



**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE**  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA DE AGRONOMIA

Evaluación del comportamiento de seis cultivares de Ballica inglesa  
(*Lolium perenne* L.) ante distintos niveles de aluminio en solución

Tesis presentada como parte  
de los requisitos para optar al  
grado de Licenciado en  
Agronomía.

Marcelo Eduardo Aubel Chandía

VALDIVIA – CHILE

2005

Profesor Patrocinante  
Dante Pinochet T.  
Ing. Agr. M. Sc, Ph. D.

---

Profesor Copatrocinante  
Oscar Balocchi L.  
Ing. Agr. M. Sc, Ph. D.

---

Profesor Informante  
Ignacio López C.  
Ing. Agr. Ph. D.

---

## INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCION	1
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Concepto general de acidez del suelo	3
2.1.1	Acidez real o activa	3
2.1.2	Acidez intercambiable	4
2.1.3	Acidez residual	5
2.2	Aluminio	5
2.2.1	Especies de aluminio en la solución del suelo	5
2.2.2	Aluminio intercambiable	7
2.2.3	Aluminio no intercambiable	8
2.2.4	Aluminio en minerales primarios y secundarios	9
2.3	Aluminio fitotóxico	9
2.3.1	Efectos generales del aluminio en las plantas	9
2.3.1.1	Mecanismos de entrada, captación y ubicación de aluminio en las plantas	10
2.3.1.2	Toxicidad en las plantas	11
2.4	Mecanismos de adaptación al estrés del aluminio	12
2.4.1	Tolerancia al aluminio en diferentes plantas	13
2.4.1.1	Exclusión de los sitios sensitivos de la planta	15
2.4.1.2	Cambios de pH en la zona de las raíces	15
2.4.1.3	Exudados radicales y producción de ácidos orgánicos	16
2.4.1.4	Micorrizas	17
2.4.1.5	Nutrición de calcio de las plantas	17

Capítulo		Página
2.4.1.6	Nutrición del fósforo de las plantas	18
2.4.1.7	Nutrición del nitrógeno de las plantas	18
2.4.2	Control genético de la tolerancia al aluminio	18
2.5	Efectos benéficos del aluminio	19
2.6	Relación entre el aluminio y la producción animal	20
2.7	Ballica perenne ( <i>Lolium perenne</i> L.)	21
2.7.1	Descripción de la especie	21
2.7.2	Cultivares a estudiar	23
2.7.2.1	Cultivares diploides con origen en Nueva Zelandia	23
2.7.2.1.1	Aries HD	23
2.7.2.1.2	Kingston	24
2.7.2.1.3	Nui	25
2.7.2.1.4	Yatsyn 1	25
2.7.2.2	Cultivares tetraploides con origen en Nueva Zelandia	26
2.7.2.2.1	Quartet	26
2.7.2.3	Cultivares tetraploides con origen en Europa	27
2.7.2.3.1	Pastoral	27
2.8	Sistemas de producción en base a praderas y su relación con la acidez	27
2.8.1	Sensibilidad de especies forrajeras a la saturación de aluminio y pH	28
2.8.2	Ensayos realizados en tolerancia al aluminio en especies forrajeras	30
2.8.2.1	Ensayos nacionales	30
2.8.2.2	Ensayos internacionales	34
3	MATERIAL Y METODO	43
3.1	Ubicación	43
3.2	Control de las condiciones ambientales	43

Capítulo	Página	
3.2.1	Temperatura	43
3.2.2	Humedad relativa	43
3.2.3	Luz	44
3.3	Especie y cultivares evaluados	44
3.4	Material a utilizar	44
3.5	Preparación y montaje de las Jarras Leonard	44
3.5.1	Lavado de las jarras	44
3.5.2	Lavado del sustrato	44
3.5.3	Montaje y llenado de las jarras	45
3.6	Pregerminación y trasplante de las semillas	45
3.7	Homogeneización de las jarras	45
3.8	Crecimiento y corte de homogeneización de las plantas	46
3.9	Solución nutritiva	46
3.9.1	Aplicación de la solución nutritiva	47
3.10	Tratamientos	47
3.11	Variables evaluadas	47
3.11.1	Cosecha del material vegetal	48
3.11.2	Determinación de aluminio en el material vegetal	48
3.12	Diseño experimental y análisis estadístico	48
4	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	49
4.1	Determinación de contaminación con aluminio en el material experimental	49
4.1.1	Contaminación del sustrato	49
4.1.2	Agua destilada	50
4.1.3	Solución nutritiva	50
4.1.4	Mecha de conducción de la solución nutritiva	50
4.1.5	Equipo utilizado para la medición	50

Capítulo	Página	
4.2	Problemas metodológicos encontrados	50
4.2.1	Adaptación luego del transplante	51
4.2.2	Inclusión de Al en la formulación de las soluciones nutritivas	51
4.3	Análisis de las variables evaluadas	52
4.3.1	Producción de materia seca (MS) de los cultivares de <i>Lolium perenne</i> L.	52
4.3.1.1	Producción de materia seca en la parte aérea	54
4.3.1.2	Producción de materia seca en la parte radical	58
4.3.1.3	Producción de materia seca total	62
4.3.1.4	Análisis de regresión entre la concentración de aluminio en solución y la materia seca	66
4.3.2	Concentración de aluminio de los cultivares de <i>Lolium perenne</i> L.	70
4.3.2.1	Concentración de Al en la parte aérea	70
4.3.2.2	Concentración de Al en la parte radical	74
4.3.2.3	Análisis de regresión entre la concentración de aluminio en solución y la concentración de aluminio aéreo y radical	78
4.3.3	Absorción del aluminio de los cultivares de <i>Lolium perenne</i> L.	80
4.3.3.1	Absorción del Al en la parte aérea	81
4.3.3.2	Absorción del Al en la parte radical	82
4.4	Adaptación de los cultivares a la presencia de aluminio tóxico en solución	85
4.4.1	Clasificación de los cultivares según su resistencia o sensibilidad relativa al Al	89

