$L_i = \frac{dY/dX}{Y/X}$$

De esta manera, la limitación (L_i) varía desde 0, cuando el recurso no es limitante, hasta 1 cuando el recurso es el único factor que limita el crecimiento del cultivo. Kho (2000) demostró que cuando varios recursos limitan el crecimiento del cultivo, la suma de la limitación de todos los recursos es igual a 1. Otros estudios sobre la relación entre el crecimiento de las plantas y el balance de recursos haciendo una analogía con conceptos económicos, sugirieron que las plantas maximizan su crecimiento cuando diferentes recursos la limitan de manera similar, más que cuando el crecimiento es severamente limitado por un único factor (Bloom et al., 1985). De esta manera se estableció el concepto de co-limitación, sugiriendo que esta puede estar positivamente relacionada con el crecimiento y rendimiento de cultivos estresados.

El concepto de co-limitación fue utilizado por Sadras (2005) para analizar el estrés conjunto de agua y N, y propuso calcular la co-limitación de agua y N (C_{AN}) como:

$$C_{AN} = 1 - |L_N - L_A|$$

Así, el máximo crecimiento del cultivo corresponde a la co-limitación máxima, i.e. cuando las limitaciones de agua (L_A) y nitrógeno (L_N) se igualan.

De Wit (1992) propuso que los recursos son usados más eficientemente con el aumento en la disponibilidad de otros recursos, mientras que el concepto de co-limitación utilizado por Sadras (2005) sugiere que los recursos se usan más eficientemente cuando existe un balance de las disponibilidades, reflejado en el grado de co-limitación.

A nivel de lotes de producción las disponibilidades de agua y N varían espacial y temporalmente, lo que resulta en limitaciones variables de agua y N, y entonces del grado de co-limitación. De esta manera resulta esperable que se generen variaciones espaciales en la eficiencia de uso de agua (EUA) y del N (EUN).

El rendimiento de un cultivo puede incrementarse ajustando las dosis de N de acuerdo con la disponibilidad de agua durante la estación de crecimiento, es decir

umentando el grado de co-limitación (Cossani et al., 2010). La EUN generalmente disminuye con el incremento en la disponibilidad de N (Sadras y Lemaire, 2014; Lemaire y Gastal, 2009; Kim et al., 2008; Belder et al., 2005, Fig. 3.3.4. del Capítulo 3); mientras que la EUA responde positivamente a la oferta de N (Brueck, 2008; Halvorson et al., 2004; Hatfield y Prueger, 2004; Hatfield et al., 2001; Lamm et al., 2001; Figura 3.3.5. del Capítulo 3). Kim et al. (2008) analizaron las eficiencias de uso de agua y N en maíz utilizando diferentes niveles de riego y dosis de N. Sus resultados indican que el impacto del N sobre la EUA es mayor que el impacto del agua sobre la EUN, lo que podría sugerir que la EUA es más sensible a la co-limitación que la EUN.

De acuerdo con estos antecedentes, y en vista a la propuesta de ajuste de prácticas de manejo por ambientes o zonas de manejo, resulta relevante determinar el nivel de disponibilidad de N en el cual se equilibran el incremento en la EUA con la reducción en la EUN. Generar información relacionada a estos aspectos contribuiría a proponer decisiones de manejo que aumenten de manera simultánea la eficiencia de uso del agua y el nitrógeno, disminuyendo potenciales impactos sobre el ambiente.

En este capítulo se pondrá a prueba la hipótesis que postula la existencia de variabilidad espacial en el grado de co-limitación por los recursos agua y N en un lote de producción de maíz; y la mayor sensibilidad de la EUA en comparación con la EUN al grado de co-limitación de agua y N.

El objetivo del presente capítulo fue determinar y evaluar el efecto de la co-limitación de agua y N sobre la EUA y la EUN en el cultivo de maíz en diferentes ZM establecidas en base a mediciones de propiedades del suelo en lotes de producción.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Sitio de estudio, muestreo y experimentos de fertilización

En el Capítulo 2 (Sección 2.1 a 2.4) se describen el sitio de estudio y delimitación de zonas de manejo, la metodología empleada para realizar el muestreo de suelos y su análisis, así como los experimentos de fertilización evaluados.

4.2.2. Índices de estrés y co-limitación

Para el cálculo de la co-limitación de agua y nitrógeno se utilizaron los índices de estrés de agua (IA) y nitrógeno (IN) promedio del período de crecimiento del cultivo de maíz (siembra-madurez fisiológica) obtenidos utilizando el modelo de simulación de cultivos SALUS (System Approach to Land Use Sustainability) como lo describen Sadras (2004). El modelo calcula el índice de estrés de agua como la relación entre la absorción máxima respecto a la transpiración potencial. La transpiración potencial y la producción de biomasa son reducidas multiplicando sus tasas potenciales por este índice (Ritchie, 1998). El índice de estrés de N relaciona la concentración real de N en la planta con la concentración crítica de N. No todos los procesos de crecimiento son afectados de la misma manera por el estrés de N, por esto hay una serie de índices que se basan en este (Godwin y Jones, 1991).

En el capítulo 5 del presente trabajo se detalla el funcionamiento del modelo, su calibración y validación para los sitios de estudio.

Debido a que el IA y el IN de SALUS varían entre 0 (máximo estrés) y 1 (sin estrés), para obtener las limitaciones de agua (L_A) y (L_N) utilizando el enfoque de Sadras (2004) se restó la unidad a cada índice, i.e. IA e IN. Los autores mencionados utilizaron el modelo CropSyst, en el que los índices de estrés de agua y N varían entre 0 (sin estrés) y 1 (máximo estrés).

Las simulaciones contemplaron la estructura de los experimentos de fertilización descritos en la sección 2.4 del Capítulo 2.

El índice de co-limitación de agua y N se estimó como:

$$C_{AN} = 1 - |L_N - L_A|$$

La co-limitación tiende a 1 (máximo) cuando los dos estreses son de similar magnitud.

De manera adicional, como propuso Sadras (2004) se cuantificó la intensidad de la limitación calculando el índice de limitación máxima (M_{AN}) y la limitación total (T_{AN}) como:

$$M_{AN} = \text{Máximo}(L_N, L_A)$$

$$T_{AN} = L_N + L_A$$

4.2.3. Análisis de resultados experimentales

Se realizaron análisis de correlación para determinar el grado de asociación entre las variables L_A , L_N , T_{AN} , M_{AN} y C_{AN} con la EUA y la EUN_d . Los análisis se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo et al., 2002).

Para evaluar las relaciones entre EUN_d y EUA con la C_{AN} se realizaron regresiones lineales y se compararon las pendientes de las regresiones hechas por ZM. Cuando no se verificaron diferencias entre las pendientes se calcularon regresiones múltiples utilizando la ZM como una variable dummy para seleccionar el modelo que mejor describe a la relación. Se compararon 3 modelos: i) modelo completo, que describe los resultados utilizando 4 o 3 funciones (8 o 6 parámetros), una para cada ZM en cada Lote; ii) modelo simple1, que describe la relación entre variables con una sola función (5 parámetros) utilizando variables dummy, y iii) modelo simple2, que describe los resultados con una única función (2 parámetros) (Tabla Anexo 3 y Tabla Anexo 4). Los modelos se compararon mediante un test de F (Mead et al., 1993), seleccionándose el modelo más sencillo (menos parámetros) que explicó mejor la relación entre las variables. Una vez seleccionados los modelos se identificó el valor de C_{AN} en el que se optimizan las eficiencias. El valor de N_d correspondiente a la combinación óptima de las eficiencias se determinó despejando N_d de las relaciones halladas con las eficiencias en el Capítulo 3 (Sección 3.3.2) de esta tesis.

La sensibilidad (S) de la EUA y la EUN_d a los cambios en la C_{AN} se evaluó de mediante el método propuesto por Viña y Gitelson (2005), calculando el cociente entre el cuadrado medio del error (RMSE) de la relación de la EUA o EUN_d y la C_{AN} con la pendiente de la relación ($d(EF)/d(C_{AN})$).

$$S = \frac{RMSE}{d(EF)/d(C_{AN})}$$

De acuerdo a este índice, una variable es más sensible cuanto mejor sea su ajuste y mayor sea la pendiente de la relación, por lo tanto cuanto menor sea S .

4.3 RESULTADOS

4.3.1. Limitación de agua y N y Co-limitación de ambos recursos

En el Lote 1, la limitación de agua (L_A) varió entre 0.23 y 0.40, por otra parte la limitación de N (L_N) alcanzó valores menores, aunque abarcó un rango más amplio que L_A ,

entre 0.01 y 0.31 (Tabla 4.3.1.) No se verificó asociación significativa del tratamiento de fertilización con N con la L_A ($p>0.05$), mientras que sí se relacionó en forma negativa con la L_N (Tabla 4.3.3).

Tabla 4.3.1. Valores de limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N), co-limitación de agua y nitrógeno (C_{AN}), limitación total (T_{AN}) y limitación máxima (M_{AN}), de las 4 ZM evaluadas en el Lote 1. Las limitaciones de agua y N se estimaron con los índices de estrés de agua y N simulados con SALUS.

ZM	N	L_A	L_N	C_{AN}	T_{AN}	M_{AN}
ZM1L1	0	0.255	0.312	0.94	0.57	0.31
	70	0.317	0.196	0.88	0.51	0.32
	140	0.318	0.041	0.72	0.36	0.32
	210	0.318	0.016	0.70	0.33	0.32
ZM2L1	0	0.275	0.285	0.99	0.56	0.28
	70	0.404	0.213	0.81	0.62	0.40
	140	0.317	0.063	0.75	0.38	0.32
	210	0.317	0.012	0.70	0.33	0.32
ZM3L1	0	0.268	0.308	0.96	0.58	0.31
	70	0.332	0.212	0.88	0.54	0.33
	140	0.332	0.018	0.69	0.35	0.33
	210	0.332	0.011	0.68	0.34	0.33
ZM4L1	0	0.227	0.297	0.93	0.52	0.30
	70	0.268	0.251	0.98	0.52	0.27
	140	0.282	0.039	0.76	0.32	0.28
	210	0.282	0.018	0.74	0.30	0.28

Tabla 4.3.2. Valores de limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N), co-limitación de agua y nitrógeno (C_{AN}), limitación total (T_{AN}) y limitación máxima (M_{AN}), de las 3 ZM evaluadas en el Lote 2. Las limitaciones de agua y N se estimaron con los índices de estrés de agua y N simulados con SALUS.

ZM	N	L_A	L_N	C_{AN}	T_{AN}	M_{AN}
ZM1L2	0	0.00	0.22	0.78	0.22	0.22
	70	0.00	0.16	0.84	0.16	0.16
	140	0.00	0.05	0.95	0.05	0.05
	210	0.00	0.03	0.97	0.03	0.03
ZM2L2	0	0.00	0.32	0.68	0.32	0.32
	70	0.15	0.33	0.81	0.48	0.33
	140	0.02	0.24	0.78	0.26	0.24
	210	0.04	0.18	0.86	0.21	0.18
ZM3L2	0	0.03	0.42	0.61	0.46	0.42
	70	0.09	0.37	0.72	0.46	0.37
	140	0.14	0.28	0.85	0.42	0.28
	210	0.12	0.15	0.96	0.27	0.15

En el Lote 2, la L_A exploró un rango más estrecho comparado con el año anterior, hallándose valores entre 0 y 0.15 (Tabla 4.3.2). De manera contrastante, la L_N exploró un rango más amplio entre 0.03 y 0.42. A diferencia del año anterior (Lote 1), el tratamiento de fertilización con N, se asoció positivamente con la C_{AN} y negativamente con L_N (Tabla 4.3.4).

En el Lote 1, la T_{AN} estuvo fuertemente asociada a la L_N ($r = 0.94$, $p < 0.001$), sin verificarse asociación significativa con L_A ($p > 0.05$) (Tabla 4.3.3), y abarcó un rango entre 0.30 y 0.62 (Tabla 4.3.1), lo que indica que L_A y L_N explicaron entre 30 y 62% de la limitación total (limitación de todos los recursos, i.e. CO_2 , radiación, agua y nutrientes). El tratamiento de fertilización con N se asoció negativamente con la T_{AN} . A diferencia de esta, la M_{AN} estuvo más asociada a L_A ($r = 0.83$, $p < 0.001$) que a L_N (Tabla 4.3.3), debido a que L_A fue en general mayor que L_N ; la M_{AN} alcanzó valores entre 0.27 y 0.40 (Tabla 4.3.3). La EUN_{db} y EUN_{dg} se asociaron positivamente con la T_{AN} , a diferencia de las EUA_b y EUA_g que no se asociaron con la misma (Tabla 4.3.3). No se detectaron asociaciones significativas de la EUA_b , EUA_g , EUN_{db} y EUN_{dg} con la M_{AN} .

Tabla 4.3.3. Coeficientes de correlación (r) de las relaciones entre el N aplicado como fertilizante (N), la limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N), co-limitación de agua y nitrógeno (C_{AN}), limitación total (T_{AN}), limitación máxima (M_{AN}), eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b) y grano (EUA_g) y la eficiencia de uso de nitrógeno en biomasa (EUN_{db}) y grano (EUN_{dg}) de las 4 ZM evaluadas en el Lote 1. Las limitaciones de agua y N se estimaron con los índices de estrés de agua y N simulados con SALUS.

	N	L_A	L_N	C_{AN}	T_{AN}	M_{AN}
L_A	0.42 ^{ns}					
L_N	-0.96 ^{***}	-0.42 ^{ns}				
C_{AN}	-0.91^{***}	-0.54[*]	0.96^{***}			
T_{AN}	-0.90^{***}	-0.09 ^{ns}	0.94^{***}	0.85^{***}		
M_{AN}	0.08 ^{ns}	0.83^{***}	-0.08 ^{ns}	-0.32 ^{ns}	0.22 ^{ns}	
EUA_b	0.20^{***}	-0.25 ^{ns}	-0.18 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	-0.28 ^{ns}	-0.33 ^{ns}
EUA_g	0.33^{***}	-0.10 ^{ns}	-0.30 ^{ns}	-0.27 ^{ns}	-0.36 ^{ns}	-0.13 ^{ns}
EUN_{db}	-0.95 ^{***}	-0.48 ^{ns}	0.92^{***}	0.91^{***}	0.84^{***}	-0.18 ^{ns}
EUN_{dg}	-0.88 ^{***}	-0.43 ^{ns}	0.86^{***}	0.83^{***}	0.79^{***}	-0.12 ^{ns}

^{ns}, *, **, *** indica no significativo, $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$, respectivamente. Las eficiencias de uso de agua y N corresponden a los resultados obtenidos en el ensayo de fertilización realizado en el Lote 1 en 4 ZM donde se evaluaron 4 niveles de fertilización con N (N0, N70, N140 y N210).

La limitación total de agua y N (T_{AN}) se asoció positivamente con las limitaciones L_A y L_N en el Lote 2 ($r = 0.69$, $p < 0.01$ y $r = 0.94$, $p < 0.001$, respectivamente) (Tabla 4.3.4). La T_{AN} estuvo entre 0.03 y 0.48 (Tabla 4.3.2), indicando que las limitaciones de agua y N (L_A y L_N) representaron entre 3 y 48% de la limitación total. La M_{AN} estuvo explicada en su totalidad por la L_N ($r = 1$, $p > 0.001$), siendo el rango explorado el mismo que L_N . En este año la limitación de N fue siempre mayor que la limitación de agua. Las EUA_b y EUA_g se asociaron negativamente con la L_N , T_{AN} y M_{AN} (Tabla 4.3.4).

En el Lote 1, la C_{AN} abarcó un rango entre 0.68 y 0.99 (Tabla 4.3.1), y tuvo una fuerte asociación positiva con L_N ($r = 0.96$, $p < 0.001$), mientras que su relación con L_A fue negativa ($r = -0.54$, $p < 0.05$) (Tabla 4.3.3). La C_{AN} se asoció negativamente con el N, mientras que se relacionó positiva y estrechamente con la EUN_{db} y EUN_{dg} ($r = 0.91$, $p < 0.001$ y $r = 0.83$, $p < 0.001$, respectivamente), mientras que no tuvo relación con la EUA_b y EUA_g ($p > 0.05$).

El rango observado en la C_{AN} en el Lote 2, fue levemente superior que en el Lote 1, variando entre 0.61 y 0.97 (Tabla 4.3.2). La C_{AN} estuvo fuertemente asociada a L_N , pero a diferencia del Lote 1 lo hizo negativamente ($r = -0.89$, $p < 0.001$) y no se verificó relación con L_A (Tabla 4.3.4). La C_{AN} se relacionó positivamente con las EUA_b y EUA_g ($r = -0.79$, $p < 0.001$ y $r = -0.82$, $p < 0.001$, respectivamente) y negativamente con la EUN_{db} y EUN_{dg} ($r = -0.88$, $p < 0.001$ y $r = -0.83$, $p < 0.001$, respectivamente).

Tabla 4.3.4. Coeficientes de correlación (r) de las relaciones entre la limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N), co-limitación de agua y nitrógeno (C_{AN}), limitación total (T_{AN}), limitación máxima (M_{AN}) con la eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b) y grano (EUA_g) y la eficiencia de uso de nitrógeno en biomasa (EUN_{db}) y grano (EUN_{dg}) de las 3 ZM evaluadas en el Lote 2. Las limitaciones de agua y N se estimaron con los índices de estrés de agua y N simulados con SALUS.

	N	L_A	L_N	C_{AN}	T_{AN}	M_{AN}
L_A	0.18 ^{ns}					
L_N	-0.67*	0.40 ^{ns}				
C_{AN}	0.82***	0.07 ^{ns}	-0.89***			
T_{AN}	-0.46 ^{ns}	0.69**	0.94***	-0.68*		
M_{AN}	-0.67*	0.39 ^{ns}	1.00***	-0.89***	0.94***	
EUA_b	0.75***	-0.18 ^{ns}	-0.81***	0.79***	-0.70**	-0.81***
EUA_g	0.76***	-0.28 ^{ns}	-0.88***	0.82***	-0.80***	-0.88***
EUN_{db}	-0.88*	-0.22 ^{ns}	0.69**	-0.88***	0.47 ^{ns}	0.70**
EUN_{dg}	-0.88***	-0.44 ^{ns}	0.56 ^{ns}	-0.83***	0.29 ^{ns}	0.57*

^{ns}, *, **, *** indica no significativo, $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$, respectivamente. Las eficiencias son resultado del ensayo de fertilización realizado en el Lote 2 en 3 ZM donde se evaluaron 4 niveles de fertilización con N (N_0 , N_{70} , N_{140} y N_{210}).

4.3.2. Relación de la C_{AN} con la EUA y la EUN_d

La relación entre EUA_b y EUN_{db} con la C_{AN} para el Lote 1 se encuentra representada en la Figura 4.3.1a y b, respectivamente. No se verificó relación significativa entre la EUA_b y la C_{AN} ($p > 0.05$, Figura 4.3.1a). A diferencia de esta, la EUN_{db} se relacionó significativamente con la C_{AN} ($p < 0.01$), y la relación estuvo mejor explicada por un modelo lineal único para todas las ZM (Tabla Anexo 5, Figura 4.3.1b).

A diferencia del Lote 1, donde no se verificó relación significativa entre EUA_b y la C_{AN} , en el Lote 2 la relación fue significativa ($p < 0.01$) y el mejor ajuste se obtuvo con un modelo lineal (Tabla Anexo 6, Figura 4.3.1c), la EUA_b se incrementó ante aumentos en la C_{AN} . La EUN_{db} y la C_{AN} se relacionaron mediante un modelo lineal (Tabla Anexo 6, Figura 4.3.2c), sin verificarse diferencias entre las ZM. La relación fue inversa a la observada en Lote 1.

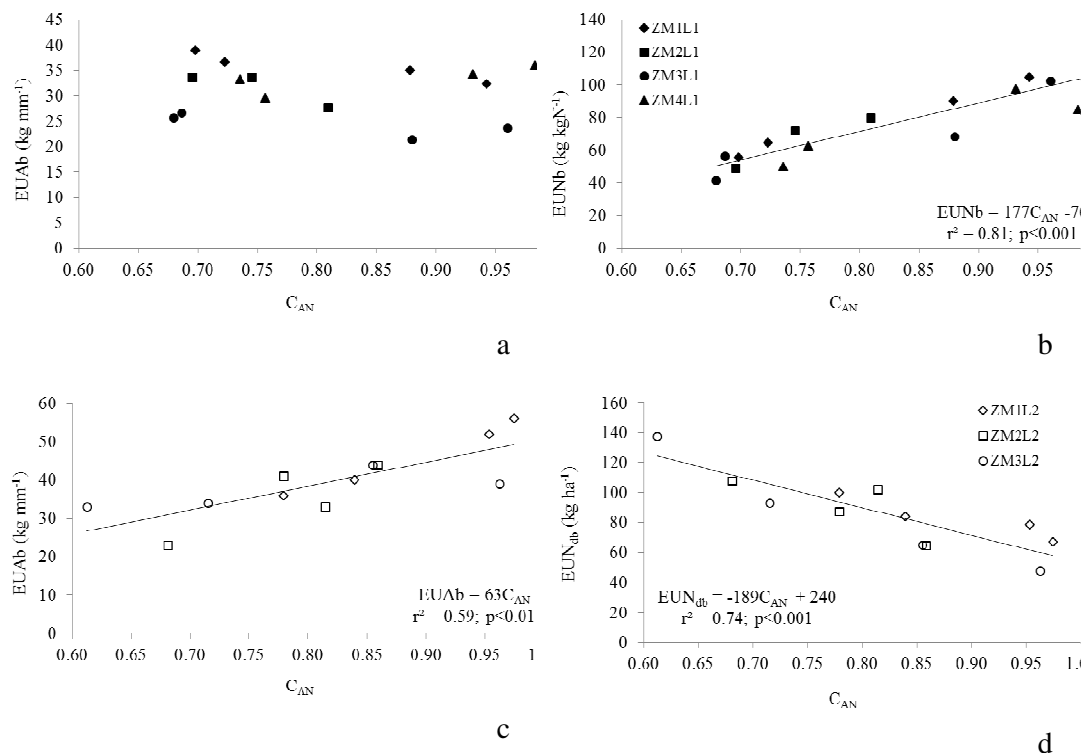
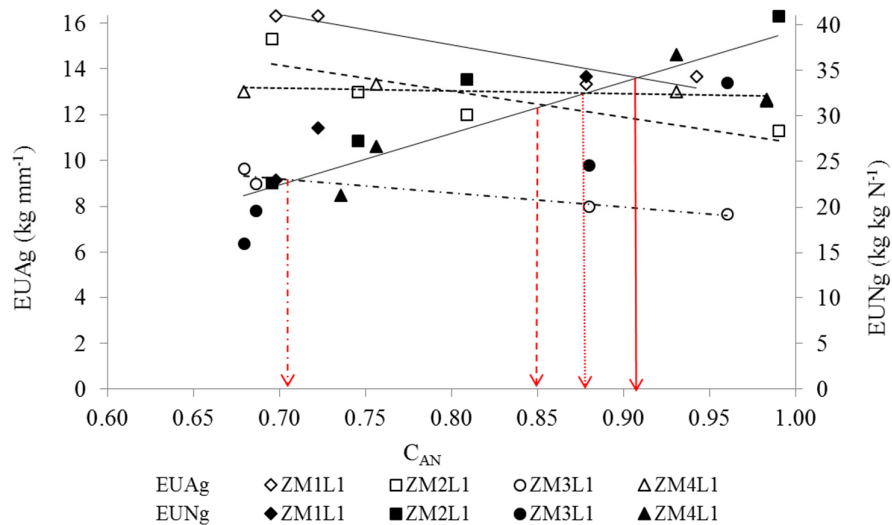


Figura 4.3.1. Relación entre la eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b) y la eficiencia de uso de N en biomasa (EUN_{db}) del cultivo de maíz con la co-limitación de agua y N (C_{AN}) para las 4 zonas de manejo evaluadas en el Lote 1. a) EUA_b , b) EUN_{db} , y para las 3 ZM evaluadas en el Lote 2, c) EUA_b y d) EUN_{db} . Símbolos llenos: Lote 1, símbolos vacíos: Lote 2.

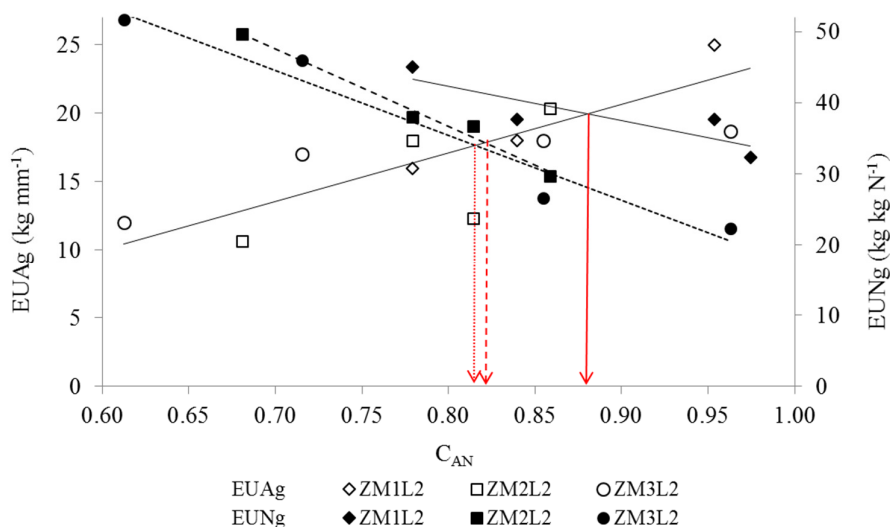
En el Lote 1 las pendientes de las relaciones entre la EUA_g y la C_{AN} por ZM no difirieron significativamente ($p > 0.05$) pero sí las ordenadas al origen, el modelo de regresión múltiple que incluyó a la ZM como una variable dummy fue el que mejor explicó la relación de la EUA_g con la C_{AN} , la inclusión de la variable ZM indica que hay variaciones de acuerdo con estas. La EUA_g disminuyó con el aumento de la C_{AN} , de acuerdo con el modelo, si no existiera co-limitación la EUA_g alcanzaría valores de 21, 19, 15 y 19 kg grano mm⁻¹ (valor de la ordenada al origen), en la ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1 y ZM4L1, respectivamente (Figura 4.3.2.a).

En el Lote 2, la relación entre EUA_g con la C_{AN} fue descrita por un modelo lineal (Figura 4.3.2a y b, Tabla Anexo 6), observándose incrementos en las eficiencias ante aumentos en la C_{AN} , comportamiento inverso al observado en el Lote 1

En el Lote 1 la relación entre la EUN_{dg} y la C_{AN} , se explicó mejor a través de un modelo lineal simple (Tabla Anexo 5; Figura 4.3.2a, símbolos llenos), la EUN_{dg} se incrementó proporcionalmente ante aumentos de la C_{AN} . A diferencia de este, en el Lote 2, para la relación entre EUN_{dg} y C_{AN} el modelo que incluyó a las ZM como variables dummy (Tabla Anexo 6) resultó mejor, indicando que existieron diferencias según las ZM (Figura 4.3.2.d). Si no existiera co-limitación la EUN_{dg} alcanzaría valores de 114, 106 y 104 kg grano kg N⁻¹, para las ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente (Figura 4.3.2.b).



a



b

Figura 4.3.2. Relación entre la eficiencia de uso de agua (EUA) y la eficiencia de uso de N (EUN_d) del cultivo de maíz con la co-limitación de agua y N (C_{AN}) en los dos Lotes evaluados. a) Lote 1, $EUA_g = -7.31C_{AN} + 21ZM1L1 + 19ZM2L1 + 15ZM3L1 + 19ZM4L1$ ($r^2=0.91$, $p<0.01$), $EUN_{dg} = 177C_{AN} - 70$ ($r^2=0.81$, $p<0.001$), y b) Lote 2, $EUA_g = 36C_{AN} - 11$ ($r^2=0.65$, $p<0.01$), $EUN_{dg} = -86C_{AN} + 114ZM1L2 + 106ZM2L2 + 104ZM3L2$ ($r^2=0.89$, $p<0.01$). En los modelos ajustados, ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1, ZM4L1, ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2, son variables dummy que toman valor 0 o 1, para cada ZM en particular el resto de las ZM toma un valor de 0. Las flechas rojas indican los niveles de CAN en los que la EUA_g y EUN_{dg} se optimizan en cada una de las ZM.

La existencia de relaciones inversas para la EUA_g y la EUN_{dg} en función de la C_{AN} , permitió determinar un valor de C_{AN} donde la EUN_{dg} y EUA_g se optimizan. Este valor de C_{AN} representaría el nivel de co-limitación en la cual se logra un equilibrio entre la disminución de la EUA y el incremento en la EUN . En el Lote 1, los niveles de C_{AN} donde se optimizaron la EUA_g y EUN_g fueron de 0.91, 0.85, 0.71 y 0.88 para la ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1 y ZM4L1, respectivamente. La EUA_g para esos valores de C_{AN} fue de 14, 12, 9 y 13 $kg\ mm^{-1}$ y la EUN_{dg} fue de 34, 31, 21 y 32 $kg\ kg\ N^{-1}$, en la ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1 y ZM4L1, respectivamente.

En el Lote 2 el nivel de C_{AN} en el que se optimizan la EUA_g y EUN_{dg} resultó de 0.88, 0.82 y 0.81 para la ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente. Las eficiencias alcanzadas con esos niveles de C_{AN} fueron de 21, 18 y 18 $kg\ mm^{-1}$ para la EUA_g y de 38, 33 y 32 $kg\ kg\ N^{-1}$ para la EUN_{dg} , en la ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente.

Los valores de C_{AN} en los que obtiene la mejor combinación de EUA_g y EUN_g se corresponden con un determinado valor de N_d , el que puede utilizarse para realizar una recomendación de fertilización por ZM. En el Lote 1, el N_d que se corresponde con los niveles de C_{AN} en los que se optimizan las eficiencias resultó de 136, 174, 299 y 161 $kg\ N\ ha^{-1}$, para la ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1 y ZM4L1, respectivamente. Mientras que en el Lote 2, los niveles de N_d fueron de 258, 220 y 215 $kg\ N\ ha^{-1}$, en la ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2, respectivamente.

4.3.3. Sensibilidad de la EUA y EUN_d a la C_{AN}

Tanto la EUA como la EUN_d se relacionaron linealmente con la C_{AN} , una mayor pendiente aumenta la capacidad de detectar cambios en la eficiencia ante cambios en la C_{AN} , i.e., la sensibilidad de la variable y a los cambios en la variable x . Adicionalmente es deseable un buen ajuste de la regresión. De acuerdo con esto el índice de sensibilidad (Tabla 4.3.5) propuesto por Viña y Gitelson (2005), tiene en cuenta la pendiente y el RMSE. En el Lote 1 la EUA_b y EUA_g tuvieron similar sensibilidad a la C_{AN} , resultando más sensibles que la EUN_{db} y EUN_{dg} a las variaciones en la C_{AN} , mientras que en el Lote 2, la EUA_b , EUA_g y EUN_{db} tuvieron la misma sensibilidad a los cambios en la C_{AN} , siendo más sensibles que la EUN_{dg} (Tabla 4.3.5).

Tabla 4.3.5. Pendiente de la relación de la eficiencia de uso de agua en biomasa y grano (EUA_b y EUA_g) con la co-limitación de agua y N (C_{AN}) y de la eficiencia de uso de N en biomasa y grano (EUN_{db} y EUN_{dg}) con la C_{AN} , raíz del cuadrado medio de la regresión (RMSE) y sensibilidad de la EUA y la EUN_d a la C_{AN} .

	Variable	Pendiente	RMSE	Sensibilidad
Lote 1	EUA_b	176.6	79	0.45
	EUA_g	57.4	26	0.44
	EUN_{db}	-6.5	57	-8.73
	EUN_{dg}	-7.3	22	-3.06
Lote 2	EUA_b	63.0	23	0.37
	EUA_g	35.7	13	0.37
	EUN_{db}	-188.5	70	-0.37
	EUN_{dg}	-86.2	67	-0.78

4.4. DISCUSIÓN

Las limitaciones de agua y N (L_A y L_N) mostraron, en general, rangos más amplios a los reportados en estudios previos (Cossani et al., 2010; Sadras y Roget, 2005; Sadras, 2004). Las condiciones experimentales evaluadas, en especial las diferencias climáticas observadas entre los sitios y años del estudio, generaron limitaciones de agua contrastantes. En un caso, (Lote 1) la limitación de agua abarcó un rango amplio debido a que las precipitaciones fueron un 25% inferiores a la normal, por otro lado, en la siguiente campaña (Lote 2), las precipitaciones fueron un 23% mayor a lo normal para el período de crecimiento del maíz, reduciendo la limitación de agua (Tabla 2.5.1). Por otra parte, el amplio rango explorado de Nd generado mediante los tratamientos de fertilización nitrogenada y las diferencias de suelo, extendió el rango de las limitaciones de N.

De acuerdo a lo expuesto por Kho (2000) los coeficientes de limitación varían con el cultivo, el tiempo y el manejo, así como el suelo y el clima de cada ambiente determinan principalmente el balance de la disponibilidad de recursos. Dentro de las escasas referencias para este tipo de análisis, éste autor estudió la limitación de nitrógeno y fósforo en mijo (*Panicum miliaceum L.*) sobre suelos arenosos en Nigeria, reportando L_N promedio de 0.38, estimadas a partir de datos experimentales.

Cálculos realizados a partir de resultados presentados por Kim et al. (2008) en un estudio para maíz con diferentes niveles de riego y dosis de N, permitieron estimar las L_A y L_N , las que en promedio resultaron de 0.13 y 0.23, respectivamente, con un rango de C_{AN} similar al determinado en este estudio entre 0.6 y 1. Referencias sobre secuencias intensificadas de trigo y canola en Australia (Sadras y Roget 2005) reportaron L_A entre 0.1 y 0.18 y L_N entre 0.32 y 0.48, con un rango de limitaciones menor al explorado en este trabajo a pesar de tratarse de un ambiente más restrictivo.

La limitación máxima y la limitación total de agua y N, halladas para el cultivo de maíz resultaron menores a las reportadas por Sadras (2004) para trigo en ambientes semiáridos del sur de Australia, a pesar de esto, los rangos explorados en este estudio de limitación máxima y total, fueron más amplios que los de este autor. Cossani et al. (2010) informaron limitaciones máximas mayores a las observadas en el presente trabajo, entre 0.48 y 0.83, y limitaciones totales entre 0.85 y 1.57, aunque resulta llamativo que la limitación total sea superior a 1, ya que, según lo demostrado por Kho (2000) la suma de las limitaciones de todos los recursos debe resultar cercana a 1, y de acuerdo a esto si la limitación de un recurso aumenta la de los otros debería disminuir.

El recurso que explicó en mayor medida las variaciones en la C_{AN} en ambos Lotes fue el N a través de la L_N . Asimismo, en el Lote 2 representó en todos los casos la limitación máxima. El efecto del N aportado por los tratamientos de fertilización fue mayor que las variaciones espaciales determinadas en la disponibilidad de agua. Las limitaciones se asociaron negativamente entre sí en el Lote 1, i.e. L_A aumentó a medida que L_N disminuyó de acuerdo con lo que plantea Kho (2000). En contraste, en el Lote 2, la asociación entre L_A y L_N fue positiva, con aumentos simultáneos en la limitación de N y agua.

En los dos casos evaluados, la EUN disminuyó ante incrementos de L_A mientras que la EUA se incrementó ante disminuciones en la L_N . De manera similar, Fusheng et al. (2003) registraron que la EUN en trigo se redujo con la limitación de agua. En el mismo sentido Kim et al. (2008), indican que existen relaciones sinérgicas entre el agua y el N, i.e. el riego aumenta la EUN y el N aumenta la EUA.

A diferencia de los resultados reportados en la bibliografía acerca de la C_{AN} (Sadras, 2004; Sadras y Roget, 2005) en los que sólo se verifica una relación significativa entre la C_{AN} y la EUA o entre las limitaciones y las eficiencias (Cossani et al., 2010), los resultados de este trabajo muestran que la C_{AN} se asoció estrechamente tanto con la EUA como con

la EUN_d . Quizás esto se deba a que el rango de limitaciones explorado fue mayor, ya que los años fueron contrastantes en cuanto a la disponibilidad hídrica ampliando el rango de L_A y la fertilización amplió la L_N , lo que probablemente permitió hallar relaciones significativas entre la C_{AN} y las eficiencias.

Sadras (2004) determinó que el rendimiento del cultivo de trigo estimado de acuerdo a Frech y Schulz (1984), se acercó al rendimiento alcanzable en el ambiente estudiado cuando la co-limitación fue más alta. En un estudio realizado con modelos de simulación de cultivos, Sadras y Roget (2005) hallaron que la producción de biomasa y el rendimiento en grano están estrecha e inversamente relacionados a la diferencia entre las limitaciones de N y agua, es decir a la disminución de la co-limitación. Cossani et al. (2010) estudiaron el efecto de la co-limitación de agua y N sobre el rendimiento y las eficiencias de uso de estos recursos en los cultivos de trigo y cebada, y reportaron que la EUA y la brecha de rendimiento (Rendimiento potencial – rendimiento actual) se relacionaron positivamente con la C_{AN} , sugiriendo que los recursos son usados más eficientemente cuando existe un balance en las disponibilidades.

Las relaciones inversas entre la C_{AN} y la EUA y EUN_d , permitieron determinar los niveles de C_{AN} en los que se optimizan las eficiencias. En los sistemas de producción en secano el N es un recurso fácilmente manejable, considerando el concepto de C_{AN} , sería posible ajustar el Nd por ZM, optimizando las EUA y EUN_d . De acuerdo con esto, se determinaron los niveles de Nd que se corresponden con la C_{AN} en la que se optimizó EUA y EUN_d (Figura 4.3.2), observándose variaciones del Nd de acuerdo con la ZM. La determinación de la dosis de acuerdo con curvas de respuesta por zonas de manejo, es una metodología con la que sólo se optimiza la eficiencia de uso del N, determinando la dosis de acuerdo con la C_{AN} es posible optimizar tanto EUN_d como EUA, y la recomendación dependerá del nivel de mineralización y de nitratos a la siembra.

Debido a que las relaciones halladas entre EUA y EUN_d con C_{AN} , difirieron entre los Lotes evaluados, i.e. en el Lote 1 el cultivo de maíz fue más eficiente en usar el N con el aumento de la co-limitación pero menos eficiente en usar el agua, mientras que en el Lote 2, el cultivo fue más eficiente en usar el agua y menos eficiente en usar el N con el aumento de la co-limitación; la relación entre las eficiencias y la C_{AN} podría variar no solo espacialmente sino también temporalmente. Realizar un estudio de la variación temporal de la C_{AN} y las eficiencias de uso de agua y N permitirá evaluar si la C_{AN} puede usarse para predecir los cambios en las eficiencias, así como su utilidad para la toma de decisiones de manejo.

Los antecedentes en los que se ha estudiado la co-limitación de agua y N, reconocen que la metodología de cálculo de la C_{AN} posee como limitante la falta de independencia de los datos para la estimación de las limitaciones y las eficiencias. Respecto a esto, Cossani et al. (2010) aclararon que su análisis no evitó totalmente la no independencia, remarcando que la escasez de trabajos que reporten valores de co-limitación a partir de datos observados es principalmente debida a la dificultad de evitar la circularidad de los datos. Refiriéndose a esto, Sadras (2004) afirmó que este error puede removerse parcialmente mediante el uso de modelos de simulación para el cálculo de la C_{AN} , debido a que los índices de estrés de agua y N estimados por los modelos son parcialmente independientes de las respuestas medidas del cultivo. De todas maneras, el autor afirma que esto no resuelve completamente el problema, ya que para realizar las simulaciones se necesitan datos medidos de las condiciones iniciales del suelo. Debido a que los resultados hallados muestran una potencial utilidad de la C_{AN} en el ajuste de N por ZM, sería útil hallar una manera de determinarla a partir de datos medidos, como podrían ser la disponibilidad de agua y N al inicio del cultivo.

4.5. CONCLUSIONES

Las eficiencias de uso de agua y nitrógeno se asociaron estrechamente con la co-limitación de agua y N. La EUA resultó más sensible a los cambios en la C_{AN} , estos resultados concuerdan con la hipótesis planteada en este capítulo acerca de que la EUA resultaría más sensible que la EUN_d al grado de co-limitación.

La relación entre la EUA y EUN con la C_{AN} , difirió entre los Lotes evaluados. En el Lote 1 el aumento de la co-limitación generó aumentos en la EUN_d y disminuciones en la EUA, mientras que la relación de la C_{AN} con las eficiencias se invirtió en el Lote 2 donde el aumento de la co-limitación generó aumentos en la EUA y disminuciones en la EUN_d .

CAPÍTULO 5

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA CO-LIMITACIÓN DE AGUA Y NITRÓGENO: EFECTO SOBRE LA EFICIENCIA DE USO DEL AGUA Y DEL NITRÓGENO

5.1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad espacial del rendimiento de un cultivo resulta de numerosas interacciones entre diversos factores como las propiedades de suelo, el clima, la disponibilidad de nutrientes y el manejo (Mamo et al., 2003, Basso et al., 2001). Para el manejo de dicha variabilidad por zonas también es importante considerar los efectos temporales de la variabilidad climática en la expresión de la misma (Schepers et al., 2004).

En efecto, la variabilidad temporal puede influenciar la expresión de la variabilidad espacial (Mamo et al., 2003) y la respuesta del cultivo a las prácticas de manejo. La magnitud de la variabilidad temporal respecto de la espacial, condiciona el uso de prácticas de agricultura de precisión, si esta supera a la variabilidad espacial, se asume que el rendimiento del cultivo está principalmente gobernado por las condiciones climáticas (Whelan y McBratney, 2000).

La disponibilidad de los recursos que principalmente limitan al cultivo de maíz, agua y N, varían espacial y temporalmente, generando limitaciones de agua y N variables. Sería esperable la existencia de variaciones espaciales de la co-limitaciones que a su vez, generen variaciones espaciales en la eficiencia de uso de agua (EUA) y del N (EUN).

Debido a que la evaluación de las interacciones entre suelo, clima y manejo del N, para conocer las relaciones entre la EUA, EUN y el efecto del grado de co-limitación de agua y N, requeriría de numerosos experimentos de campo realizados a largo plazo, el uso de modelos de simulación se presenta como una solución (Batchelor et al., 2002). Existe abundantes antecedentes que evalúan efectos de la variabilidad espacio-temporal en la productividad de los cultivos y como herramienta para optimizar el uso de insumos (Sadler et al., 2000b; Batchelor et al., 2002; Rinaldi et al., 2004; Basso et al., 2006; Miao et al., 2006; Oliver et al., 2010). En los últimos 20 años los modelos de simulación han probado ser una herramienta valiosa para acortar significativamente el proceso experimental que se necesita para mejorar las estrategias de manejo de cultivos en secano, a través de simulaciones de largo plazo (López Cedron et al., 2008).

Existen numerosos modelos de simulación que han sido evaluados y utilizados satisfactoriamente en diferentes lugares del mundo (Ritchie y Otter, 1985; Jones y Kiniry, 1986, Jones et al., 2003). Entre ellos, el modelo SALUS (System Approach to Land Use Sustainability) fue desarrollado a partir de DSSAT (serie CERES) (Jones et al., 2003), los algoritmos de CERES fueron reestructurados en módulos de crecimiento de cultivo vinculados con los submodelos de agua en el suelo, nutrientes y manejo. SALUS está programado en lenguaje "C" para que la asignación de memoria sea más dinámica y el código del programa más plataforma independiente (Basso et al., 2012). Este modelo ha sido evaluado en distintos sitios de Italia (Basso et al., 2010; Bertocco et al., 2008) y Estados Unidos (Dzotsi et al., 2013) probando su capacidad para simular el rendimiento del cultivo en diversas condiciones climáticas, de suelo y de cultivo. SALUS también ha sido utilizado para la optimización de dosis de N de acuerdo a ZM en maíz (Basso et al., 2012) y trigo (Basso et al., 2011).

Si bien los modelos no pueden simular cada posición en un lote, estos han sido empleados en agricultura de precisión. Así Paz et al. (1999) los emplearon para simular el rendimiento en una grilla y determinar dosis variables en maíz, mientras que Basso et al. (2001) simuló el rendimiento en diferentes zonas de manejo delineadas a partir de índices de vegetación. De acuerdo con estos antecedentes, los modelos de simulación pueden utilizarse para estimar la variabilidad espacial y temporal (Basso et al., 2011) de la C_{AN} y su efecto sobre las EUA y EUN, así como para evaluar diferentes estrategias de fertilización con N tendientes a optimizar las eficiencias por zonas de manejo.

El objetivo de este trabajo fue estimar mediante simulaciones de largo plazo, el impacto del manejo de la fertilización con N sobre el grado de co-limitación de agua y N y las EUA y EUN en ZM delimitadas en dos lotes de producción.

5.2. MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1. Descripción del modelo de simulación SALUS (*System Approach to Land Use Sustainability*)

El modelo de simulación de cultivos SALUS ha sido diseñado para simular condiciones de cultivos, suelo, agua y nutrientes bajo diferentes estrategias de manejo para una serie de años (Figura 5.2.1). Las estrategias de manejo pueden incluir rotaciones de cultivo, fechas de siembra, densidad de siembra, riego y fertilización.

El modelo biofísico está compuesto por tres componentes estructurales (Figura 5.2.1) principales:

- i) módulos de crecimiento de cultivo,
- ii) módulo de materia orgánica del suelo y ciclado de nutrientes,
- iii) módulo de balance hídrico y temperatura.

El balance hídrico considera el escurrimiento superficial, infiltración, flujo de agua saturado y no saturado, drenaje, absorción de agua por el cultivo, evaporación de suelo, y transpiración. Las rutinas de MO y nutrientes, simulan la descomposición de la MO, mineralización de N y formación de amonio y nitrato, inmovilización de N, pérdidas gaseosas de N, y tres pools de P. El desarrollo y crecimiento del cultivo considera las condiciones ambientales (particularmente, radiación y temperatura) para calcular las tasas potenciales de crecimiento de la planta. Este crecimiento es reducido por las limitaciones de agua y N.

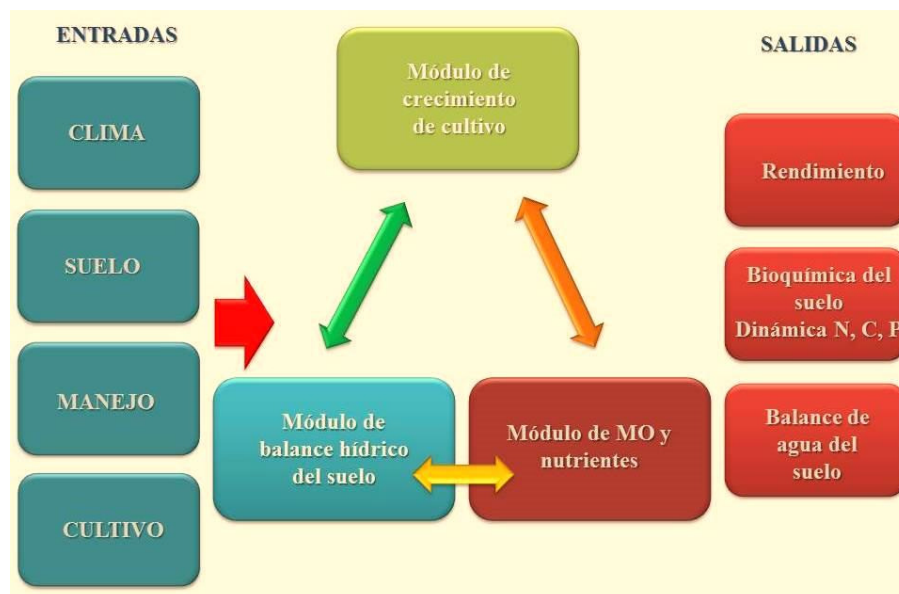


Figura 5.2.1. Esquema de componentes modelo de simulación de cultivos SALUS; entradas, módulos y salidas.

Los módulos de crecimiento de cultivo derivan de la familia de modelos CERES (Jones et al., 1998). SALUS ha sido programado en lenguaje "C" a diferencia de DSSAT

que usa Fortran. Las principales entradas al modelo para las rutinas de crecimiento del cultivo son los coeficientes genéticos (variedad-específicos) y la radiación solar como una variable conductora. Los módulos de MO y N derivan del modelo Century (Parton et al., 1994).

SALUS no incluye submodelos para predecir pérdidas por enfermedades y pestes, como tampoco la ocurrencia de eventos extremos (e.g. granizo).

El módulo de balance hídrico está basado en el que usan los modelos CERES, pero con algunas mejoras incorporadas para el cálculo de la infiltración y el escurrimiento. SALUS utiliza el concepto de time-to-ponding (tiempo al encharcamiento) (Ritchie et al., 2005) para los cálculos de infiltración y escurrimiento en reemplazo de los basados en el concepto de la curva número del Soil Conservation Service (SCS-CN).

Los datos climáticos requeridos por el modelo incluyen radiación solar incidente ($\text{MJm}^{-2} \text{ día}^{-1}$), temperatura máxima y mínima ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (mm); el paso temporal del modelo es diario.

Los datos de suelo requeridos por el modelo son composición textural, densidad aparente, materia orgánica y constantes hídricas de los diferentes horizontes de suelo. En el anexo (Tabla anexo 1) se detallan los valores utilizados en el estudio.

5.2.2. Datos climáticos y de suelo

La información climática necesaria para realizar las simulaciones se obtuvo de los registros de la estación meteorológica de la EEA INTA Paraná del período 1971-2013.

Los datos de suelo requeridos por el modelo se obtuvieron de la descripción del perfil modal de cada serie de suelo de la cartas de suelos de la EEA INTA Paraná (Van Barneveld, 1972), en los casos que el suelo presentó algún grado de erosión, se redujo el espesor de su horizonte superficial y la profundidad total a la que llega el suelo, sumado a esto, se modificó la conductividad hidráulica (Tabla Anexo 2, SWCN) de dicho horizonte para contemplar los efectos de la erosión hídrica (Tabla Anexo 2).

5.2.3. Calibración y validación

La calibración de los coeficientes genéticos se realizó mediante un procedimiento iterativo para minimizar la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) entre valores simulados y observados. Se optimizó de manera secuencial fenología, biomasa acumulada a R6, nitrógeno en grano y rendimiento, modificando los parámetros de mayor efecto sobre estas variables. De esta manera, se obtuvieron los coeficientes genéticos para el híbrido de maíz Nidera AX882 HCLMG mediante simulaciones que minimizaron la suma de cuadrados de las diferencias entre valores observados y simulados (Figura Anexo 1). Para esto se utilizaron datos provenientes de las ZM3L1 y ZM4L1 del Lote 1, adicionalmente se utilizaron datos de las parcelas regadas ubicadas en cada una de las ZM evaluadas con dos disponibilidades de N a la siembra N0 y N210, con la finalidad de ampliar el rango de variación en los rendimientos observados.

De manera similar, mediante sucesivas simulaciones se realizó la calibración de parámetros de suelo hasta minimizar la suma RMSE de las diferencias entre valores simulados y observados del contenido de agua en el suelo (Figura Anexo 1). Los parámetros de suelo fueron tomados de la carta de suelo de la EEA Paraná, en donde se describe el perfil tipo de cada serie de suelo, en el Lote 1 las diferencias de suelo están dadas por el grado de erosión de una misma serie de suelo (Tezanos Pinto, que fue descripta en el mismo Lote 1) por este motivo se optimizaron los distintos parámetros de suelo a través de sucesivas simulaciones hasta minimizar el RMSE. Los datos de suelo que se usaron para la simulación en cada lote y ZM, están detallados en la Tabla Anexo 2

Para la validación del modelo se utilizaron los resultados de las ZM1L1 y ZM2L1 del Lote 1 y de las tres ZM evaluadas en el Lote 2 (ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2). Para la

descripción de los estadios fenológicos del cultivo de maíz se utilizó la escala de Ritchie et al. (1986).

5.2.4. Evaluación del modelo de simulación

Los resultados simulados se compararon con los observados mediante regresiones lineales, ubicando los datos simulados en el eje x y los observados en el eje y (Piñeiro et al., 2008), se calculó la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}$$

donde, S_i es el valor estimado del i -ésimo dato, O_i el valor observado del i -ésimo dato y n el número de observaciones. Se calculó el porcentaje de error (%E) como:

$$\%E = \frac{RMSE}{\frac{\sum O_i}{n}}$$

Se realizó una prueba de hipótesis de que la pendiente de la relación simulado-observado es igual a 1 y la ordenada al origen igual a 0 (i.e. la función lineal obtenida es igual a la función $y=x$), utilizando el software IRENE (Fila et al., 2003).

5.2.5. Experimentos de simulación

Para cada lote y cada ZM se realizaron simulaciones considerando 4 niveles de N a la siembra: 70 kg N ha⁻¹ (70N: Ni_(0-60cm)+ N fertilizante), 140 kg N ha⁻¹ (140N: Ni_(0-60cm) + N fertilizante), 210 kg N ha⁻¹ (210N: Ni_(0-60cm) + N fertilizante) y un testigo (N0) al que no se le aplicó N (N=Ni). Donde Ni_(0-60cm) es el contenido de N de nitratos previo a la siembra de cultivo (profundidad 0 a 60 cm). Los niveles de Ni utilizados fueron los determinados en cada lote (Lote 1 y Lote 2) y cada ZM de las campañas evaluadas (2011/12 y 2012/13).

Para evaluar la variabilidad temporal se realizaron simulaciones para 41 años del período 1971-2012 de la serie de datos climáticos históricos de la EEA INTA Paraná.

5.2.6. Eficiencia de uso de agua y nitrógeno, limitación de agua y N y co-limitación

A partir de los resultados de la simulación, se estimó para cada Lote: la eficiencia de uso de N (EUN), la eficiencia de uso de agua (EUA), la limitación de agua (L_A), la limitación de N (L_N) y la co-limitación de agua y N (C_{AN}).

Las limitaciones de agua y N y la co-limitación se estimaron de acuerdo a lo detallado en sección 4.2.4 del Capítulo 4.

La eficiencia de uso de nitrógeno en grano (EUN_g, kg grano kg de N⁻¹) se calculó como el cociente entre la respuesta del cultivo a N (Kg grano ha⁻¹) y el N aplicado (kg N ha⁻¹) (Doberman, 2007). Siendo la respuesta a N la diferencia entre el rendimiento simulado del tratamiento con agregado de N (N70, N140 o N210) y el rendimiento simulado del tratamiento sin el agregado de N (N0). La eficiencia de uso de agua (EUAg, kg grano mm⁻¹) se calculó como el cociente entre el rendimiento simulado del cultivo (kg grano ha⁻¹) y la lámina de agua evapotranspirada simulada durante el período de crecimiento del cultivo.

5.2.7. Análisis de resultados

A partir de los resultados de las simulaciones de largo plazo se elaboraron histogramas de frecuencias para construir curvas de frecuencia acumulada de EUA, EUN, L_A, L_N y C_{AN}. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) considerando a los años como repeticiones, en los casos en que se detectaron efectos significativos se compararon las medias de los tratamientos de fertilización mediante un test de LSD ($\alpha = 0.05$).

La variabilidad temporal (entre años) y espacial (entre ZM) por tratamiento se analizó mediante los coeficientes de variación (CV) (Blackmore et al., 2000). Los CV para evaluar la variabilidad temporal se estimaron como la relación entre el desvío estándar (DE)

y el promedio de los 41 años simulados de la combinación de tratamiento de fertilización (ZMxN). La variabilidad espacial se estimó como la relación entre el DE y el promedio de 42 años entre las ZM de cada tratamiento de fertilización (N0, N70, N140 y N210).

Para determinar si la relación entre EUA y EUN con la C_{AN} encontrada en la sección 4.3.2 del Capítulo 4 es estable a través del tiempo, se estudió la asociación entre variables mediante análisis de regresión para cada año del período simulado (1971-2012) y en cada zona de manejo, en los casos que las relaciones fueron significativas en todas las ZM se realizó una regresión con un único modelo por año para corroborar si este explica la relación de la misma manera que un modelo por zona.

Los histogramas de frecuencia se realizaron con el software Statistix 9 (Copyright^(C) 1985-2008, Student Edition) y los análisis de regresión con el software InfoStat (Di Renzo et al., 2002).

5.3. RESULTADOS

5.3.1. Validación del modelo: Variables de cultivo y balance hídrico

En general, el modelo simuló adecuadamente las variables evaluadas, como puede verse en la comparación de los datos simulados y observados de la Figura 5.3.1. La simulación de la fenología del cultivo fue realizada con un 3% de error respecto al promedio observado, observándose una sobrestimación en general (RMSE=11 días) (Figura 5.3.1a). El rendimiento, la biomasa y el N_g fueron simulados con un RMSE 738, 1626 y 28 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 5.3.1b, c y d). El contenido de agua en el suelo a lo largo del período de crecimiento del cultivo (RMSE=26 mm) y la ETC (RMSE= 50, 32 y 22 mm, para el período vegetativo, período centrado en floración y llenado de granos, respectivamente) fueron simulados adecuadamente (Figura 5.3.1e y f).

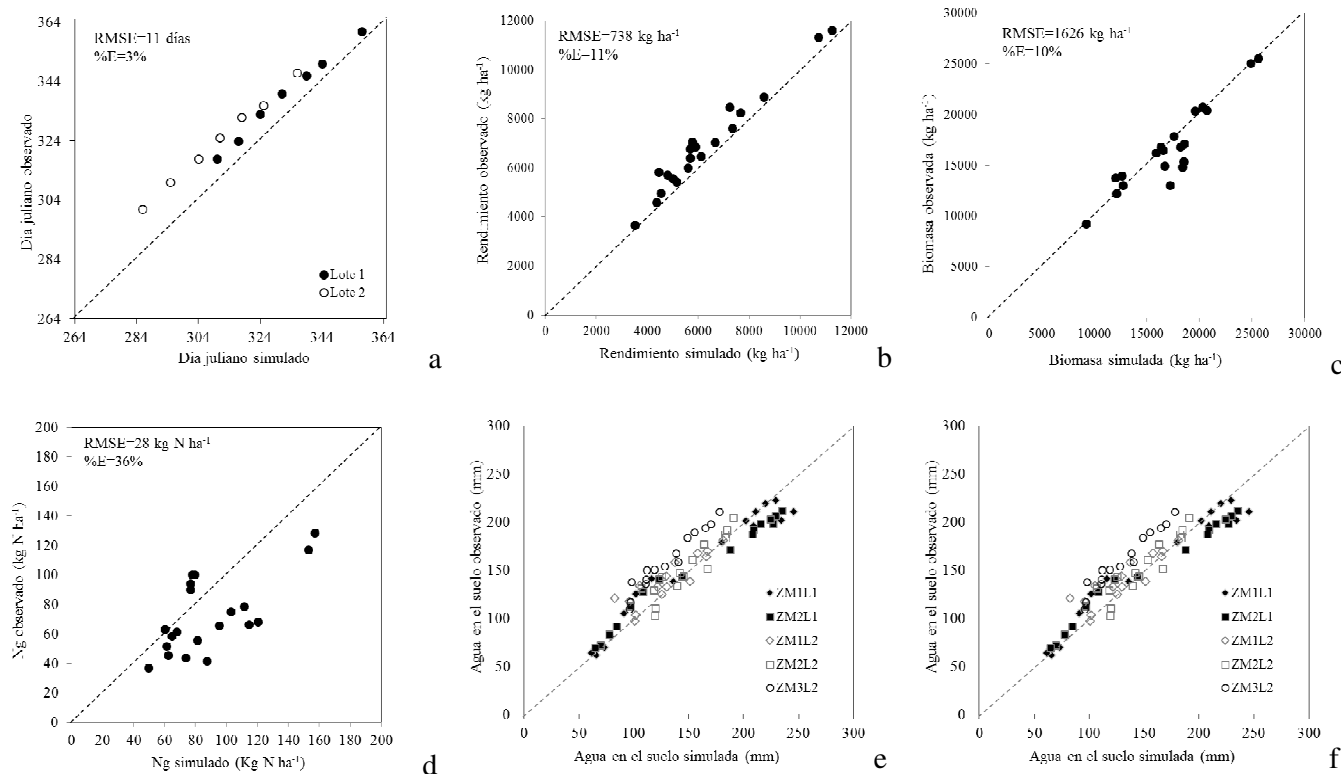


Figura 5.3.1. Resultados de la validación del modelo SALUS, a) fechas de ocurrencia de distintos estadios fenológicos de maíz simuladas y observadas (V4, V6, V8, V10, V12, V14 y R1) b) rendimiento simulado y observado, c) biomasa simulada y observada, d) nitrógeno acumulado en el grano (Ng) simulado y observado, e) contenido de agua acumulado en el suelo hasta 160cm (Lote 1) y 100cm (Lote 2) en distintas fechas del ciclo del cultivo y f) Evapotranspiración acumulada simulada y observada en diferentes períodos de la estación de crecimiento del cultivo de maíz (vegetativo, floración y llenado de granos). En b, c, d y f, se incluyeron todos los tratamientos evaluados en los ensayos de fertilización nitrogenada (N0, N70, N140, y N210) de las ZM1L1, ZM2L1, ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2. En e: se muestra el agua acumulada en el tratamiento testigo (N0) en las 5 ZM seleccionadas para la validación del modelo, símbolos llenos: Lote 1 y símbolos vacíos: Lote 2. La línea punteada representa la relación 1:1. RMSE: raíz del cuadrado medio del error, %E: porcentaje de error respecto al promedio observado.

Las regresiones entre valores simulados y observados de rendimiento, biomasa y Ng fueron significativas ($p < 0.05$) y tanto las pendientes como las ordenadas al origen de las relaciones no difirieron significativamente de 1 y 0 ($p > 0.05$), respectivamente (Tabla 5.3.1).

Tabla 5.3.1. Coeficiente de determinación (r^2), coeficientes de la regresión lineal entre valores observados y simulados, prueba de ordenada al origen (a) igual a 0 y pendiente (b) igual a 1.

Variable	r^2	Regresión	
		b	a
Fenología (días)	0.99	0.86***	57 ^{ns}
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	0.98	0.99 ^{ns}	650 ^{ns}
Biomasa (kg ha ⁻¹)	0.92	0.99 ^{ns}	-430 ^{ns}
Ng (kg N ha ⁻¹)	0.66	0.86 ^{ns}	-4.1 ^{ns}
Contenido de agua (mm)	0.86	0.84***	33 ^{ns}
ETC (mm)	0.89	1.5***	-53 ^{ns}

^{ns}, ***, indica no significativo y $p < 0.001$, respectivamente.

El modelo simuló aceptablemente la evolución del contenido de agua en el suelo en los dos Lotes evaluados y en las diferentes ZM delimitadas en cada lote (Figura 5.3.2 y Figura 5.3.3). En las simulaciones del Lote 1, el modelo sobrestimó el contenido de agua al comienzo del ciclo del cultivo en las 4 ZM consideradas, siendo más marcada la sobrestimación en la ZM4L1 (Figura 5.3.2.d). A pesar de esto, la evolución del contenido de agua simulado durante el ciclo del cultivo, siguió el mismo patrón del contenido de agua observado.

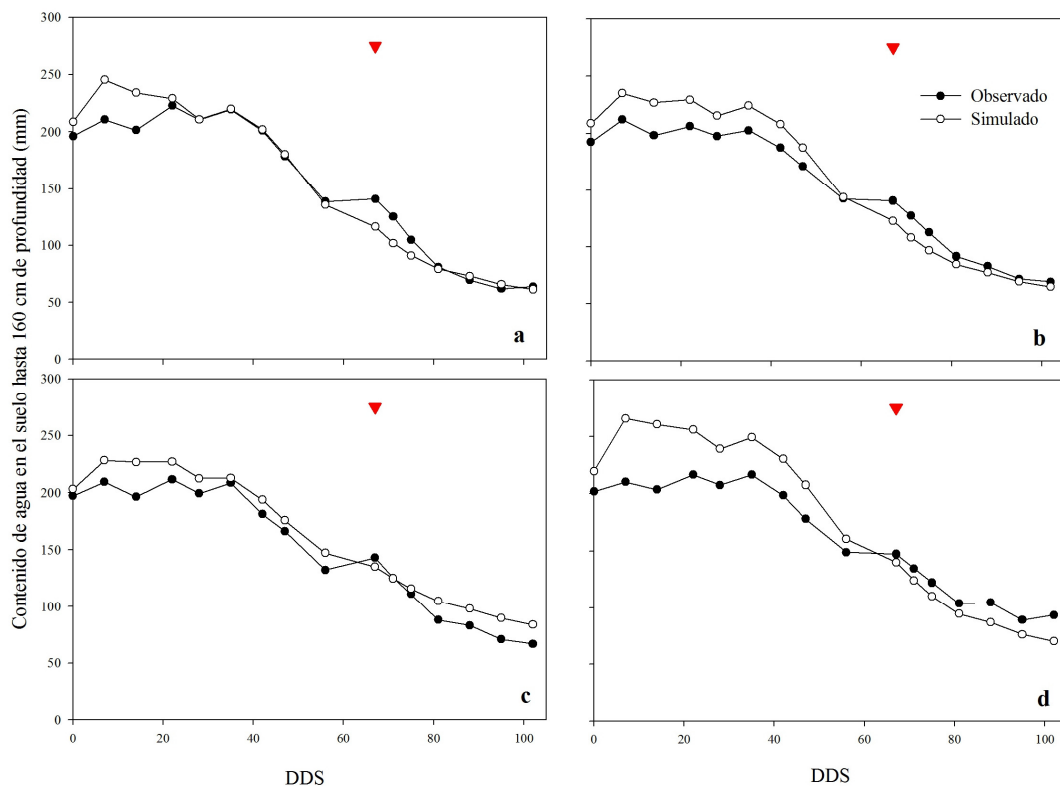


Figura 5.3.2. Evolución del contenido de agua en el suelo (mm) observado y simulado hasta 160cm de profundidad en el tratamiento N0 desde la siembra hasta la madurez en días desde la siembra (DDS) del cultivo de maíz en el Lote 1, a) ZM1L1, b) ZM2L1, c) ZM3L1 y d) ZM4L1. Círculos llenos: datos observados, círculos vacíos: datos simulados con el modelo SALUS. La flecha roja indica la fecha observada de R1 (floración, Ritchie et al., 1986).

El modelo simuló adecuadamente el contenido de agua en el perfil de suelo de las 3 ZM evaluadas en el Lote 2 (Figura 5.3.3). Sin embargo, se observó una subestimación del contenido de agua al comienzo de la estación de crecimiento del cultivo en la ZM2L2 (Figura 5.3.3.b) y durante gran parte del ciclo en la ZM3L2 (Figura 5.3.3.c), siendo la tenencia de la evolución del agua en el suelo simulada similar a la observada.

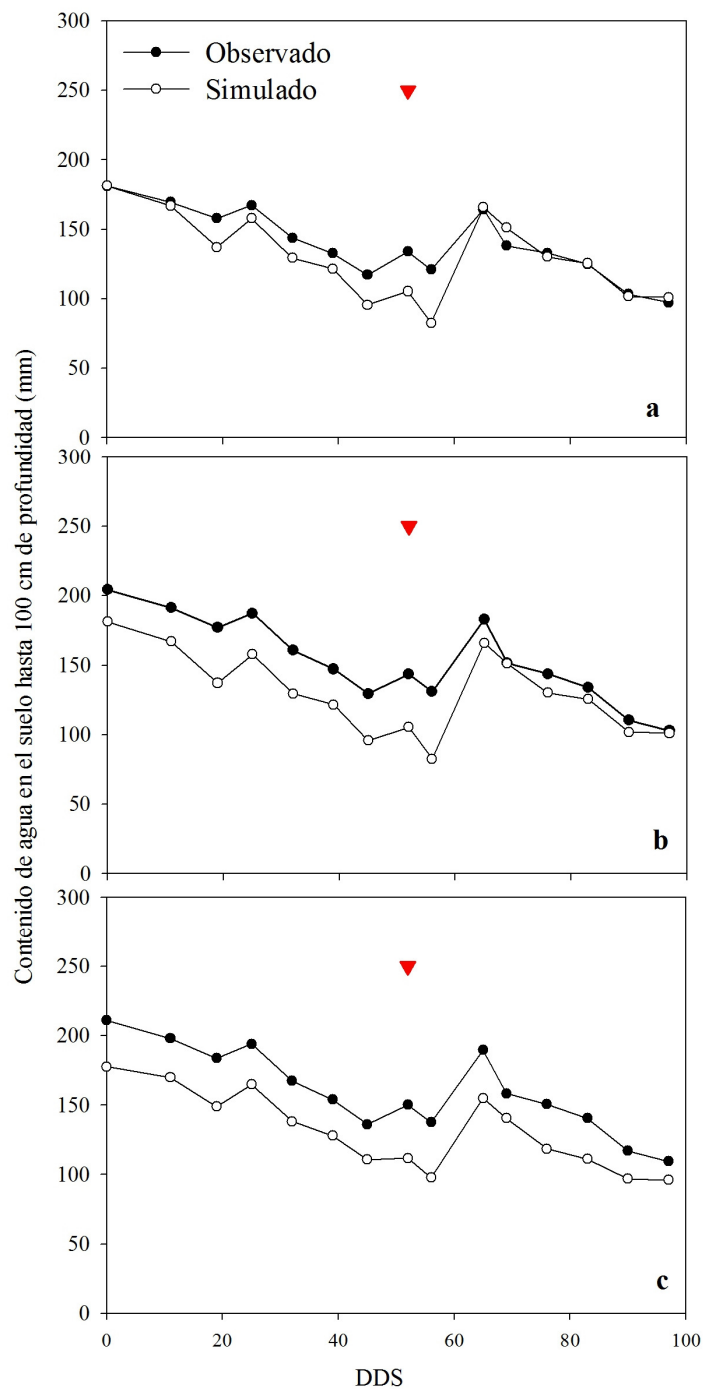


Figura 5.3.3. Evolución del contenido de agua en el suelo (cm) observado y simulado hasta 100cm de profundidad en el tratamiento N0 desde la siembra hasta la madurez (días desde la siembra, DDS) del cultivo de maíz en el Lote 2, a) ZM1L2, b) ZM2L2 y c) ZM3L2. Círculos llenos: datos observados, círculos vacíos: datos simulados con el modelo SALUS. La flecha roja indica la fecha observada de R1 (floración, Ritchie et al., 1986).

5.3.2. Simulación a largo plazo de experimentos de fertilización nitrogenada por ZM

El rendimiento simulado fue afectado significativamente por efecto de N y la ZM ($p < 0.001$). Para el período simulado de 41 años (1971-2012) el rendimiento promedio del Lote 1 en las 4 ZM, abarcó un rango entre 1500 y 10980 kg ha⁻¹. En general, el tratamiento sin agregado de N a la siembra (N0) tuvo rendimientos más estables a través del tiempo, y la variabilidad aumentó con la dosis de fertilización (i.e. CV N70 < CV N140 < CV N210) (Figura Anexo 2 a, c, e, g).

Si bien no se detectó una interacción significativa, la ZM4L1 alcanzó respuestas mayores que las otras ZM, y en el 50% de los años es esperable que superen 1750, 3500 y 3700 kg ha⁻¹, con N70, N140 y N210, respectivamente

La variabilidad espacial, estimada como la variación entre ZM (Tabla 5.3.2), fue de 22, 23, 26 y 27% para los tratamientos N0, N70, N140, N210, respectivamente, resultando levemente mayor a la variabilidad temporal en todas las ZM excepto en la ZM3L1. Como puede notarse, la variabilidad espacial se incrementó con la dosis de N. Sin embargo, la variabilidad espacial de la respuesta del cultivo a N, mostró mayores diferencias con la variabilidad temporal (Tabla 5.3.2).

Tabla 5.3.2. Rendimiento medio y respuesta media de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 4 ZM delimitadas en el Lote 1. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.

	Rendimiento (kg ha ⁻¹)				Respuesta(kg ha ⁻¹)		
	N0	N70	N140	N210	N70	N140	N210
ZM1L1	4131 (20)*	5550 (21)	7130 (24)	7623 (25)	1419 (39)	2999 (44)	3492 (47)
ZM2L1	4224 (21)	5582 (21)	6519 (23)	7566 (26)	1358 (38)	2295 (42)	3343 (50)
ZM3L1	3381 (20)	4691 (23)	5576 (27)	6442 (33)	1310 (50)	2195 (52)	3060 (62)
ZM4L1	4234 (19)	5907 (20)	7486 (21)	7948 (22)	1674 (33)	3252 (38)	3715 (40)
Promedio	3992 (22)**	5433 (23)	6678 (26)	7395 (27)	2258 (64)	2672 (54)	2685 (59)

* CV entre años, representa la variabilidad temporal. ** CV entre ZM, representa la variabilidad espacial.

El rendimiento simulado para las 3 zonas de manejo evaluadas en el Lote 2, estuvo comprendido entre 1756 y 7267 kg ha⁻¹ (Tabla 5.3.3). Se verificó interacción significativa (ZMxN, $p < 0.05$) sobre el rendimiento y la respuesta simulada en el Lote (Tabla Anexo 7). La variabilidad temporal fue menor para los tratamientos N0 y N70, observándose un aumento de la variabilidad en las dosis mayores (N140 y N210) (Figura Anexo 3).

El rendimiento promedio de la ZM1L2 fue de 5986 kg ha⁻¹, con una variabilidad temporal entre 21 y 28% (Tabla 5.3.3). La respuesta esperada en el 50% de los años superó los 1100, 2500, 2800 kg ha⁻¹, para N70, N140 y N210, respectivamente (Figura Anexo 3b). La ZM2L2 mostró una menor variabilidad temporal (17-24%), alcanzándose rendimientos medios de 4073 kg ha⁻¹. La respuesta fue similar a la ZM1L2, pero mayor en la dosis N210 (i.e. interacción ZMxN significativa, Tabla Anexo 7) en la que se pueden alcanzar respuestas superiores a los 3000 kg ha⁻¹ en el 50% de los años (Figura Anexo 3d). La ZM3L2 alcanzó rendimientos medios simulados de 3640 kg ha⁻¹, los que variaron temporalmente hasta un 30% (Tabla 5.3.3). La respuesta en esta ZM, en general fue mayor, pudiendo superarse en el 50% de los años los 1000, 2500 y 4500 kg ha⁻¹, en el tratamiento N70, N140 y N210, respectivamente (Figura Anexo 3 f).

La variabilidad espacial fue de 36, 28, 31, y 30%, para N0, N70, N140 y N210, respectivamente (Tabla 5.3.3), siendo en general, mayor a la variabilidad temporal observada en las distintas ZM. A diferencia de lo observado en el Lote 1, donde la variabilidad espacial se incrementó con la dosis de N, en este lote la variabilidad espacial resultó mayor en el tratamiento testigo.

Tabla 5.3.3. Rendimiento medio y respuesta media de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 3 ZM delimitadas en el Lote 2. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.

	Rendimiento (kg ha ⁻¹)				Respuesta (kg ha ⁻¹)		
	N0	N70	N140	N210	N70	N140	N210
ZM1L2	4396 (21)*	5496 (23)	6786 (26)	7267 (28)	1136 (46)	2458 (47)	2961 (50)
ZM2L2	2569 (21)	3817 (17)	4409 (19)	5497 (24)	1272 (35)	1882 (36)	2997 (41)
ZM3L2	2364 (21)	3801 (18)	5316 (25)	6267 (30)	1459 (32)	2997 (39)	3969 (44)
Promedio	3110 (36)**	4371 (28)	5504 (31)	6344 (30)	1262 (41)	2394 (48)	3234 (50)

* CV entre años, representa la variabilidad temporal. ** CV entre ZM, representa la variabilidad espacial.

5.3.3. Variabilidad temporal de la EUA, EUN, limitaciones y C_{AN}

La EUAg y la EUNg simuladas para un período de 41 años variaron significativamente por efecto de la ZM y el N ($p < 0.001$) en los dos lotes simulados, sin verificarse interacción significativa ($p < 0.001$, Tabla Anexo 7).

En el Lote 1, la EUA promedio estuvo comprendida entre 10 y 20 kg grano mm⁻¹ y tuvo menor variabilidad temporal que la EUN (Tabla 5.3.4, Figura 5.3.4). En general, la variabilidad temporal de la EUA estuvo entre 19 y 28%, y la de la EUN entre 33 y 62%, siendo la variación mayor con el aumento de la dosis de fertilización. El efecto de la fertilización con N fue mayor sobre la EUA que sobre la EUN, lo que en la Figura 5.3.4 puede apreciarse en las diferencias entre las curvas de probabilidad acumulada, ya que las de EUA se separan más por efecto de la dosis de N que las de EUN.

La EUA promedio del tratamiento de fertilización N210 resultó 72, 35 y 5% mayor que las EUA de N0, N70 y N140, respectivamente (Tabla 5.3.4). En promedio, la EUA en las diferentes ZM fue de 16, 15, 14 y 16 kg mm⁻¹, para ZM1L1, ZM2L1, ZM3L1 y ZM4L1. La ZM3L1 se diferenció de las otras ZM por alcanzar EUA menores, las que además fueron más variables.

La EUN disminuyó 23 y 16% con el aumento de la dosis de fertilización, respecto a N140 y N210. Las menores eficiencias se alcanzaron en la ZM3L1, zona en la que también se verificó una mayor variabilidad temporal (50-62%).

Tabla 5.3.4. Eficiencia de uso de agua y de N promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 4 ZM delimitadas en el Lote 1. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.

	EUA (kg grano mm ⁻¹)				EUN (kg grano kg N ⁻¹)		
	N0	N70	N140	N210	N70	N140	N210
ZM1L1	11 (20)*	14 (20)	18 (22)	19 (23)	20 (39)	21 (44)	17 (47)
ZM2L1	11 (22)	15 (22)	17 (22)	20 (23)	19 (38)	16 (42)	16 (50)
ZM3L1	10 (22)	14 (23)	16 (24)	19 (28)	19 (50)	16 (52)	15 (62)
ZM4L1	11 (19)	15 (19)	19 (20)	20 (21)	24 (33)	23 (38)	18 (40)
Promedio	11 (21)**	14 (21)	18 (23)	19 (24)	21 (41)	19 (46)	16 (50)

* CV entre años, representa la variabilidad temporal. ** CV entre ZM, representa la variabilidad espacial

La EUA simulada promedio en el Lote 2, alcanzó valores menores que en el Lote 1, y estuvo entre 9 y 17 kg grano mm⁻¹. De manera similar a lo observado en el Lote 1, la EUN tuvo una mayor variabilidad temporal y espacial que la EUA (Tabla 5.3.5, Figura 5.3.5). La variabilidad temporal de la EUN osciló entre 35 y 50% y la espacial entre 48 y 53%, mientras que la variabilidad temporal de la EUA lo hizo entre 19 y 30%, y la variabilidad espacial entre 29 y 30%. De manera similar a lo obtenido en el Lote 1, la fertilización generó mayor impacto sobre la EUA que sobre la EUN. Como puede observarse en la Figura 5.3.5, en la que el N genera mayores diferencias en la probabilidad acumulada de la EUA que de la EUN. La variabilidad espacial de la EUA fue, en general, mayor que la variabilidad temporal. En la ZM1L2, la variabilidad temporal aumentó con la dosis de N, mientras que en las otras ZM no tuvo una tendencia en particular (Tabla 5.3.5).

La EUN en promedio varió entre 15 y 19 kg grano kg N⁻¹ y disminuyó con el aumento de la dosis de fertilización (Tabla 5.3.5, Figura 5.3.5). La variabilidad espacial, fue mayor a la variabilidad temporal, excepto en la ZM1L2 donde la variabilidad temporal fue similar a la variabilidad espacial en todas las dosis de N simuladas (Tabla 5.3.5).

Tabla 5.3.5. Eficiencia de uso de agua y de N promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 3 ZM delimitadas en el Lote 2. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de las dosis de N la variabilidad espacial.

	EUA (kg grano mm ⁻¹)				EUN (kg grano kg N ⁻¹)		
	N0	N70	N140	N210	N70	N140	N210
ZM1L2	12 (26)*	15 (28)	18 (29)	19 (30)	16 (46)	18 (47)	14 (50)
ZM2L2	8 (28)	11 (22)	13 (25)	16 (27)	18 (35)	13 (36)	14 (41)
ZM3L2	7 (23)	10 (19)	14 (23)	17 (26)	22 (36)	21 (43)	18 (48)
Promedio	9 (37)	12 (29)	15 (31)	17 (29)	19 (49)	18 (48)	15 (53)

* CV entre años, representa la variabilidad temporal. ** CV entre ZM, representa la variabilidad espacial

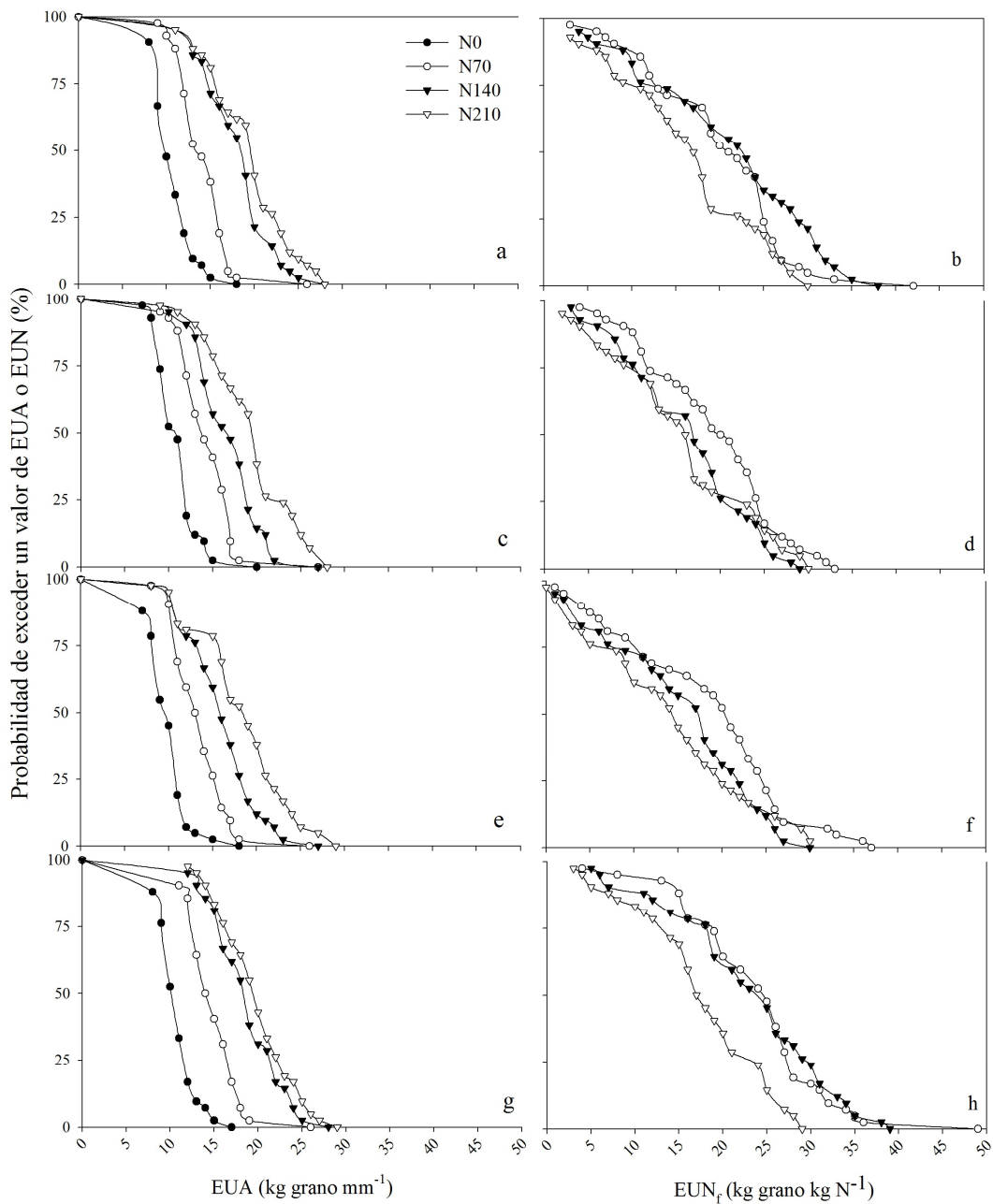


Figura 5.3.4. Probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un valor de EUA (a, c, e, g) o EUN_f (b, d, f, h) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha⁻¹) y 4 ZM del lote 1 a y b) ZM1L1, c y d) ZM2L1, e y f) ZM3L1 y g y h) ZM4L1.

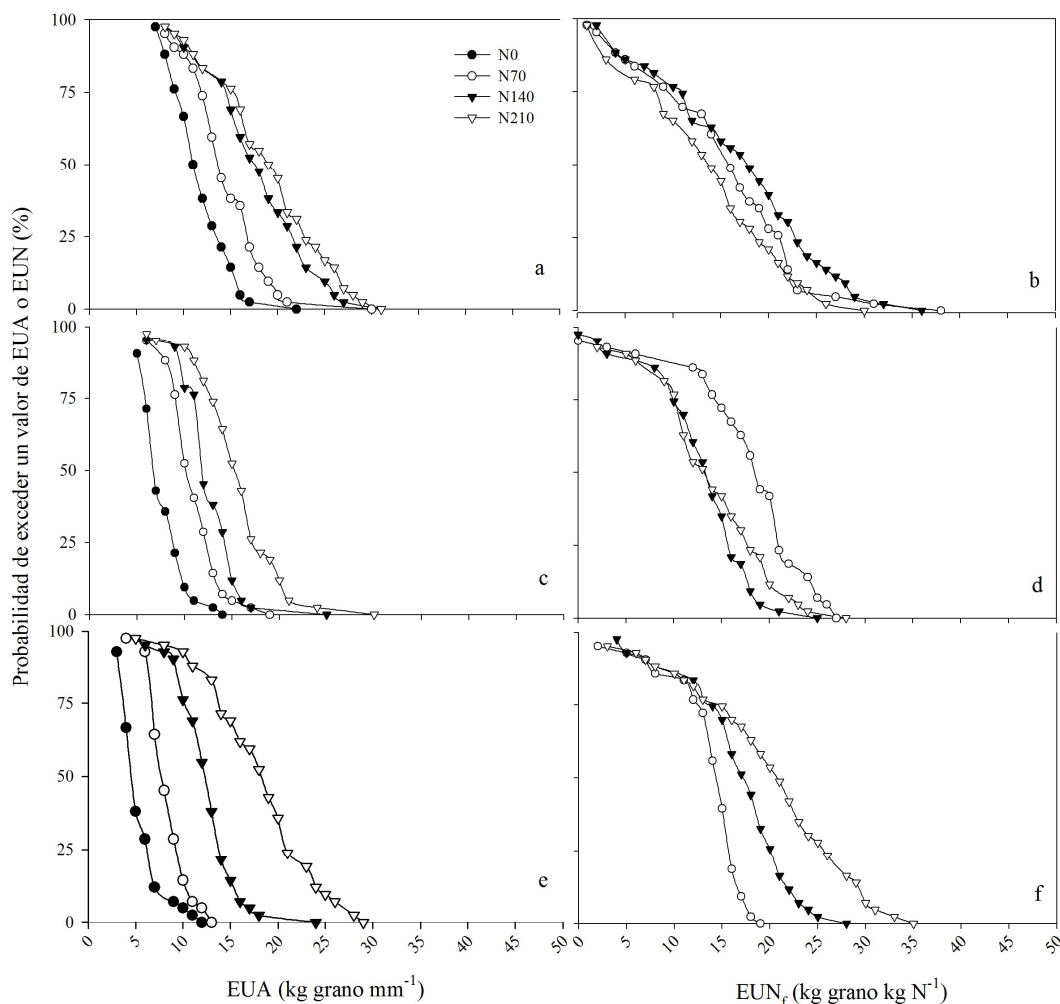


Figura 5.3.5. Probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un valor un valor de EUA (a, c, e) o EUN_f (b, d, f) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha⁻¹) y 3 ZM del Lote 2 a y b) ZM1L2, c y d) ZM2L2 y e y f) ZM3L2.

En el Lote 1, la limitación de agua varió significativamente por efecto de la ZM ($p < 0.001$, Tabla Anexo 7), siendo la ZM3L1 la que mayor L_A evidenció. A diferencia de la L_A , la L_N sólo fue afectada significativamente por efecto de N, disminuyendo con el aumento de la dosis de N (Tabla Anexo 7; Tabla 5.3.6).

La variabilidad temporal de L_A , fue similar en las ZM1L1 y ZM2L1, variando entre 94 y 105%, mientras que en la ZM3L1 la variación temporal fue menor y estuvo entre 66 y 76%. La ZM4L1 tuvo la mayor variabilidad temporal en L_A , y abarcó un rango entre 107% y 117% (Tabla 5.3.6).

La L_N se redujo entre un 86 y 92% con la dosis N210 respecto al testigo, abarcando un rango entre 0.042 y 0.31. La variación temporal de L_N se incrementó con la dosis de N. La ZM3L1, tuvo mayor variabilidad temporal en L_N que las otras ZM en los tratamientos N70, N140 y N210. Tanto para L_A como para L_N , la magnitud de la variabilidad espacial fue similar a la temporal (Tabla 5.3.6) en las ZM1L1 y ZM2L1. A diferencia de estas, en la ZM3L1 L_A la variación temporal fue menor que la espacial (-27%). En la ZM4L1, la variabilidad temporal de la L_A fue entre 11 y 40% mayor que en las otras ZM (Tabla 5.3.6).

El rango explorado por L_N (0.066-0.331) fue mayor que el de L_A (0.064-0.156) (Tabla 5.3.6, Figura 5.3.6), notándose claras diferencias entre los tratamientos de N. esto se vio reflejado en la C_{AN} la que mostró variaciones por efecto de N y ZM ($p < 0.001$, Tabla Anexo 7).

La C_{AN} mostró una menor variabilidad temporal que las limitaciones de agua y N, variando entre 7 y 15%, variación que resultó similar a la espacial. En todas las ZM, la C_{AN} aumentó con la dosis de N (Tabla 5.3.6, Figura 5.3.6).

En el Lote 2 se verificó efecto significativo de N y ZM sobre L_A , L_N y C_{AN} ($p < 0.001$, Tabla A.4), detectándose interacción significativa para L_N y C_{AN} ($p < 0.001$, Tabla Anexo 7).

El rango de L_A explorado en el Lote 2 fue mayor que en el Lote 1, observándose diferencias entre el testigo y las distintas dosis de N (N70, N140 y N210), esta diferencia fue más evidente en la ZM3L2 (Figura 5.3.7g). La variabilidad temporal fue en general, mayor en la ZM1L2 (Tabla 5.3.6, Figura 5.3.7).

La limitación de N se redujo entre 67 y 86% con la dosis máxima simulada (N210) en comparación con el testigo (N0), aumentando la variabilidad temporal con el aumento de la dosis de N. La variabilidad espacial fue mayor que la variabilidad temporal, excepto en la ZM1L2 donde la variación interanual superó levemente a la espacial (Tabla 5.3.7).

El rango de C_{AN} en el Lote 2 fue mayor al explorado en el Lote 1, observándose un aumento entre 15 y 20% de la C_{AN} con la dosis de N, así como una disminución de su variabilidad temporal (entre 19 y 50% menos) y espacial (hasta 50% menos) (Tabla 5.3.7, Figura 5.3.6).

Tabla 5.3.6. Limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N) y co-limitación de agua y N (C_{AN}) promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 4 ZM delimitadas en el Lote 1. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de las dosis de N la variabilidad espacial.

	L_A				L_N				C_{AN}			
	N0	N70	N140	N210	N0	N70	N140	N210	N0	N70	N140	N210
ZM1L1	0.071 (105)	0.081 (95)	0.082 (94)	0.082 (94)	0.308 (25)	0.173 (41)	0.066 (76)	0.038 (102)	0.754 (13)	0.878 (9)	0.924 (7)	0.925 (7)
ZM2L1	0.071 (105)	0.081 (95)	0.082 (94)	0.082 (94)	0.296 (27)	0.164 (45)	0.098 (76)	0.035 (113)	0.770 (13)	0.880 (9)	0.912 (8)	0.921 (8)
ZM3L1	0.137 (76)	0.155 (66)	0.156 (66)	0.156 (66)	0.331 (27)	0.163 (53)	0.087 (80)	0.027 (144)	0.778 (15)	0.87 (11)	0.871 (11)	0.862 (12)
ZM4L1	0.055 (117)	0.055 (117)	0.064 (107)	0.064 (107)	0.306 (25)	0.163 (43)	0.068 (72)	0.042 (94)	0.745 (12)	0.871 (8)	0.931 (6)	0.939 (6)
Promedio	0.085 (103)	0.094 (95)	0.097 (93)	0.097 (92)	0.310(26)	0.166 (45)	0.080 (74)	0.036 (110)	0.762 (13)	0.876 (9)	0.910 (8)	0.912 (9)

* CV entre años, representa la variabilidad temporal. ** CV entre ZM, representa la variabilidad espacial

Tabla 5.3.7. Limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N) y co-limitación de agua y N (C_{AN}) promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 3 ZM delimitadas en el Lote 2. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.

	L_A				L_N				C_{AN}			
	N0	N70	N140	N210	N0	N70	N140	N210	N0	N70	N140	N210
ZM1L1	0.060 (130)	0.070 (120)	0.071 (119)	0.071 (119)	0.291 (24)	0.175 (40)	0.082 (73)	0.051 (99)	0.758 (13)	0.861 (10)	0.912 (7)	0.924 (8)
ZM2L1	0.057 (130)	0.100 (99)	0.107 (96)	0.110 (95)	0.417 (17)	0.296 (21)	0.232 (31)	0.134 (57)	0.634 (16)	0.789 (13)	0.842 (11)	0.882 (9)
ZM3L1	0.077 (115)	0.110 (87)	0.113 (85)	0.113 (85)	0.422(17)	0.272 (26)	0.129 (52)	0.069 (74)	0.644 (18)	0.808 (12)	0.889 (9)	0.905 (9)
Promedio	0.063 (124)	0.093 (101)	0.097 (99)	0.098 (99)	0.377 (25)	0.248 (35)	0.148 (62)	0.085 (82)	0.684 (18)	0.823 (12)	0.881 (10)	0.902 (9)

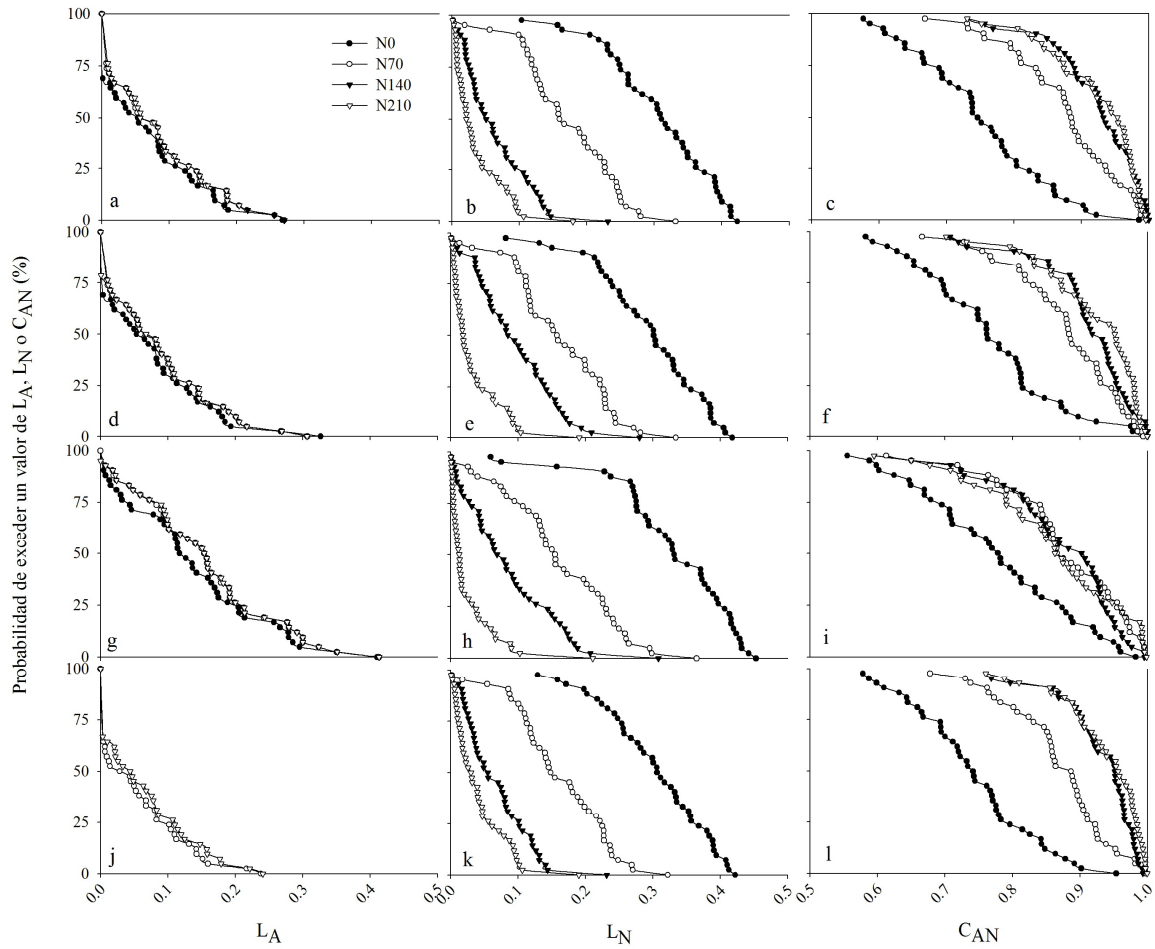


Figura 5.3.6. Probabilidad acumulada de exceder un valor de limitación de agua (L_A ; a, d, g), limitación de N (L_N ; b, e, h) o co-limitación de agua y N (C_{AN} ; c, f, i) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha^{-1}) y 4 ZM del Lote 1. a, b, c) ZM1L1, d, e, f) ZM2L1 y g, h, i) ZM3L1 y j, k, l) ZM4L1.

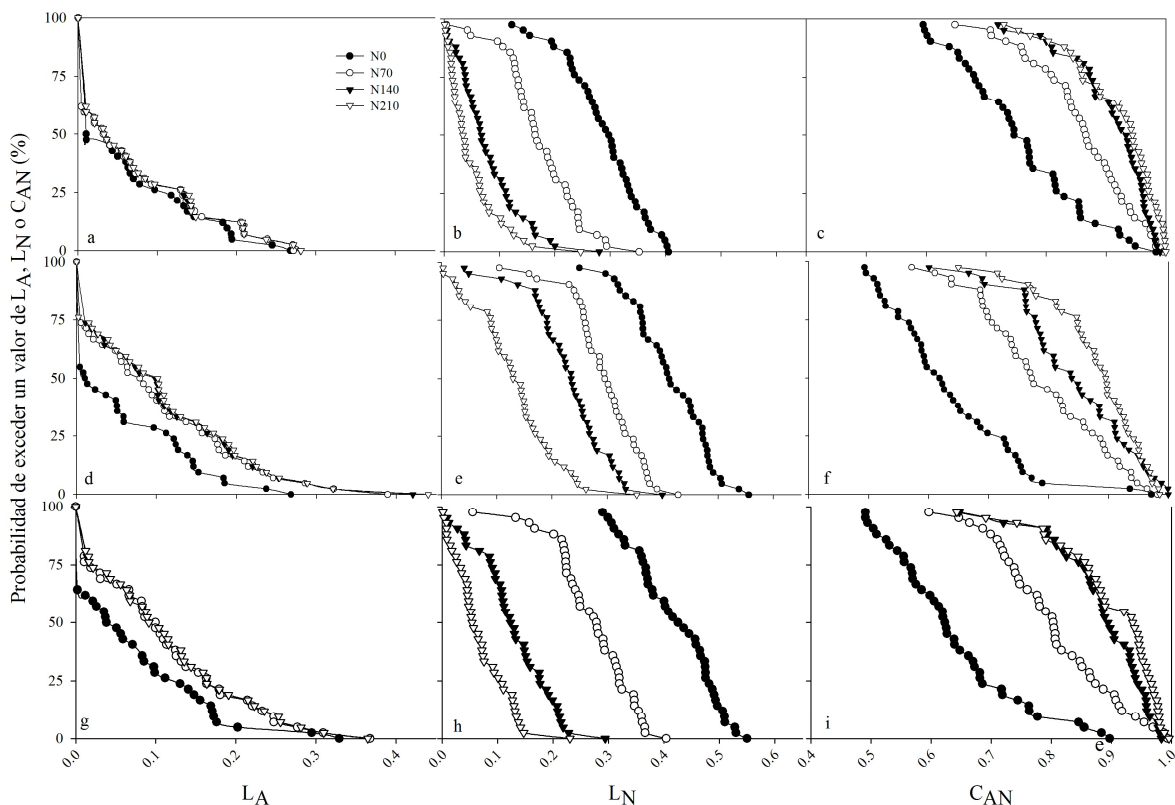


Figura 5.3.7. Probabilidad acumulada de exceder un valor de limitación de agua (L_A ; a, d, g), limitación de N (L_N ; b, e, h) o co-limitación de agua y N (C_{AN} ; c, f, i) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha^{-1}) y 3 ZM del Lote 2. a, b, c) ZM1L2, d, e, f) ZM2L2 y g, h, i) ZM3L2.

5.3.4. Variabilidad temporal de las relaciones de la EUA y EUN con la C_{AN} .

La relación hallada entre la EUA y la C_{AN} en el Lote 1, a partir de datos observados en el Capítulo 4 resultó lineal y negativa, en los resultados de la simulación de largo plazo sólo se verificó esta relación en menos del 5% de los años (2 de 41), la relación entre estas variables se explicó mejor utilizando un modelo por cada ZM. Por el contrario, en el 51% de los años la EUA se asoció positivamente con la C_{AN} , siendo el modelo que mejor explicó la relación el que incluyó a todas las ZM. En el 44% de los años no se verificó una relación significativa entre la EUA y la C_{AN} .

La relación entre la EUA y la C_{AN} en el Lote 2 a partir de datos observados (Capítulo 4 de este trabajo) resultó lineal y positiva. De manera coincidente, a partir de los resultados de simulación de largo plazo se verificó una relación positiva significativa entre EUA y C_{AN} en el 58% de los años (24 de 41 años). Mientras que, en el 42% restante de los años no se verificó relación significativa entre EUA y C_{AN} . En todos los casos que la relación fue significativa, el modelo que mejor explicó la relación fue el que incluyó todas las ZM.

La EUN_f se verificó una relación lineal y positiva en el 32% de los años simulados (13 de 41 años), mientras que en el 2% (1 de 41) la relación fue lineal y negativa. En el 66% de los casos la relación entre EUN_f y C_{AN} no fue significativa.

En el Lote 2 a partir de los resultados simulados no se halló relación significativa entre la EUN_f y la C_{AN} en ninguno de los 41 años simulados.

En ambos lotes, el modelo que explicó mejor la relación entre la EUN_f y la C_{AN} fue el que incluyó todas las ZM.

5.4. DISCUSIÓN

Un modelo es una representación simplificada de un sistema (Ford, 1999), y como tal, intenta capturar el comportamiento de los principales componentes. La validación de un modelo, se refiere a su testeo para determinar la precisión de la simulación comparada con datos observados (Smith et al., 1996). De acuerdo con esto, el modelo SALUS simuló con una adecuada precisión la fenología, el rendimiento, la biomasa y el N acumulado en el grano del cultivo de maíz, y con una menor pero aceptable precisión, el contenido de agua del suelo y la ETC.

En cuanto a la fenología, el modelo simuló anticipadamente los primeros estadios del cultivo, mejorando su predicción en los estadios más cercanos a floración. El RMSE obtenido para el cultivo de maíz (Figura 5.3.1a) resultó superior al reportado en trabajos realizados con CERES-Maize por Ben Nouna et al. (2000) quienes obtuvieron un RMSE de 2.7 días, mientras que Caviglia et al. (2013) reportaron un RMSE para la fecha de madurez del cultivo similar al obtenido en este trabajo de 14.3 días.

El rendimiento, la biomasa, el N_g y N_{abs} del cultivo de maíz fueron simulados adecuadamente, en general, con una alta correlación entre observado y simulado y un aceptable RMSE (Tabla 5.3.1), con niveles de ajuste coincidentes con los anteriormente reportados para el uso del modelo SALUS (Basso et al., 2012) y CERES-Maize (Pang et al., 1997; Liu et al., 2012; Bowen et al., 1993). Si bien el rendimiento del cultivo fue simulado adecuadamente, cabe resaltar que los rendimientos máximos alcanzados en las simulaciones del período 1971-2013 fueron en general bajos ($< 11000 \text{ kg ha}^{-1}$), esto puede atribuirse a que el modelo fue calibrado con datos de rendimiento de un ensayo que no alcanzó rendimientos altos, probablemente los rendimientos máximos simulados se encuentren limitados.

Los resultados de las simulaciones, mostraron para dos campañas y condiciones de suelos contrastantes muy buena performance para capturar la tendencia del contenido de agua del suelo, el que fue simulado aceptablemente siendo su evolución a través del tiempo similar a la observada en las diferentes ZM simuladas en cada lote evaluado (Figura 5.3.2 y Figura 5.3.3). El RMSE para esta variable osciló entre 12 y 38 mm, y resultó menor al reportado en trabajos en los que se ha utilizado SALUS-Terrae, en el que Batchelor et al. (2002) obtuvieron RMSE entre 46 y 59 mm. En un trabajo posterior, Basso (2005) informa un RMSE entre 22 y 68 mm para simulaciones de la variabilidad espacial del contenido de agua del suelo.

Las variables de cultivo, también fueron adecuadamente simuladas por SALUS, la respuesta observada del cultivo en biomasa, rendimiento, absorción de N, mostraron errores dentro de los reportados en trabajos realizados con SALUS (Basso et al., 2009) y con modelos como EPIC, CERES-Maize y CropSyst (Cabelguenne et al., 1999; Ben Nouna et al., 2000; Díaz Ambrona et al., 2005). La simplificación experimental aportada por el modelado, permitió identificar y estudiar los procesos y predecir algunos resultados como señala Addiscott et al. (1993).

Existen antecedentes del uso de modelos de simulación para evaluar prácticas de agricultura de precisión (Thorp et al., 2008; DeJonge et al., 2007; Dardanelli, 2002; Sadler

et al., 2000; Paz et al., 1999; Sadler et al., 1999). Este abordaje, permite conocer el efecto de la variabilidad temporal sobre la variabilidad espacial (Schepers et al, 2004) y sus magnitudes relativas, información relevante para la adopción del manejo sitio específico (Whelan y MacBratney, 2000). La respuesta a la fertilización y la EUN fueron más variables espacial y temporalmente que el rendimiento y la EUA. Debido a que la EUN es una variable estimada a partir de la respuesta del cultivo a la fertilización, su variación fue similar. Las variaciones en la eficiencia de uso de N se expresan cuando ocurren diferentes respuestas a la fertilización con N (Huggins y Pan, 1993). La variabilidad temporal de la respuesta a N fue similar entre lotes, ya que esta depende principalmente de las variaciones climáticas. La variación espacial fue mayor en el Lote 1, en donde las diferencias entre las ZM estuvieron dadas principalmente por el grado de erosión lo que influyó sobre el almacenamiento de agua y la dinámica del N, mientras que en el Lote 2, las diferencias entre ZM por diferencias en el tipo de suelo, los que poseen capacidades de infiltración diferentes por las variaciones texturales.

En general, la variabilidad espacial resultó mayor que la variabilidad temporal lo que permitiría utilizar prácticas de agricultura de precisión como las ZM como estrategia de manejo para aumentar la eficiencia de uso de los recursos y minimizar el impacto ambiental, como lo indicaron Whelan y McBratney (2000), ya que una gran variabilidad temporal dificultaría la planificación de estrategias de manejo y determinar la disponibilidad de N en el suelo y el rendimiento potencial. Por otro lado, la variabilidad temporal puede ser de tal magnitud, que afecte la expresión de las variaciones espaciales dentro de un lote, afectando la respuesta del cultivo a determinadas prácticas como la fertilización, ante estas situaciones el uso de zonas de manejo no generaría un beneficio desde el punto de vista del uso de los insumos. Varios trabajos resaltan la importancia de conocer y manejar la variabilidad temporal, Eghball y Varvel (1997), realizaron un estudio de largo plazo en Nebraska sobre un Argiudol abruptico para evaluar el efecto de la variabilidad temporal y el manejo (i.e. fertilización con N y secuencias de cultivo), estos autores informaron que la variabilidad temporal es más importante que el manejo. Según Huggins y Alderfer (1995), el 50% de la variabilidad del rendimiento de maíz esta explicado por la variabilidad temporal en un estudio de largo plazo realizado en Lamberton (Minnesota) para evaluar la respuesta del maíz a la fertilización con N. De acuerdo con Mamo et al. (2003), la dosis óptima económica de N en maíz estuvo influenciada por la variabilidad temporal a través de su influencia sobre la variabilidad espacial. Al respecto, Whelan y McBratney (2000) postularon la hipótesis nula de la agricultura de precisión, sugiriendo que ante un dominio de la variabilidad temporal la estrategia menos riesgosa es el manejo uniforme. Estos autores, reportan variabilidades espaciales del rendimiento de trigo y sorgo entre 8 y 77%, mientras que la variabilidad temporal que encontraron fue entre 41 y 97%, resultando en todos los casos la variabilidad temporal mayor a la espacial, indicando que el rendimiento de los cultivos está fuertemente gobernado por las condiciones climáticas. Los resultados de este trabajo a partir de simulaciones con datos climáticos históricos (período 1971-2012) sugieren que sería factible el manejo por zonas en los lotes evaluados, ya que en general, la variabilidad espacial resultó mayor que la variabilidad temporal. El manejo variable será factible cuando exista una alta variabilidad espacial y baja variabilidad temporal, más que cuando la variabilidad temporal es alta (Pierce y Nowak, 1999). En el Lote 1, los efectos de la erosión hídrica y la posición en el paisaje de las diferentes ZM, generaron una mayor variabilidad espacial que temporal. Por otro lado, en el Lote 2 las variaciones en el tipo de suelo acentuaron la variabilidad espacial.

Los valores de co-limitación de agua y N y las limitaciones de agua y N, concuerdan con lo reportado por otros autores (Sadras y Roget, 2004; Sadras, 2004; Cossani et al., 2010). En cuanto a L_A y L_N , ambas tuvieron una gran variabilidad temporal y espacial, siendo en ambos casos mayor para la L_A (Tabla 5.3.5 y 5.3.6). La fertilización nitrogenada generó disminuciones de la L_N , pero aumentó su variabilidad espacial y temporal (Tabla 5.3.5, Tabla 5.3.6, Figura 5.3.6 y Figura 5.3.7). Además de las diferencias entre ZM en L_A , en el Lote 2 dentro de cada ZM se observaron ciertas diferencias en las limitaciones de agua entre el testigo y las distintas dosis evaluadas (Interacción ZMxN) (Figura 5.3.7), lo que sugiere que el cultivo incrementó su crecimiento por efecto de la fertilización y utilizó más agua que el testigo, y ante una misma disponibilidad de agua la limitación aumenta en función de la mayor demanda. La C_{AN} tuvo una menor variabilidad, espacial y temporal, con mayor variabilidad para el tratamiento sin fertilización. La L_N generó un mayor impacto que la L_A sobre la C_{AN} (Figura 5.3.6 y Figura 5.3.7), y en general una menor L_N se asoció con una mayor C_{AN} , indicando que por medio de la fertilización nitrogenada podrían generarse variaciones en los niveles de co-limitación.

En condiciones de secano, es fácil y económicamente viable manejar la disponibilidad de N a través de la fertilización. De acuerdo a los resultados obtenidos (Figuras 5.3.6 y Figura 5.3.7) el recurso que mayor impacto produjo sobre la co-limitación fue el N, existiendo diferencias entre ZM en las dosis de N con las que se produjo mayor efecto sobre la C_{AN} . Respecto a esto Cossani et al. (2010) sugirieron que un aumento del grado de co-limitación mediante el ajuste de las dosis de N a la disponibilidad de agua, permitiría aumentar el rendimiento.

El éxito de las prácticas de manejo sitio específico dependen de determinar relaciones que describan la respuesta del rendimiento a diferentes factores y del impacto ambiental que esto tenga, así como del uso de estas relaciones para definir prescripciones óptimas en una determinada escala de manejo (Link, 2005). De acuerdo con esto, el uso de modelos de simulación permite explorar las relaciones espacio-temporales de la EUA y EUN con la C_{AN} .

En el capítulo anterior se determinaron relaciones inversas entre la EUA y la EUN con la C_{AN} , a partir de las cuales podría determinarse un valor de C_{AN} donde la EUN y EUA se igualan. Así, la utilización de la C_{AN} permitiría ajustar el Nd por ZM, optimizando de manera simultánea las EUA y EUN. Esto representaría una mejora respecto a la determinación de la dosis de acuerdo con curvas de respuesta por zonas de manejo, metodología con la que sólo se optimiza la eficiencia de uso del N, de esta manera se optimizaría el uso de los dos recursos que principalmente limitan el rendimiento del cultivo de maíz. En el presente estudio, se determinó que la relación de la EUA con la C_{AN} fue más estable que la relación con la EUN. Los antecedentes sobre co-limitación son muy poco frecuentes en la bibliografía agronómica (e.g. Sadras, 2004; Sadras y Roget, 2005; Cossani et al., 2010), más aun, los trabajos referidos no contemplan aspectos de la variabilidad temporal. Resulta relevante continuar estudios de las relaciones que existen entre la C_{AN} y las eficiencias, en especial diseñando prácticas alternativas que permitan estimarlas de manera expeditiva, y aplicable a soluciones tecnológicas. De igual manera, es importante explorar la dinámica de las limitaciones de agua y N en diferentes períodos durante la estación de crecimiento del cultivo. La falta de relación de la C_{AN} con la EUN quizás se deba a que el uso de la limitación promedio de la estación enmascara limitaciones puntuales (i.e. período centrado en floración) que podrían afectar la relación.

5.5. CONCLUSIONES

La L_A tuvo mayor variabilidad espacial y temporal que la L_N , aunque ambas variabilidades de L_A disminuyeron con el aumento de la dosis de N. Por otro lado, la L_N disminuyó por efecto de N mientras su variabilidad temporal y espacial aumentó. Los niveles de C_{AN} variaron espacial y temporalmente, aunque disminuyeron con el aumento de la dosis de N.

De los resultados se desprende que la C_{AN} puede manejarse a través de la fertilización, sin embargo la dosis a la cual se obtiene la máxima co-limitación varió de acuerdo al lote considerado y a la ZM.

La relación encontrada entre EUA y C_{AN} resultó más estable en el tiempo que la relación de la EUN con la C_{AN} , esta relación podría utilizarse para realizar prescripciones de N por ZM de acuerdo con la disponibilidad de agua al inicio el cultivo.

CAPÍTULO 6
DISCUSIÓN GENERAL

6.1. Síntesis de los resultados obtenidos

En el presente trabajo se estudió la variabilidad espacial de la co-limitación de agua y N, y su efecto sobre la eficiencia de uso de esos recursos en el cultivo de maíz a nivel de lote de producción.

La variabilidad espacial presente en el Lote 1 se debe principalmente a las variaciones en la profundidad del perfil de suelo por efecto de la erosión, la posición en el paisaje y el contenido de MO, mientras que en el Lote 2 la variabilidad espacial se debe a las diferencias existentes entre los tipos de suelo presentes en cada una de las ZM.

De manera esquemática, se representan las relaciones existentes entre el aporte de N mediante fertilización, las limitaciones de agua y de N, la C_{AN} y las eficiencias de uso de agua y N, adicionalmente se representan los efectos de la variabilidad espacial y temporal sobre cada variable estudiada en el presente trabajo (Figura 6.1.1).

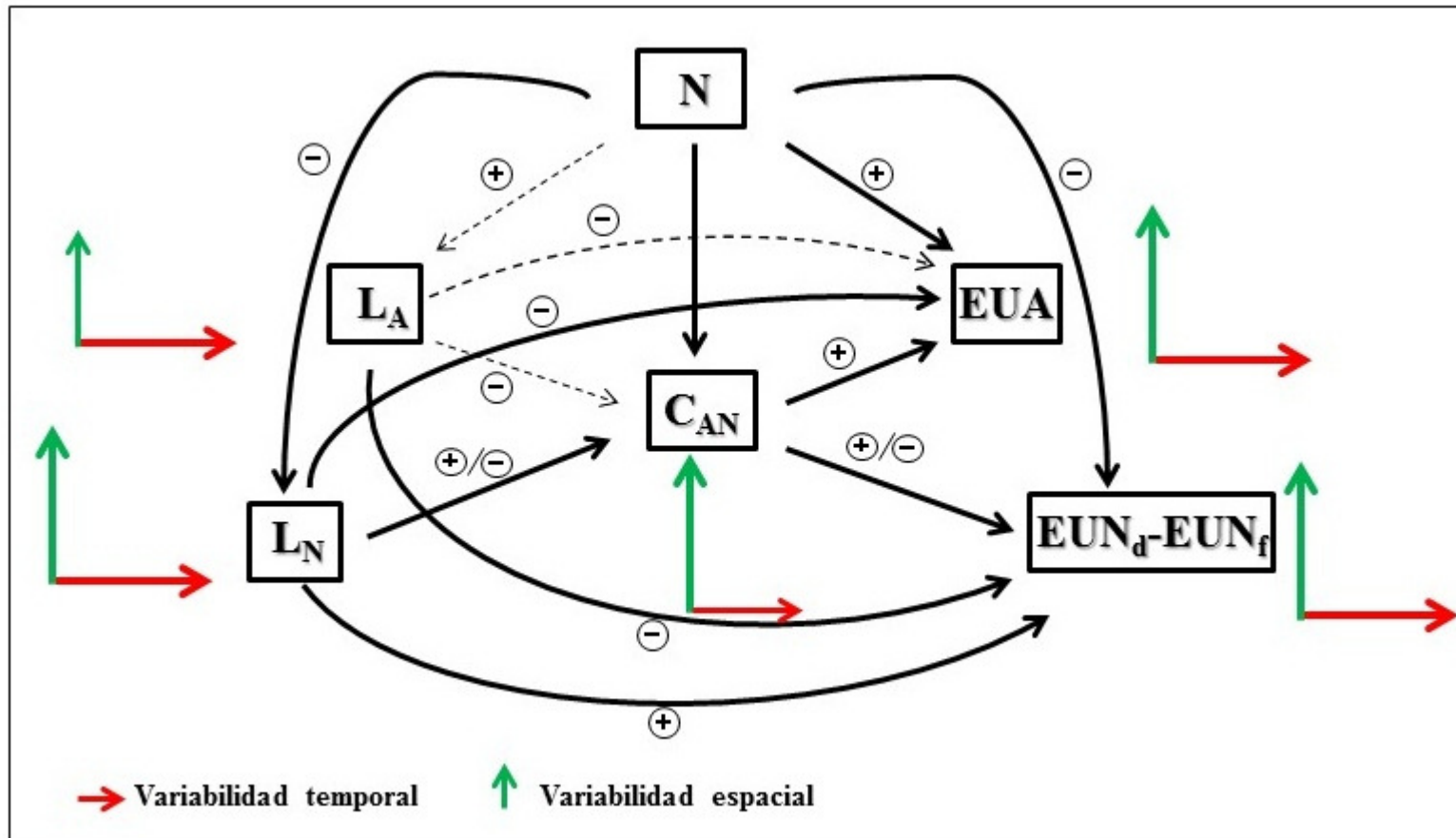


Figura 6.1.1. Relaciones entre el N, las limitaciones de agua (L_A) y N (L_N), la co-limitación de agua y N (C_{AN}), la eficiencia de uso de agua para producir granos (EUA) y la eficiencia de uso de N (EUN_d Capítulo 4 y EUN_f Capítulo 5, ambas para producir grano). Los símbolos positivo y negativo indican la relación entre las variables, en los casos en que los no se indica es debido a que la relación fue variable. Las flechas junto a las variables representan la variabilidad espacial (verde) y temporal (roja), el tamaño de la flecha indica la magnitud de la variabilidad.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que a pesar de que no se verificó variación espacial en la disponibilidad inicial de agua (Figura 2.5.3), las diferencias entre ZM en cuanto a disponibilidad de N (Figura 2.5.2; Tabla 3.3.3, Tabla 3.3.4), propiedades del suelo y posición en el paisaje (Tabla 2.2.2), permitieron comprobar la existencia de variabilidad espacial en la EUA, aunque no en la EUN_d (Tabla 3.3.3 y Tabla 3.3.4). Las diferencias en la EUA entre ZM se debieron a que las variaciones porcentuales en rendimiento y biomasa entre ZM, fueron mayores que las diferencias observadas en la ETC. Por otra parte, la falta de variación espacial en EUN_d se explicó porque los cambios porcentuales en rendimiento y biomasa por ZM fueron similares a los cambios porcentuales en el Nd. En los dos lotes estudiados se detectó variabilidad espacial en la C_{AN} y la L_A, mientras que la L_N sólo difirió entre ZM en el Lote 2 (Tabla Anexo 7). Estos resultados no proporcionan evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 1.2.1**, la que propone que “*en un lote de producción de maíz existe variabilidad espacial en el grado de co-limitación por los recursos agua y N*”.

Debe tenerse en cuenta que los resultados corresponden a un año de estudio por lote, y que la toma de decisiones de manejo a partir de la interpretación de resultados de un año ha sido calificada como riesgosa (Jaynes y Colvin, 1997). Sumado a esto, las campañas evaluadas no fueron de condiciones climáticas normales (2011/12 campaña seca y 2012/13 campaña húmeda). La continuidad de experimentos sería conveniente para determinar si la variación espacial es tal que se justifique el uso de ZM como estrategia para aumentar la eficiencia de uso de los recursos, como sugieren Whelan y McBratney (2000).

La EUN_d y la EUA, se relacionaron de manera opuesta con el Nd, e.i. la EUN disminuyó con el aumento de Nd y la EUA se incrementó (Figura 3.3.3, Figura 3.3.4, Figura 3.3.5 y Figura 6.1.1). Así, en el manejo eficiente de los recursos deberían considerarse las relaciones entre las eficiencias y Nd, de modo que el aumento en una de ellas por medio del manejo (e.g. por fertilización) no genere una disminución significativa en la otra. Debe contemplarse que el crecimiento de un cultivo comúnmente está limitado simultáneamente por varios recursos (Sinclair y Park, 1993), de hecho las eficiencias de uso de agua y de nitrógeno, se asociaron estrechamente con la C_{AN} (Tabla 4.3.3, Tabla 4.3.4). La EUA resultó más sensible que la EUN_d a los cambios en la C_{AN} (Tabla 4.3.3), este resultado no aporta evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 1.2.2** que propone que “*la EUA resulta más sensible que la EUN a la C_{AN}*”.

La L_N explicó en mayor medida las variaciones en la C_{AN} en ambos años, y en el Lote 2 representó en todos los casos la limitación máxima (Tabla 4.3.3, Tabla 4.3.4). Puede decirse que L_N tuvo un mayor impacto en la estimación de la C_{AN} (Figura 5.3.6, Figura 5.3.7), lo cual pudo estar influenciado por los tratamientos de fertilización nitrogenada que ampliaron el rango de variación de L_N. En los dos años evaluados, la EUN_d se relacionó negativamente con la L_A mientras que la EUA se relacionó negativamente con L_N. Estos resultados coinciden con la idea planteada por Kim et al. (2008), quienes aseguran que existen relaciones sinérgicas entre el agua y el N, i.e. el riego aumenta la EUN y el N aumenta la EUA. Otros resultados reportados (Sadras, 2004; Sadras y Roget, 2005; Cossani et al., 2010) sólo han verificado una relación significativa entre la C_{AN} y la EUA, el rendimiento o la brecha de rendimiento (rendimiento potencial menos rendimiento alcanzable), mientras que los resultados del presente trabajo muestran que la C_{AN} se asoció estrechamente tanto con la EUA como con la EUN_d.

La relación de la EUA y EUN_d con la C_{AN} , difirió entre los Lotes evaluados, en el Lote 1 el aumento de la C_{AN} generó aumentos en la EUN_d y disminuciones en la EUA, mientras que en el Lote 2 la relación de la C_{AN} con las eficiencias se invirtió, y los aumentos en la C_{AN} generaron aumentos en la EUA y disminuciones en la EUN_d . De acuerdo con las relaciones inversas observadas entre la C_{AN} con la EUA y EUN_d , fue posible determinar los niveles de C_{AN} en los que se igualan las eficiencias optimizando ambos recursos (Figura 4.3.2).

Determinar el contenido de agua al inicio del cultivo y calcular la C_{AN} permitiría ajustar el Nd por ZM, optimizando la EUA y la EUN. Esta metodología representaría una mejora respecto a la determinación de la dosis de acuerdo con curvas de respuesta por zonas de manejo donde sólo se optimiza la eficiencia de uso del N. Por otro lado, la variación en las relaciones que explican los cambios en las eficiencias ante cambios en la C_{AN} entre lotes, sugiere que esta varía no sólo espacialmente sino también temporalmente. Similares propuestas fueron analizadas por Gregoret et al (2011), quienes generaron modelos de recomendación de fertilización nitrogenada teniendo en cuenta la disponibilidad de agua al inicio del cultivo por ZM, sin embargo no obtuvieron diferencias suficientes para realizar recomendaciones variables de N entre las ZM.

Las simulaciones de largo plazo, dando cuenta de la variabilidad climática en especial de las precipitaciones, permitieron conocer la variabilidad temporal y espacial en la respuesta de las variables estudiadas. En general, la variabilidad espacial en los lotes estudiados resultó levemente mayor o similar que la variabilidad temporal (Figura 6.1.1), lo que permitiría utilizar criterios de zonificación como estrategia para aumentar la eficiencia de uso de los recursos y minimizar el impacto ambiental.

En condiciones de secano, es fácil y económicamente viable manejar el N, recurso que mayor impacto produjo sobre la co-limitación (Figura 6.1.1), a su vez, existieron diferencias entre ZM en las dosis de N que generaron mayor efecto en la C_{AN} (Figuras 5.3.6 y Figura 5.3.7). Las simulaciones a largo plazo también permitieron determinar que la relación de la EUA con la C_{AN} fue más estable que la relación con la EUN_f . Los antecedentes sobre co-limitación son poco frecuentes en la bibliografía (e.g. Sadras, 2004; Sadras y Roget, 2005; Cossani et al., 2010) mientras que el estudio de su variabilidad temporal no ha sido considerado hasta el presente con lo cual sería necesario continuar el estudios de las interacciones entre la C_{AN} y las eficiencias.

Si bien en los dos años de ensayo se verificaron relaciones significativas entre la EUA y la EUN_d con la C_{AN} , al evaluar estas relaciones en el largo plazo a través de resultados de simulación la relación encontrada entre EUA y C_{AN} resultó más estable en el tiempo que la relación de la EUN_f con la C_{AN} , y no siempre resultaron opuestas. Estos resultados generaron evidencias suficientes para rechazar la **hipótesis 1.2.3**, la que establece que “*empleando modelos de simulación es posible determinar a través del grado de co-limitación de agua y N una combinación óptima de EUA y EUN por ZM*”.

6.2. Utilidad de la información generada

La información que resulta de este trabajo de tesis contribuye al estudio de la interacción entre dos de los recursos que mayormente limitan al cultivo de maíz, e influyen en su variación espacial y temporal. Se propone una alternativa para el manejo del N, que tenga en cuenta a la co-limitación de agua y N por ZM, optimizando tanto la EUN_d como la

EUA. Estos resultados, contribuyen al uso eficiente del agua y el N siendo un aporte para la minimización del impacto ambiental y el uso sustentable de los recursos.

Como resultado secundario de este trabajo, se logró una adecuada validación del modelo SALUS. Esto servirá a futuro avanzar en simulaciones con la versión SALUS-Terrae, modelo que permite simular el balance hídrico considerando efectos espaciales de redistribución del agua efecto útil para aplicaciones en agricultura de precisión y conservación de suelos.

6.3. Posibles líneas de investigación

Los temas que podrían profundizarse a partir de los resultados de este trabajo, incluyen:

- *Evaluación de la co-limitación de agua y N en diferentes períodos del ciclo del cultivo*

Se ha señalado que la ocurrencia de limitaciones puede ser dinámica durante el ciclo de los cultivos, con lo cual evaluar la co-limitación en diferentes períodos del crecimiento del cultivo, de acuerdo con las variaciones en los requerimientos de agua y N durante el ciclo del cultivo, surge como una temática a desarrollar en futuros trabajos y análisis. El uso de limitaciones promedio puede enmascarar efectos significativos de un estrés puntual, lo que quizás sea una causa de no haber hallado relación entre EUN_f y C_{AN} en el largo plazo. La dinámica de absorción de N muestra que la mayor demanda de N por el cultivo se da a partir de V6 (Ritchie et al., 1986) durante el período de rápido crecimiento vegetativo, siendo este un período particularmente interesante de explorar. Sin embargo, para las limitaciones de agua el período centrado en floración (período crítico) sería un momento de mayor interés. Usar limitaciones promedio de la estación puede generar atenuaciones de las limitaciones si estas fueron fuertes en un período en particular, el uso de limitaciones por períodos puede representar una alternativa que evite el efecto de atenuación del estrés al hacer el promedio de la estación.

- *Desarrollar una metodología de cálculo de la C_{AN} con limitaciones independientes.*

Un punto que resulta de difícil solución experimental a campo, y que ha sido observado como un importante inconveniente (Sadras, 2004; Cossani et al, 2010) es el de diseñar una metodología de cálculo de la C_{AN} en la que las limitaciones de agua y N sean independientes. En efecto, resulta dificultoso generar en experimentos de campo un gradiente de limitaciones, tanto de agua como de N, que sean totalmente independientes entre sí. Es posible obtener limitaciones importantes de estos recursos por restringir su disponibilidad experimentalmente, lo que resulta en altos niveles de CAN pero lograr valores bajos o intermedios de CAN resulta más dificultoso.

Un marco analítico que permita superar estos inconvenientes sería útil para avanzar en el estudio de las limitaciones conjuntas de recursos.

- *Desarrollar una metodología de recomendación de N en función de la C_{AN} .*

Para poder generar una metodología de recomendación de N en función de la co-limitación de N y agua, sería conveniente evaluar las relaciones entre la co-limitación al inicio del cultivo y las eficiencias en el uso de agua y N por ZM, de esta manera conociendo la disponibilidad de N y agua inicial se podrían recomendar dosis de N a aplicar en cada una

de las ZM. La disponibilidad de N inicial resultaría más útil que el N_d para realizar recomendaciones de fertilización de cultivos, debido a que esta puede determinarse previo al cultivo a diferencia del N_d que se conoce una vez que el cultivo ha cumplido su ciclo.

BIBLIOGRAFÍA

- Addiscott, T.M. 1993. Simulation modeling and soil behavior. *Geoderma*. 60:15-40.
- Advanced Farming System, AFS Software V5.52. 2000. Case Corporation.
- Albarenque, S.M., Basso, B., Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M. 2014. Respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada por zonas de manejo. En actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas”
- Albarenque, S.M., Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M. 2010. Impacto de diferentes escenarios climáticos sobre el rendimiento simulado de maíz en Entre Ríos. IX Congreso Nacional de Maíz. Rosario 17-19 de Noviembre.
- Andrade, F., Cirilo, A., Uhart, S., Otegui, M. 1996, *Ecofisiología del cultivo de maíz*, Ed La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires.
- Barbieri, P., Echarte, L., Della Maggiora, A., Sadras, V.O., Echeverria, H., Andrade, F.H. 2012. Maize Evapotranspiration and Water-Use Efficiency in Response to Row Spacing. *Agron J.* 104:939–944.
- Barneveld G.W. Van. (1972). Los suelos de la Estación Experimental INTA Paraná. Memoria técnica, mapa de Suelos y mapa de capacidad de uso de las tierras, esc. aprox. 1:5.000, mapa de suelos de los alrededores, esc. aprox. 1:20.000. Plan Mapa de Suelos Provincia de Entre Ríos. Proyecto PNUD/FAO/INTA ARG/68/526 (mimeografiado), 84 pp.
- Basso, B., Fiorentino, C., D’Errico A., Cammarano, D. 2012. Understanding spatial and temporal variability of wheat yield: an integrated system approach. 10th International Congress on Precision Agriculture.
- Basso, B., Ritchie, J.T., Cammarano, D., Sartori, L. 2011. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. *Eur J Agron.* 35:215-222.
- Basso, B., Cammarano, D., Troccoli, A., Chen, D., Ritchie, J.T. 2010. Long-term wheat response to nitrogen in a rainfed Mediterranean environment: Field data and simulation analysis. *Europ. J. Agronomy.* 33: 132–138.
- Basso, B., Cammarano, D., Chen, D., Cafiero, G., Amato, M., Bitella, G., Basso, F. 2009. Landscape position and precipitation effects on spatial variability of wheat yield and grain protein in Southern Italy. *J Agron Crop Sci.* 195(4): 301-312.
- Basso, B., Bertocco, M., Sartori, L., Martin, E.C. 2007. Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize–wheat–soybean rotation. *Eur J Agron.* 26:82–91.
- Basso, B., Ritchie, J.T., Grace, P.R., Sartori L. 2006. Simulation of Tillage Systems Impact on Soil Biophysical Properties Using the SALUS Model. *Ital. J. Agron. / Riv. Agron.* 4:677-688.
- Basso, B., Ritchie, J.T., Pierce, F.J., Braga, R.P., Jones, J.W. 2001. Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agr Syst.* 68:97-112.
- Batchelor, W.D., Basso, B., Paz, J.O. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Eur J Agron.* 18:141-158.

- Belder, P., Bouman, B.A.M., Spiertz, J.H.J., Peng, S., Castañeda, A.R., Visperas, R.M. 2005. Crop performance, nitrogen and water use in flooded and aerobic rice. *Plant Soil*. 273: 167–182.
- Ben Nouna, B., Katerji, N., Mastrorilli, M. 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. *Eur J Agron*. 13 (4): 309–322.
- Bertocco, M., Basso, B., Sartori, L., Martin, E.C. 2008. Evaluating energy efficiency of site-specific tillage in maize in NE Italy. *Bioresource Technol*. 99(15): 6957-6965.
- Blackmore, B.S. 2000. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Comput Electron Agr*. 26(1): 37–51.
- Blomm, A.J., Chapi, F.S., Money, H.A. 1985. Resource limitations in plants – An economic analogy. *Annu Rev Ecol Syst*. 16: 363-392.
- Bowen, W.T., Jones, J.W., Carsky, R.J., Quintana, J.O. 1993. Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-Maize following legume green manure incorporation. *Agron J*. 85, 153-159.
- Bolton, F. E. 1981. Optimizing the use of water and nitrogen through soil and crop management. Chapter 9. Soil water and nitrogen in Mediterranean-type environments. Pages 231–247 in J. Monteith and C. Webb, eds. *Developments in plant and soil sciences*. Vol. 1. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, The Hague, the Netherlands.
- Booltink, H. W. G., Van Alphen, B. J., Batchelor, W. D., Paz, J. O., Stoorvogel, J. J. y Vargas, R. 2001. Tools for optimizing management of spatially-variable fields. *Agr Sys* .70(2): 445-476.
- Bremner, J. M. 1965. Inorganic forms of nitrogen. Pages 1179-1237 in C. A. Black, ed. *Methods of soil analysis*. Part 2. *Agronomy Monogr*. no. 9. ASA, Madison, WI.
- Brouwer, C., Heibloem, M. 1986. *Irrigation water management Training manual n°. 3: Irrigation Water Needs*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy.
- Brueck, H. 2008. Effects of nitrogen supply on water use efficiency of higher plants. *J Plant Nutr Soil Sc*.171:210-219.
- Cabelguenne, M., Debaeke, P., Bouniols, A. 1999. EPICphase, a version of the EPIC model simulating the effects of water and nitrogen stress on biomass and yield, taking account of developmental stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soybean and winter wheat. *Agr Sys* 60: 175-196.
- Cassman K.G., Dobermann, A.R., Walters, D.T. 2002. *Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management*. Agronomy & Horticulture Faculty Publications. Paper 356. <http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/356>
- Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M., Sadras, V.O. 2014. Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late-sown crops. *Field Crop Res*. 168: 27–37.

- Caviglia O.P., Sadras V.O. and F.H. Andrade. 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the South-eastern Pampas. *Field Crop Res.* 49: 300-311.
- Caviglia O.P. y R.J.M. Melchiori. 2011. Contribution of contrasting plant hierarchies to the response to N fertilizer in maize. *Field Crop Res.* 122:131–139.
- Caviglia O.P. y V.O. Sadras. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crop Res.* 69 (3): 259-266.
- Chagas, C.I., Grottola, M.C. 1994. Erosión entre surcos y estabilidad estructural en un Argiudol típico. *Ciencia del suelo* 12: 35-37.
- Ciampitti, I.A., Vyn, T.J. 2013. Grain Nitrogen Source Changes over Time in Maize: A Review. *Crop Sci.* 53:366–377.
- Córdoba, M., Balzarini, M., Bruno C., Costa, J.L. 2013. Identificación de zonas de manejo sitio-específico a partir de la combinación de variables de suelo. *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria.* 13(1): 47-54.
- Corwin, D.L., Lesch S.M., Oster J.D., Kafa, S.R.. 2006. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma* 131:369-387.
- Cossani, M., Slafer, G.A., Savin, R. 2010. Co-limitation of nitrogen and water, and yield and resource-use efficiencies of wheat and barley. *Crop Pasture Sci.* 61: 844–851.
- Craine, J.M., Morrow, C., Stock, W.D. 2008. Nutrient concentration ratios and co-limitation in South African grasslands. *New Phytol.* 179: 829–836.
- Dardanelli, J.L. 2002. Utilización de modelos de simulación para el manejo sitio-específico. Tercer Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América, Carlos Paz, Córdoba.
- Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M., Sadras, V.O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de granos. En: Satorre E., Benech Arnold R., Slafer G., de la Fuente E., Miralles D., Otegui M. y R. Savin. *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo.* 377-434, irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa. *Agr Water Manage.* 92: 99-109.
- DeJonge, K.C., Kaleita, A.L., Thorp, K.R. 2007. Simulating the effects of spatially variable irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa. *Agr water manage.* 92: 99 – 109.
- De Wit, C.T., 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agric Syst.* 40, 125–151.
- Dharmakeerthi, R.S., Kay B.D., Beauchamp, E.G. 2005. Factor contributing to changes in plant available nitrogen across a variable landscape. *Soil Sci Soc Am J.* 69:453-462.
- Diaz-Ambrosio, C.G.H., O’Leary, G. J., Sadras, V.O., O’Connell, M.G., Connor, D.J. 2005. Environmental risk analysis of farming systems in a semi-arid environment: effect of rotations and management practices on deep drainage. *Field crop res.* 94(2): 257-271.
- Di Paolo, E., Rinaldi, M. 2008. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crop Res.* 105(3):202-210.

- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo C.W. 2002. InfoStat versión 2002. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doberman, A. 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management. Fertilizer best management practices, 1.
- Doberman, A., Cassman, K.G., Mamaril, C.P., Sheehy, J.E. 1998. Management of phosphorous, potassium, and sulphur in intensive, irrigated lowland rice. *Field Crop Res.* 56:113-138.
- Doerge, T.A., 1999. Management zone concepts. SSMG-2. In: Information Agriculture Conference, August 9-11, 1999, Stewart Center, Purdue, IN.
- Dzotsi, K.A., Basso, B., Jones, J.W. 2013. Development, uncertainty and sensitivity analysis of the simple SALUS crop model in DSSAT. *Ecol Model.* 260: 62-76.
- Etchevehere P. 1998. "Normas de reconocimiento de suelos. Actualización". Universidad de Lomas de Zamora. Artes gráficas NesDan. S.R.L. Buenos Aires.
- Eghball, B., Varvel, G.E. 1997. Fractal Analysis of Temporal Yield Variability of Crop Sequences: Implications for Site-Specific Management. *Agron J.* 89:851-855.
- Everett, M.W., Pierce, F.J. 1996. Variability of corn yield and soil profile nitrates in relation to site-specific N management. In: Robert, P.C., et al. (Eds.), *Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Fila, G., Bellocchi, G., Acutis, M., Donatelli, M. 2003. Irene: a software to evaluate model performance. *Eur J Agron.* 18:369-372.
- Ford, A. 1999. *Modeling the environment*. Island Press, Washington, DC.
- Franzen, D.W., Hopkins, D.H., Sweeney, M.D., Ulmer, M.K., Halvorson, A.D. 2002. Evaluation of soil survey scale for zone development of site-specific nitrogen management. *Agron. J.* 94:381–389.
- French, R.J., Schulz, J.E. 1984. Water Use Efficiency of Wheat in a Mediterranean-type Environment. I The Relation between Yield, Water Use and Climate. *Ausf. J. Agric. Res.* 35: 743-64
- Fridgen, J.J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, W. J., y C. W. Fraisse. 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation.
- Frye W.W., Ebelhar, S. A., Murdock, L. W. y R.L. Blevins, R. L. 1982. Soil erosion effects on properties and productivity of two Kentucky soils. *Soil Sci Soc Am J.* 46(5): 1051-1055.
- Fusheng, L., Kang, S., Zhang, J., Cohen, S. 2003. Effect of atmospheric CO₂ enrichment, water status, and N on water and use efficiency of wheat. *Plant Soil.* 254: 279–289.
- Gachene, C.K., Mbuvi, J.P., Jarvis, N.J., Linner, H. 1997. Soil erosion effects on soil properties in a highland area of central Kenya. *Soil Sci Soc Am J.* 61(2): 559-564.

- Gao Q., Li C., Feng G., Wang J., Cui Z., Chen X., F. Zhang. 2012. Understanding yield response to nitrogen to achieve high yield and high nitrogen use efficiency in rainfed corn. *Agron J.* 104: 165-168.
- Godwin, D.C., Jones, C.A., Hanks, J., Ritchie, J.T. 1991. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. *Modeling plant and soil systems.* 287-321.
- Gregoret M.C., Diaz Zorita, M., Dardanelli, J., Bongiovanni, R. 2011. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precis Agric.* 12:831–849
- Gregory, P.J., Simmonds, L.P., Warren, G.P. 1997. Interactions between plant nutrients, water and carbon dioxide as factors limiting crop yields. *Philos T Roy Soc B.* 352(1356): 987-996.
- Hall, A.J., Lemcoff, J.H., Trapani, N. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica* 26:19–38.
- Halvorson, A.D., Nielsen D.C., and C.A. Reule. 2004. Nitrogen fertilization and rotation effects on no-tillage dryland wheat production. *Agron J.*96:1196–1201.
- Hatfield, J.L., Prueger, J.H. 2004 Nitrogen Over-use, Under-use, and Efficiency. 4th International Crop Science Congress. Brisbane, Queensland, Australia. www.regional.org.au/au/asa/2004/plenary/2/140_hatfield.htm (Marzo 2014).
- Hatfield J.L., Sauer, T.J., Prueger, J.H. 2001. Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review. *Agron J.* 93:271–280
- Hatfield, J.L. 2012. Spatial patterns of water and nitrogen response within corn production fields. *Agricultural science. Intech Publ., Rijeka, Croatia,* 73-96.
- Huggins, D.R., Pan, W.L. 1993. Nitrogen Efficiency Component Analysis: An Evaluation of Cropping System Differences in Productivity. *Agron. J.* 85:898–905.
- Huggins, D.R., Alderfer, R.D. 1995. Yield variability within a long-term corn management study: Implications for precision farming. In: Robert PC, et al., editors. *Site-specific management for agricultural systems.* Madison, WI: ASA, CSSA, and SSSA. pp 417 – 426.
- Hunt, R., Warren, W.J., Hand, D.W. 1990. Integrated analysis of resource capture and utilization. *Ann Bot-London.* 65: 643-648.
- Jaynes, D.B., Colvin, T.S. 1997. Spatiotemporal variability of corn and soybean yield. *Agron J.* 89(1): 30-37.
- Jamison, V.C., Kroth, E.M. 1957. Available Moisture Storage Capacity in Relation to Textural Composition and Organic Matter Content of Several Missouri Soils. *Soil Sci Soc Am J.* 22 (3): 189-192.
- Jin, J., Jiang, C. 2002. Spatial variability of soil nutrients and site-specific nutrient management in the P.R. China. *Comput Electro Agr.* 36: 165-172.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P., Singh, U., Gijsman, A., Ritchie, J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur J Agron.* 18: 235-265.

- Jones, J.W., Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Thornton, P.K., Wilkens, P.W., Imamura, D.T., Bowen, W.T., Singh, U. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer; DSSAT v3. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, pp. 157-177.
- Jones, C.A., Kiniry, J.R., 1986. *CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*. Texas A&M University Press, College Station, Texas.
- Johnson, C.K., Mortensen, D.A., Wienhold, B.J., Shanahan, J.F., Doran, J.W. 2003. Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. *Agron. J.* 95:303–315.
- Jowkin V. and J.J. Schoenau. 1998. Impact of tillage and landscape position on nitrogen availability and yield of spring wheat in the Brown soil zone in southwestern Saskatchewan. *Can J Soil Sci.* 78:563-572.
- Júnior, V.V., Carvalho, M.P., Dafonte, J., Freddi, O.S., Vidal Vazquez, E., Ingaramo, O.E. 2006. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. *Soil Till Res.* 85(1): 166-177.
- Kallsen, C.E., Sammis, T.W., Gregory, E.J. 1984. Nitrogen and yield as related to water use of spring barley. *Agron J.* 76: 59-64.
- Kant, S., Bi, Y., Rothstein, S.J. 2011. Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. *J Exp Bot.* 62 (4): 1499–1509.
- Kho, R.M. 2000. On crop production and the balance of available resources. *Agr Ecosyst Environ.* 80: 71–85.
- Khosla R., Fleming K., Delgado, J.A., Shaver, T.M., Westfall, D.G. 2002. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *J Soil Water Conserv.* 57(6):513-518.
- Kim, K., Clay, D.E., Carlson, C.G., Clay, S.A., Trooien, T. 2008. Do Synergistic Relationships between Nitrogen and Water Influence the Ability of Corn to Use Nitrogen Derived from Fertilizer and Soil? *Agron J* 100:551–556.
- Lamb, J.A., Dowdy, R.H., Anderson, J.L., Rehm, G.W. 1997. Spatial and temporal stability of corn grain yields. *J. Prod. Agric.* 10:410–414.
- Lamm, F.R., Trooien T.P., Manges H.L. and H.D. Sunderman. 2001. Nitrogen fertilization for subsurface drip-irrigated corn. *Trans. ASAE* 44:533–542.
- Lascano R.J., Baumhardt, R.L., Hicks, S.K., Lavindar, J.A. 1999. Spatial and temporal distribution of surface water content in a large agricultural field. In: Robert P.C., Rust R.H. and Larson W.E. (Eds), *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Farming*. American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/ Soil Science Society of America, Madison, WI, p19-30.
- Lemaire, G., Gastal, F.F. 2009. Chapter 8: Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. In: *Crop Physiology*. Sadras, V.O., Calderini, D. (Eds). p171-211. ISBN 9780123744319,

<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374431-9.00008-6>
 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744319000086>)

- Lemaire, G., Meynard, J.M. 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In: Diagnosis of the nitrogen status in crops. Lemaire G. (Ed). Springer-Verlag, Heidelberg, p45-56.
- Liebscher, G. 1895. Untersuchungen über die Bestimmung des Düngerbedürfnisses der Ackerböden und Kulturpflanzen. *J. Landwirtsch.* 43: 49–216.
- Link, J. 2005. Investigation and modeling of the optimization potential of adapted nitrogen fertilization strategies in corn cropping systems with regard to minimize nitrogen losses. *Doktors der agrarwissenschaften.* 172p.
- López-Cedrón, F. X., Boote, K. J., Piñeiro, J., y Sau, F. (2008). Improving the CERES-Maize model ability to simulate water deficit impact on maize production and yield components. *Agron J.* 100(2): 296-307
- Ma, B. L., Dwyer, L.M., Gregorich E.G. 1999. Soil Nitrogen Amendment Effects on Nitrogen Uptake and Grain Yield of Maize. *Agron. J.* 91:650–656
- Mamo, M., Malzer, G.L., Mulla, D.J., Huggins, D.R., Strock, J. 2003. Spatial and Temporal Variation in Economically Optimum Nitrogen Rate for Corn. *Agron J.* 95: 958–964
- Maddonni, A.G. 2012. Analysis of the climatic constrains to maize production in the current agricultural region of Argentina-a probabilistic approach. *Theor Appl Climatol.* 107(3-4): 325-345.
- Mead, R., Curnow, R.N., Hasted, A.M. 1993. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology.* Chapman & Hall, New York.
- Melchiori, R.J.M., Pautasso, J.M., Albarenque, S.M., Kemerer, A.C. 2011. Fertilización nitrogenada en trigo según zonas de manejo. *Jornada Regional de cultivos de Invierno.* 1º Edición. p59.
- Melchiori, R.J.M. 2007. Agricultura de precisión en Entre Ríos, aspectos relacionados con la sustentabilidad. En: *Agricultura sustentable en Entre Ríos.* Caviglia, O.P., Papparotti, O.F., Sasal, M.C. (Ed). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Meisinger, J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil crops system. In: *Nitrogen in crop production.* Hauck R.D. (Ed). Soil Science Society of America. USA
- Miao, Y., Mulla, D.J., Batchelor, W.D., Paz, J.O, Robert, P.C., Wiebers, M. 2006. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. *Agron J.* 98: 545-553.
- Michelena, R., Irurtia, C.B., Mon, R., Vavruska, F.A., Pittaluga, A. 1989. Degradacion de suelos en el norte de la Región Pampeana. *Publicación técnica n°6.* Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria, Centros Regionales Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe. Proyecto de Agricultura Conservacionista.
- Mizzou-ARS. (2000). *Management zone analyst Version 1.0.1.* University of Missouri-Columbia and Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture. <http://www.ars.usda.gov/services/software/software.htm>. (Julio 2011).

- Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A. 1982. Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization. *Agron J.* 74:562-564.
- Moral, F.J., Terron, J.M., Rebollo, F.J. 2011. Site-specific management zones based on the rasch model and geostatistical techniques. *Comput electron Agric.* 75(2):223-230.
- Muschetti Piana, M.P. 2012. Riesgo de pérdidas de nitratos por lixiviación en fertilizaciones nitrogenadas según manejo uniforme y sitio-especifico del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Tesis de Maestría Universidad de Buenos Aires.
- Nielsen, D.C., Halvorson, A.D. 1991 Nitrogen Fertility Influence on Water Stress and Yield of Winter Wheat. *Agron J.* 83:1065-1070.
- Nosetto, M.D., Jobbágy, E., Jackson, R., Sznajder, G. 2009. Reciprocal influence between crops and shallow groundwater in the Pampas. *Field Crop Res.* 113: 138-148.
- Oliver, Y.M., Robertson, M.J., Wong, M.T.F. 2010. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *Eur J Agron.* 32(1): 40-50.
- O'Neal, M.R., Frankenberger, J.R., Ess, D.R. 2002. Use of CERES-Maize to study effect of spatial precipitation variability on yield. *Agr Sys.* 73: 205–225.
- O'Neill, P.M., Shanahan, J.F., Schepers, J.S., Caldwell, B. 2004. Agronomic responses of corn hybrids from different eras to deficit and adequate levels of water and nitrogen. *Agron. J.* 96:1660–1667.
- Otegui, M.E., Andrade, F.H., Suero, E.E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crop Res.* 40(2): 87-94.
- Pang, X.P., Letey, J., Wu, L. 1997. Yield and Nitrogen Uptake Prediction by CERES-Maize Model under Semiarid Conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:254-256.
- Parton, W.J., Ojima, D.S., Cole, C.V., Schimel, D.S. 1994. A General Model for Soil Organic Matter Dynamics: Sensitivity to Litter Chemistry, Texture and Management. *SSSA Spec Publ.* 147-167.
- Passioura, J. B., Angus, J. F. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Advances in agronomy.* 106: 37-75.
- Paz, J.O., Batchelor, W.D., Babcock, B.A., Colvin, T.S., Logsdon, S.D., Kaspar, T.C., Karlen, D.L. 1999. Model-based technique to determine variable rate nitrogen for corn. *Agr Sys.* 61: 69-75.
- Plan Mapa de Suelos, 1998. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos, Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 17, 114 p.
- Pedrol, H., Castellarín, J., Ferraguti, F., Rosso, O. 2008. Respuesta a la fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del agua en el cultivo de maíz según nivel hídrico. *Inpofos* 20:17-20.
- Peralta, N.R., Costa, J.L. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Comput Electron Agr.* 99: 218–226.

- Pierce, F., Nowak, P. 1999. Aspects of precision agriculture. In: D. Spark (Ed) *Advance in Agronomy* 67. Academic Press. P 1-85.
- Ping, J.L., Ferguson R.B. y A. Dobermann. 2008. Site-Specific Nitrogen and Plant Density Management in Irrigated Maize. *Agron. J.* 100:1193–1204.
- Piñeiro G., Perelman S., Guerschman J.P. and J.M. Paruelo. 2008. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecol Model.* 216: 316–322.
- Raun, W.R., Schepers, J.S. 2008. Nitrogen in Agricultural Systems. *Agronomy Monograph* n°49 (Eds: Schepers J.S. and W.R. Raun). 675-693.
- Raun, W.R., Johnson, G.V. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron J.* 91:357–363.
- Rinaldi, M. 2004. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES-Wheat model. *Field Crop Res.* 89: 27–37
- Ritchie J.T., Basso B., Gerakis A., White I. 2005. Incorporating seasonal rainfall intensity and soil properties into a daily surface runoff model. *Agronomy Abs.*
- Ritchie, J.T. 1998. Soil water balance and plant water stress. In *Understanding options for agricultural production*. Springer Netherlands. 41-54.
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J., Benson, G.O. 1986. How a corn plant develops. Special Report Nro. 48. Iowa State University of Science and Technology. Ames, Iowa, 21 pp.
- Ritchie, J.T., Otter, S. 1985. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. In: *ARS Wheat Yield Project. ARS-38. Natl Tech Info Serv, Spring-field, Missouri*, pp. 159-175.
- Robertson, G.P., Vitousek, P.M. 2009. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource. *Annu Rev Env Resour.* 34: 97-125.
- Robertson, G.P., Crum, J.R., Ellis, B.G. 1993. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. *Oecologia.* 96: 451-456.
- Sadler, E.J., Gerwig, B.K., Evans, D.E., Millen, D.E., Bauer, P.J., Busscher, W.J. 1999. Site-specificity of CERES-Maize model parameters: a case of study in Southeastern US Coastal Plain. 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, Denmark.
- Sadler, E.J., Bauer, P.J., Busscher, W.J., Millen, J.A. 2000a. Site-specific anlysis of a droughted corn crop: II. Water use and stress. *Agron J.* 92: 403-410.
- Sadler, E.J., Gerwig, B.K., Evans, D.E., Busscher, W.J., Bauer, P.J. 2000b. Site-specific modeling of corn yield in the SE coastal plain. *Agric. Syst.* 64 (3): 189-207.
- Sadras, V.O., Lemaire, G. 2014. Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes. *Field Crop Res.* 164:54–64.
- Sadras, V.O., Grassini, P., Steduto, P. 2011. Status of water use efficiency of main crops. In: *The state of world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)*. FAO, Rome and Earthscan, London.

- Sadras, V.O. 2007. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *Field Crop Res.* 100: 125–138.
- Sadras, V.O. 2005. A quantitative top-down view of interactions between stresses: theory and analysis of nitrogen-water co-limitation in Mediterranean agro-ecosystems. *Aust J Agr Res.* 56: 1151-1157.
- Sadras, V.O. 2004. Yield and water-use efficiency of water- and nitrogen-stressed wheat crops increase with degree of co-limitation. *Europ. J. Agronomy.* 21: 455–464.
- Sadras, V.O., Roget, D.K. 2004. Production and Environmental Aspects of Cropping Intensification in a Semiarid Environment of Southeastern Australia. *Agron J.* 96:236–246.
- Sahaschai Kongtoir, R. M., Boonampho, P.P. 1999. Nitrogen fertilizer recommendation for grain yield of corn using a modeling approach. *Thai J. Agric. Sci.* 32(1), 73-83.
- Schmidt, J.P., Hong, N., Dellinger, A., Beegle, D.B., Lin, H. 2007. Hillslope Variability in Corn Response to Nitrogen Linked to In-Season Soil Moisture Redistribution. *Agron J.* 99: 229–237
- Schmidhalter, U., Studer, C. 1998. Water use efficiency as influenced by plant mineral nutrition. 1st Sino-German Workshop “Impact of plant nutrition on Sustainable Agricultural Production. Kiel. 22-23 oct 1998. 9p
- Schepers, A.R., Shanahan, J.F., Liebigh, M.A., Schepers, J.S., Johnson, S.H., Luchiari, A. 2004. Appropriateness of Management Zones for Characterizing Spatial Variability of Soil Properties and Irrigated Corn Yields across Years. *Agron J.* 96:195–203.
- Scotta, E., Papparotti, O., Nani, L., Conde, A., Rojas, A., Castañeira, H. 1989. Manual de sistematización de tierras para control de erosión hídrica y aguas superficiales excedentes. Segunda edición corregida y aumentada. ISSN 0325 – 8882. Serie Didáctica N° 17.
- Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R., Schepers, J. S. 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and electronics in agriculture.* 61(1): 51-62.
- Sinclair, T.R., Park, W.I. 1993. Inadequacy of the Liebig limiting-factor paradigm for explaining varying crop yields. *Agron J.* 85: 742-746.
- Sinclair, T.R., Tanner, C.B., Bennett, J.M. 1984. Water-Use Efficiency in Crop Production. *BioScience.* 34 (1): 36-40.
- Smith, M.W.I., Skjemstad, J.O., Gehrt, E., Kögel-Knaber, I. 1999. Charred organic carbon in German Chernozemic soils. *Eur J Soil Sci.* 50: 351-365.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy, eleventh ed. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 346 pp.
- Stafford, J.V., Ambler, B., Lark, R.M., Catt, J. 1996. Mapping and interpreting yield variation in cereal crops. *Comput Electron Agr.* 14:101-119.
- Teixeira, E. I., George ,M., Herreman, T., Brown, H., Fletcher, A., Chakwizira, E., Noble, A. 2014. The impact of water and nitrogen limitation on maize biomass and resource-use efficiencies for radiation, water and nitrogen. *Field Crop Res.* 168: 109–118.

- Timlin, D.J., Pachepsky, Y, Snyder, V.A., Bryan, R.B. 1998. Spatial and Temporal Variability of Corn Grain Yield on a Hillslope. *Soil Sci Soc Am J.*62:764-773.
- Thorp, K.R., DeJonge, K.C., Kaleita, A.L. 2008. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. *Comput Electron Agr.* 64: 276-285.
- Thorp, K.R., Batchelor, W.D., Paz, J.O., Kaleita, A.L., DeJonge, K.C. 2007. Using cross-validation to evaluate CERES-Maize yield simulations within a decision support system for precision agriculture. *Transactions of the ASABE.* 50(4): 1467-1479.
- United States Department of Agriculture. 1993. *National Engineering Handbook, Part 623. Chapter 2: Irrigation water requirements.* USDA, SCS, Washington, D.C. p142-154.
- Urricarriet, S., LAVADO, R.S. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la pampa ondulada. *Ciencia del suelo* 17(1): 37-44.
- Verity, G E., Anderson, D.W. 1990. Soil erosion effects on soil quality and yield. *Can. J. Soil Sci:* 70:471-484.
- Viña, A., Gitelson, A.A. 2005. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. *Geophys Res Lett.* 32: L17403. doi:10.1029/2005GL023647.
- Von Liebig, J., 1855. *Die Grundsätze der Agriculture–Chemie mit Rücksicht auf die in England angestellten Untersuchungen.* Vieweg und Sohn, Braunschweig, Germany, 107 pp.
- Washmon, C.N., Solie, J.B., Raun, W.R., Itenfisu, D.D. 2002. Within Field Variability in Wheat Grain Yields over Nine Years in Oklahoma. *J Plant Nutr.* 25(12): 2655–2662.
- Whelan, B.M., McBratney, A.B. 2000. The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. *Precis Agric.* 2: 265-279.
- Zak D., Pregitzer, R., Kurt, S.1990. Spatial and Temporal Variability of Nitrogen Cycling in Northern Lower Michigan. *Forest Sci.* 36 (2): 367-380.

ANEXO

Tabla Anexo 1. Valores de nitrógeno disponible (Nd), evapotranspiración del cultivo (ETC), biomasa a madurez fisiológica, rendimiento en grano, eficiencia de uso de N en biomasa y en grano (EUNb y EUNg) y eficiencia de uso de agua en biomasa y en grano (EUAb y EUAg) de parcelas regadas en cada zona de manejo (ZM) y tratamiento de fertilización con N en el Lote 1 y Lote 2.

Lote	ZM	N	Nd	ETC	Biomasa	Rendimiento	EUNb	EUNg	EUAb	EUAg
Lote 1	ZM1L1	N0	179	685	19151	7171	107	40	28	10
		N210	386	562	22358	8538	58	22	40	15
	ZM2L1	N0	143	651	14837	6427	103	45	23	10
		N210	387	534	20759	10434	54	27	39	20
	ZM3L1	N0	117	562	12712	6122	109	52	23	11
		N210	337	556	18040	6937	54	21	32	12
	ZM4L1	N0	147	531	17713	7163	120	49	33	13
		N210	410	539	24462	10147	60	25	45	19
Lote 2	ZM1L2	N0	142	577	19028	7209	134	51	33	12
		N210	352	477	20278	10366	58	29	43	22
	ZM2L2	N0	81	505	11531	5132	143	63	23	10
		N210	356	439	20135	10369	57	29	46	24
	ZM3L2	N0	82	369	13306	4809	161	58	36	13
		N210	328	458	16346	10463	50	32	36	23

Tabla Anexo 2. Características de los suelos utilizados para realizar las simulaciones por ZM y año. SoilID: identificación del suelo, MH: horizonte, ZLYR: profundidad a la base del horizonte (cm), LL: punto de marchitez permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), DUL: capacidad de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), SAT: saturación ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), BD: densidad aparente (g cm^{-3})OC: carbono orgánico (%), Clay: contenido de arcilla (%), Silt: contenido de limo (%), SWCN: conductividad hidráulica en saturación (cm h^{-1})

	SoilID	MH	ZLYR	LL	DUL	SAT	BD	OC	Clay	Silt	SWCN
Lote 1	ZM1L1	AP	17	0.17	0.37	0.41	1.20	2.85	27.6	67.9	0.825
		B21t	34	0.24	0.37	0.45	1.28	1.53	41.5	54.6	0.371
		B22t	63	0.29	0.33	0.41	1.26	1.03	34.6	61.4	0.536
		B31	86	0.19	0.33	0.41	1.23	0.69	31	64.5	0.825
		B32	104	0.18	0.33	0.41	1.23	0.47	27.6	67.5	0.99
		Cca	160	0.18	0.3	0.41	1.23	0.4	25.5	69.4	1.073
	ZM2L1	AP	17	0.19	0.37	0.39	1.20	3.29	27.6	67.9	0.722
		B21t	34	0.29	0.37	0.45	1.28	1.53	41.5	54.6	0.433
		B22t	63	0.28	0.37	0.41	1.26	1.03	34.6	61.4	0.514
		B31	86	0.21	0.37	0.41	1.23	0.69	31	64.5	0.791
		B32	104	0.19	0.33	0.41	1.23	0.47	27.6	67.5	0.949
		Cca	160	0.19	0.28	0.41	1.23	0.4	25.5	69.4	1.028
	ZM3L1	AP	12	0.2	0.3	0.39	1.20	2.81	27.6	67.9	0.55
		B21t	29	0.26	0.33	0.45	1.28	1.53	41.5	54.6	0.248
		B22t	58	0.26	0.37	0.41	1.26	1.03	34.6	61.4	0.358
		B31	81	0.23	0.37	0.41	1.23	0.69	31	64.5	0.55
		B32	99	0.22	0.37	0.41	1.23	0.47	27.6	67.5	0.66
		Cca	160	0.22	0.37	0.41	1.23	0.4	25.5	69.4	0.715
	ZM4L1	AP	20	0.19	0.37	0.39	1.20	2.65	27.6	67.9	0.95
		B21t	37	0.23	0.35	0.45	1.28	1.53	41.5	54.6	0.85
		B22t	66	0.31	0.35	0.41	1.26	1.03	34.6	61.4	0.88
		B31	89	0.22	0.35	0.41	1.23	0.69	31	64.5	0.917
		B32	104	0.21	0.35	0.41	1.23	0.47	27.6	67.5	1.1
		Cca	160	0.21	0.35	0.41	1.23	0.4	25.5	69.4	1.192
ZM1L2	AP	22	0.18	0.41	0.45	1.22	2.62	33.5	62.9	0.95	
	B21t	47	0.27	0.41	0.45	1.28	2.53	46.4	50.4	0.85	
	B2	63	0.32	0.37	0.40	1.26	1.83	43.1	53.3	0.917	
	B3ca	100	0.2	0.37	0.40	1.23	0.87	36.7	59.9	1.1	
	ZM2L2	A1	17	0.22	0.44	0.53	1.20	1.74	27	66	0.722
		B21t	44	0.34	0.44	0.53	1.26	1.05	42.3	51.9	0.433
B22t		72	0.34	0.44	0.53	1.22	1.03	45.2	49.3	0.514	
B3ca		98	0.25	0.44	0.53	1.23	0.28	37	57.3	0.791	
Cca		100	0.23	0.4	0.48	1.23	0.26	34.1	57.4	0.949	
ZM3L2	AP	12	0.23	0.35	0.40	1.22	1.53	28.6	65.8	0.55	
	A1	21	0.3	0.38	0.44	1.28	0.86	46.5	48.6	0.248	
	B21t	35	0.3	0.43	0.49	1.26	0.5	37.6	57.2	0.358	
	B22ca	71	0.26	0.43	0.49	1.23	0.26	27.7	66	0.55	
	B3ca	100	0.26	0.43	0.49	1.23	0.26	27.6	68.2	0.66	

Tabla Anexo 3. Modelos comparados en el Lote 1. Modelo completo, describe los resultados utilizando 4 funciones una para cada ZM; Modelo simple1, describe la relación entre variables con una sola función (5 parámetros); Modelo simple2, que describe los resultados con una única función (2 parámetros).

Variable	Modelo
EUA _b	Completo = $55ZM1L1 + 35ZM2L1 + 36ZM3L1 + 19ZM4L1 - 24C_{AN}ZM1L1 - 3C_{AN}ZM2L1 - 14C_{AN}ZM3L1 - 17C_{AN}ZM4L1$
	Simple1 = $41ZM1L1 + 37ZM2L1 + 29ZM3L1 + 38ZM4L1 - 6.5C_{AN}$
	Simple2 = $34 - 3.7C_{AN}$
EUA _g	Completo = $23ZM1L1 + 22ZM2L1 + 14ZM3L1 + 13ZM4L1 - 11C_{AN}ZM1L1 - 12C_{AN}ZM2L1 - 6C_{AN}ZM3L1 + 1.8 \times 10^{-15}C_{AN}ZM4L1$
	Simple1 = $20ZM1L1 + 18ZM2L1 + 14ZM3L1 + 19ZM4L1 - 7.3C_{AN}$
	Simple2 = $17.2 - 5.9C_{AN}$
EUN _{db}	Completo = $189C_{AN}ZM1L1 + 208C_{AN}ZM2L1 + 169C_{AN}ZM3L1 + 161C_{AN}ZM4L1 - 74ZM1L1 - 90ZM2L1 - 65ZM3L1 - 62ZM4L1$
	Simple1 = $181C_{AN} - 68ZM1L1 - 68ZM2L1 - 78ZM3L1 - 80ZM4L1$
	Simple2 = $177C_{AN} - 70$
EUN _{dg}	Completo = $74C_{AN}ZM1L1 + 61C_{AN}ZM2L1 + 53C_{AN}ZM3L1 + 48C_{AN}ZM4L1 - 27ZM1L1 - 18ZM2L1 - 19ZM3L1 - 12ZM4L1$
	Simple1 = $58C_{AN} - 14ZM1L1 - 16ZM2L1 - 22ZM3L1 - 20ZM4L1$
	Simple2 = $57C_{AN} - 18$

Tabla Anexo 4. Modelos comparados en el Lote 2. Modelo completo, describe los resultados utilizando 4 funciones una para cada ZM; Modelo simple1, describe la relación entre variables con una sola función (4 parámetros); Modelo simple2, que describe los resultados con una única función (2 parámetros).

Variable	Modelo	
EUA _b	Completo	$= 104C_{AN}ZM1L2 + 108C_{AN}ZM2L2 + 24C_{AN}ZM3L2 - 46ZM1L2 - 49ZM2L2 + 18ZM3L2$
	Simple1	$= 55C_{AN} - 26ZM1L2 - 7.7ZM2L2 - 5.6ZM3L2$
	Simple2	$= 63C_{AN} - 12$
EUA _g	Completo	$= 58C_{AN}ZM1L2 + 41C_{AN}ZM2L2 + 19C_{AN}ZM3L2 - 30ZM1L2 - 17ZM2L2 - 2ZM3L2 -$
	Simple1	$= 31C_{AN} - 5.7ZM1L2 - 8.8ZM2L2 - 7.6ZM3L2$
	Simple2	$= 37C_{AN} - 11$
EUN _{db}	Completo	$= 209ZM1L2 + 247ZM2L2 + 284ZM3L2 - 143C_{AN}ZM1L2 - 199C_{AN}ZM2L2 - 252C_{AN}ZM3L2$
	Simple1	$= 277ZM1L2 + 263ZM2L2 + 259ZM3L2 - 220C_{AN}$
	Simple2	$= 240 - 189C_{AN}$
EUN _{dg}	Completo	$= 83ZM1L2 + 124ZM2L2 + 110ZM3L2 - 51C_{AN}ZM1L2 - 109C_{AN}ZM2L2 - 93C_{AN}ZM3L2$
	Simple1	$= 115ZM1L2 + 106ZM2L2 + 104ZM3L2 - 258 - 86C_{AN}$
	Simple2	$= 94 - 68C_{AN}$

Tabla Anexo 5. Análisis de la variación del error entre modelos de regresión y significancia de la diferencia entre modelos, para la eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b), y en grano (EUA_g), eficiencia de uso de N_d en biomasa (EUN_{db}) y en grano (EUN_{dg}) del cultivo de maíz en 4 ZM (ZM1L2, ZM2L2, ZM3L2 y ZM4L2) y 4 tratamientos de fertilización con N (N0, N70, N140 y N210) del Lote 1.

EUAb					
	DF	SS	MSS	F	P
Diferencia	3	41	14	2.55	0.11
Modelo completo	8	43	5		
Modelo simple1	11	83			
Diferencia	6	329	55	10	0.002
Modelo completo	8	43	5		
Modelo simple2	14	371			
Diferencia	3	288	96	13	<0.0001
Modelo simple1	11	83	8		
Modelo simple2	14	371			
EUAg					
	DF	SS	MSS	F	P
Diferencia	3	4	1	2.83	0.1
Modelo completo	8	4	0		
Modelo simple1	11	8			
Diferencia	6	85	14	29	<0.0001
Modelo completo	8	4	0		
Modelo simple2	14	88			
Diferencia	3	80	27	37	<0.0001
Modelo simple1	11	8	1		
Modelo simple2	14	88			
EUN _{db}					
	DF	SS	MSS	F	P
Diferencia	3	65.4	22	0.26	0.85
Modelo completo	8	679	85		
Modelo simple1	11	744			
Diferencia	6	583	97	1.15	0.41
Modelo completo	8	679	85		
Modelo simple2	14	1262			
Diferencia	3	518	173	3	0.1
Modelo simple1	11	744	68		
Modelo simple2	14	1262			
EUN _g					
	DF	SS	MSS	F	P
Diferencia	3	16.5	5.5	0.42	0.74
Modelo completo	8	104	13		
Modelo simple1	11	120			
Diferencia	6	201	34	2.58	0.1
Modelo completo	8	104	13		
Modelo simple2	14	305			
Diferencia	3	185	62	6	0.01
Modelo simple1	11	120	11		
Modelo simple2	14	305			

Tabla Anexo 6. Análisis de la variación del error entre modelos de regresión y significancia de la diferencia entre modelos, para la eficiencia de uso de agua en biomasa (EUA_b) y en grano (EUA_g), eficiencia de uso de N en biomasa (EUN_{db}) y en grano (EUN_{dg}) del cultivo de maíz en 3 ZM (ZM1L2, ZM2L2 y ZM3L2) y 4 tratamientos de fertilización con N (N0, N70, N140 y N210) del Lote 2.

EUA _b					
	DF	SS	MSS	F	P
Diferencia	2	173	86	4.94	0.43
Modelo completo	6	105	18		
Modelo simple1	8	278			
Diferencia	4	217	54	3	0.1
Modelo completo	6	105	18		
Modelo simple2	10	322			
Diferencia	2	44	22	1	0.6
Modelo simple1	8	278	35		
Modelo simple2	10	322			
EUA _g					
	DF	SS	MSS	F	P
Diferencia	2	31	15	2.55	0.16
Modelo completo	6	36	6		
Modelo simple1	8	67			
Diferencia	2	47	24	4	0.06
Modelo completo	6	36	6		
Modelo simple2	10	84			
Diferencia	2	16	8	1	0.44
Modelo simple1	8	67	8		
Modelo simple2	10	84			
EUN _{db}					
	DF	SS	MSS	F	P
Diferencia	2	223	111	0.97	0.054
Modelo completo	6	687	115		
Modelo simple1	8	910			
Diferencia	2	823	411	3.59	0.08
Modelo completo	6	687	115		
Modelo simple2	10	1510			
Diferencia	2	600	300	3	0.1
Modelo simple1	8	910	114		
Modelo simple2	10	1510			
EUN _{dg}					
	DF	SS	MSS	F	P
Diferencia	2	42.6	21	2.48	0.15
Modelo completo	6	52	9		
Modelo simple1	8	94			
Diferencia	2	404	202	1.764	0.006
Modelo completo	6	687	115		
Modelo simple2	10	283			
Diferencia	2	189	95	8	0.004
Modelo simple1	8	94	12		
Modelo simple2	10	283			

Tabla Anexo 7. ANOVA de resultados de simulación de largo plazo. Rendimiento, respuesta a N, eficiencia de uso de agua (EUA), eficiencia de uso de N (EUN_f), limitación de agua (L_A), limitación de N (L_N) y co-limitación de agua y N (C_{AN}).

		Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Respuesta (kg ha ⁻¹)	EUA (kg grano mm ⁻¹)	EUN_f (kg grano kg N ⁻¹)	L_A	L_N	C_{AN}
Lote 1	ZM	<0.0001	<0.0001	0.0009	<0.0001	<0.0001	0.7631	0.0203
	N	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.4881	<0.0001	<0.0001
	ZM*N	0.3886	0.3217	0.6767	0.2672	0.9999	0.1246	0.0015
Lote 2	ZM	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0016	<0.0001	<0.0001
	N	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0171	0.0066	<0.0001	<0.0001
	ZM*N	0.0159	0.0227	0.0758	0.072	0.7955	<0.0001	0.0146

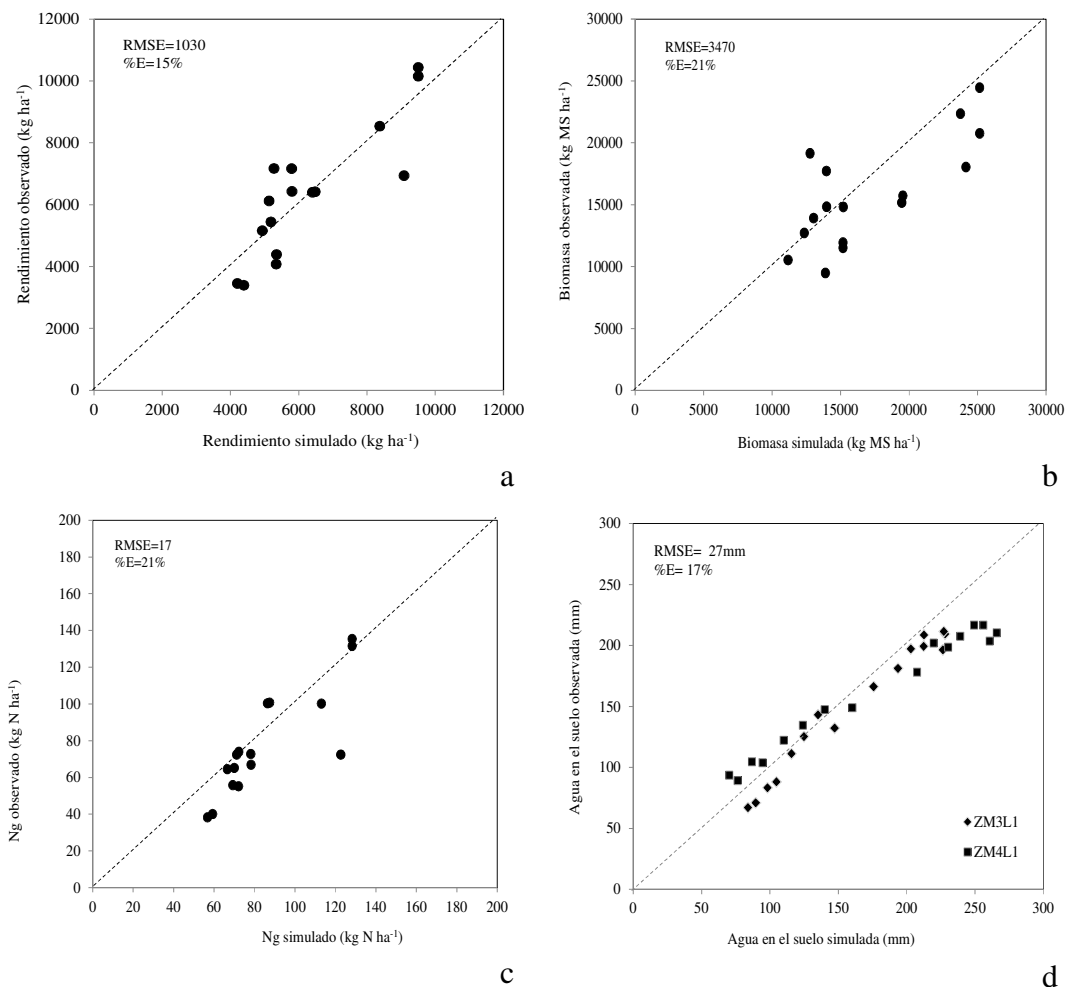


Figura Anexo 1. Resultados de la calibración del modelo de simulación SALUS. a) Biomasa simulada y biomasa observada, b) rendimiento simulado y rendimiento observado del cultivo de maíz, c) nitrógeno en grano simulado y observado y d) contenido de agua en el suelo simulado y observado hasta 160cm de profundidad. Los datos observados corresponden a los resultados obtenidos en las ZM3L2 y ZM4L2 del Lote 1, en las que se evaluaron 4 disponibilidades de N: N0, N70, N140 y N210 (kg N ha⁻¹). RMSE: raíz del cuadrado medio del error, %E: porcentaje de error respecto al promedio observado.

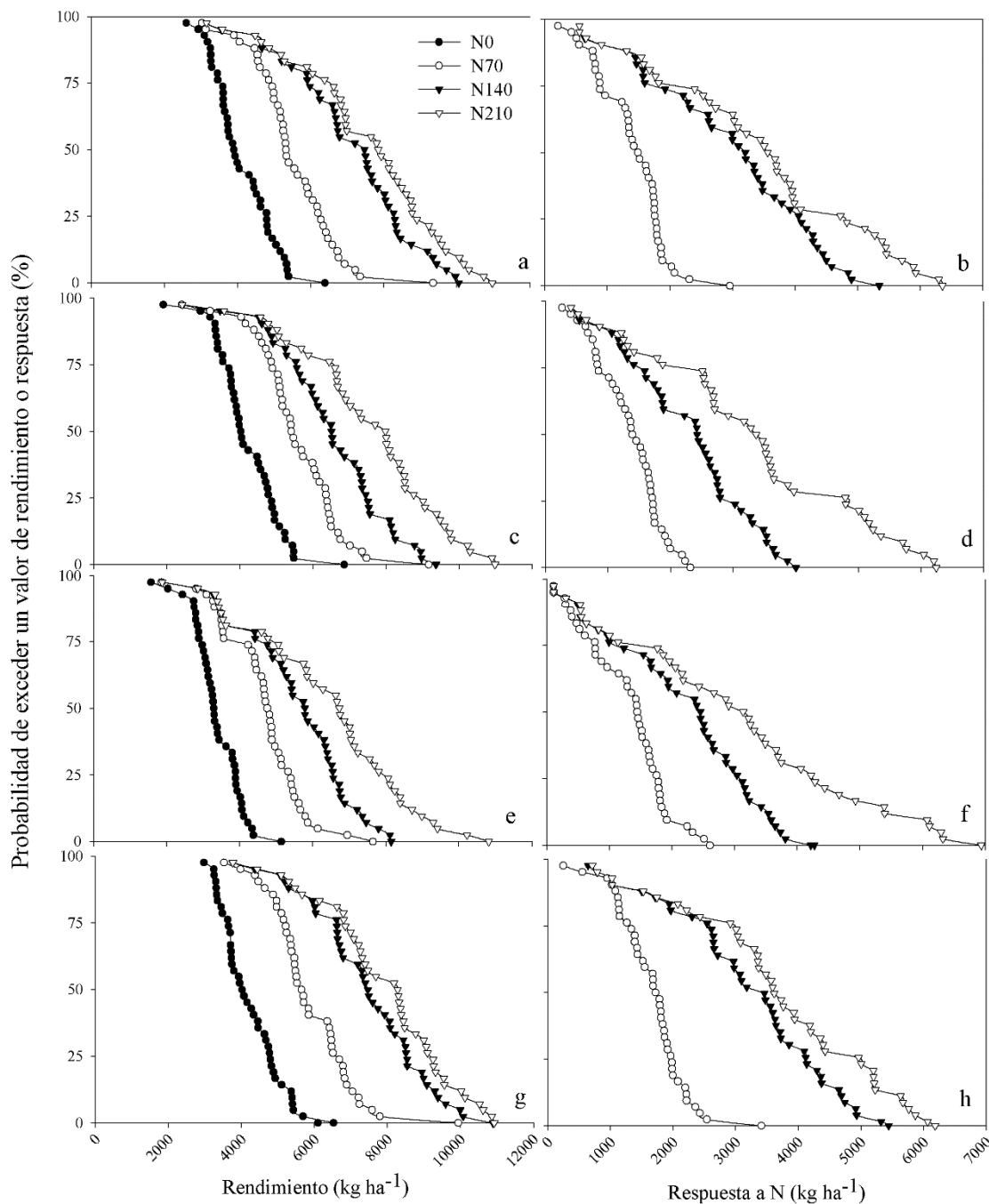


Figura Anexo 2. Probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un valor de rendimiento de maíz (a, c, e, g) o respuesta a N (b, d, f, h) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg N ha⁻¹) y 4 ZM del Lote 1 a y b) ZM1L2, c y d) ZM2L2, e y f) ZM3L2 y g y h) ZM4L2.

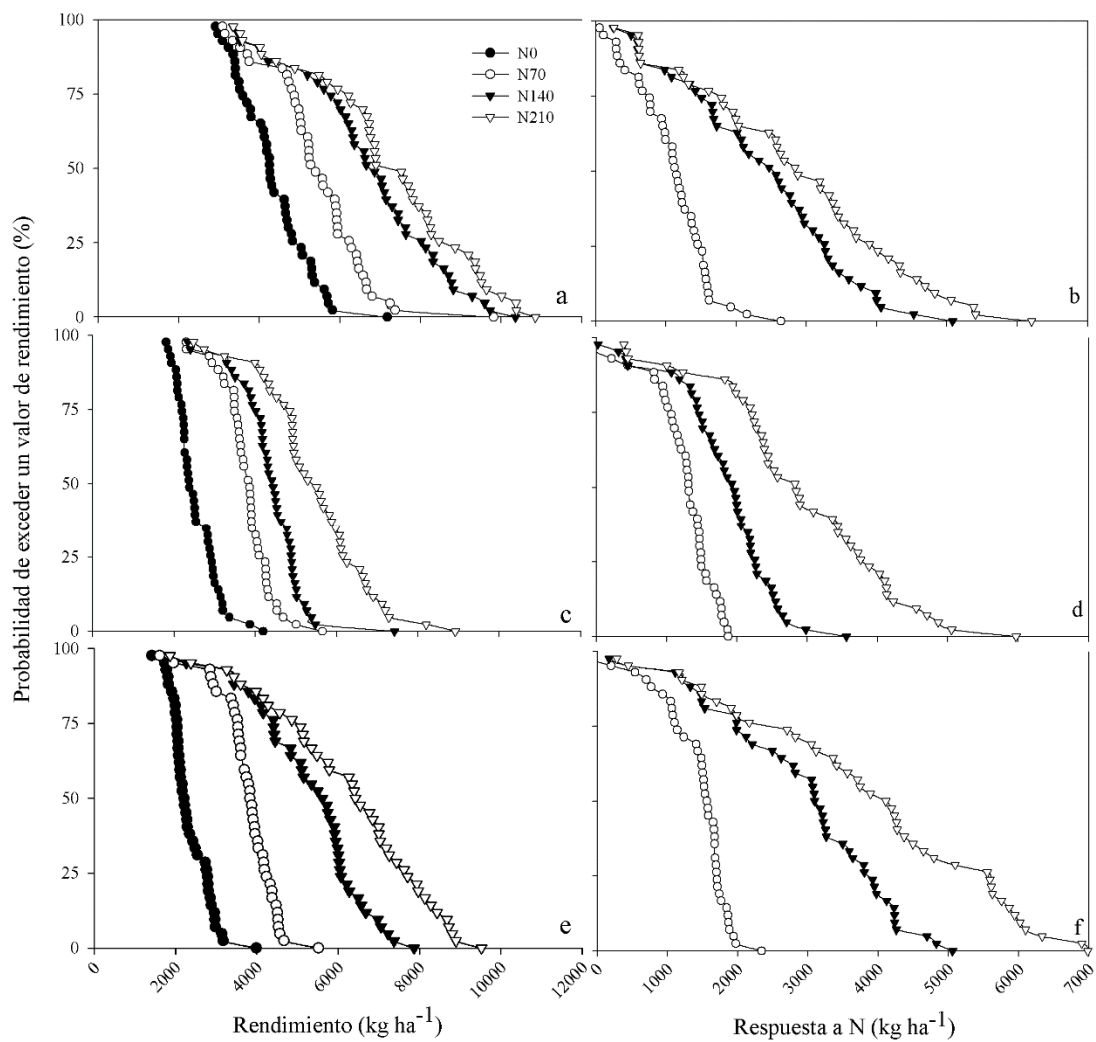


Figura Anexo 3. Probabilidad acumulada de alcanzar o exceder un valor un valor de rendimiento de maíz (a, c, e) o respuesta a N (b, d, f) en simulaciones realizadas para un periodo de 42 años (1971-2013) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 (kg ha⁻¹) y 3 ZM del Lote 2. a y b) ZM1L2, c y d) ZM2L2 y e y f) ZM3L2.