Capítulo		Página
5	CONCLUSIONES	92
6	RESUMEN	94
	SUMMARY	97
7	BIBLIOGRAFIA	100
	ANEXOS	106

## INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Nivel crítico y sensibilidad de plantas de clima templado al aluminio	28
2	Valores de pH críticos y suficientes para algunos cultivos y praderas de la X Región, Chile	29
3	Rango óptimo de pH del suelo para el crecimiento de las principales especies forrajeras	30
4	Selección de tolerancia a aluminio de seis cultivares de ballica perenne	32
5	Categoría propuesta para tolerancia a la solución de aluminio basada en la actividad del aluminio ( $\mu\text{M Al}^{3+}$ ) requerida para reducir los rendimientos en 50% ( $\text{Al}_{\text{RY50}}$ )	38
6	Tolerancia relativa al Al de 20 especies de gramíneas y leguminosas pratenses	39
7	Composición de la solución nutritiva	46
8	Cultivares y nivel de aluminio del ensayo	47
9	Producción promedio de materia seca aérea del corte de homogeneización ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)*	52
10	Producción promedio de materia seca aérea (g/jarra) en los seis cultivares de <i>Lolium perenne</i> L.	55
11	Producción de MS aérea promedio (g/jarra) de los seis cultivares por tratamiento	57
12	Producción de MS aérea promedio (g/jarra) de los seis tratamientos por cultivar	58
13	Producción promedio de materia seca radical (g/jarra) en los seis cultivares de <i>Lolium perenne</i> L.	59



Cuadro		Página
14	Producción de MS radical promedio (g/jarra) de los seis cultivares por tratamiento	60
15	Producción de MS radical promedio (g/jarra) de los seis tratamientos por cultivar	61
16	Producción promedio de materia seca total (g/jarra) en los seis cultivares de <i>Lolium perenne</i> L.	63
17	Producción de MS total promedio (g/jarra) de los seis cultivares por tratamiento	65
18	Producción de MS total promedio (g/jarra) de los seis tratamientos por cultivar	66
19	Coeficientes de regresión y determinación para producción de materia seca aérea, radical y total	68
20	Concentración promedio de aluminio en la parte aérea (mg/kg) en los seis cultivares de ballica perenne	71
21	Concentración promedio de Al aéreo (mg/kg) de los tratamientos aplicados en la solución nutritiva	73
22	Concentración promedio de Al aéreo (mg/kg) de los cultivares	73
23	Concentración promedio de aluminio en la parte radical (mg/kg) en los seis cultivares de ballica perenne	74
24	Concentración promedio de Al radical (mg/kg) de los tratamientos aplicados en la solución nutritiva	77
25	Concentración promedio de Al radical (mg/kg) de los cultivares	77
26	Coeficientes de regresión y determinación para concentración de aluminio en la parte aérea y radical	79
27	Absorción promedio de aluminio en la parte aérea (mg Al/jarra) en los seis cultivares de <i>Lolium perenne</i> L.	81

Cuadro		Página
28	Absorción promedio de aluminio en la parte radical (mg/jarra) en los seis cultivares <i>Lolium perenne</i> L.	83
29	Actividad del aluminio ( $\mu\text{Mol Al/L}$ ) requerida para reducir los rendimientos de MS total en 75 y 50%, para los cultivares evaluados	90

**INDICE DE FIGURAS**

Figura		Página
1	Actividad relativa de especies de aluminio mononuclear y concentración total ( $Al_t$ ) de aluminio soluble como una función del pH	7
2	Rutas simplástica y apoplástica para la absorción de iones en la región de los pelos radicales.	11
3	Mecanismos de tolerancia versus mecanismos de exclusión del aluminio	14
4	<i>Lolium perenne</i> L. cultivar Yatsyn 1 en distintos niveles de concentración de Al en solución (raíces incluyen mecha de algodón) (Escalímetro comparativo=33 cm)	53
5	Presencia de hojas secas en todos los tratamientos de <i>Lolium perenne</i> cultivar Kingston, previo a la cosecha (día 98 del experimento)	54
6	Producción de materia seca aérea (g/jarra) en los seis cultivares	56
7	Producción de materia seca radical (g/jarra) en los seis cultivares	62
8	Producción de materia seca total (g/jarra) en los seis cultivares	64
9	Concentración de Al (mg/kg) en la parte aérea en los seis cultivares	72
10	Concentración de Al radical (mg/kg) en los seis cultivares	76

**INDICE DE ANEXOS**

Anexo		Página
1	Determinación de contaminación con Al del sustrato	107
2	Determinación de contaminación con Al del agua destilada	107
3	Determinación de contaminación con Al de la solución nutritiva (tratamiento 0 $\mu$ Mol Al/L)	107
4	Determinación de contaminación con Al de la Mecha de conducción de la solución nutritiva	108
5	Resultados del análisis de regresión de MS aérea (g/jarra) de los cultivares	108
6	Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries	109
7	Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Kingston	109
8	Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Nui	110
9	Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Pastoral	110
10	Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Quartet	111
11	Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1	111
12	Resultados del análisis de regresión de MS radical (g/jarra) de los cultivares	112
13	Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries	112

Anexo		Página
14	Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Kingston	113
15	Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Nui	113
16	Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Pastoral	114
17	Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Quartet	114
18	Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1	115
19	Resultados del análisis de regresión de MS total (g/jarra) de los cultivares	116
20	Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries	116
21	Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Kingston	117
22	Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Nui	117
23	Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Pastoral	118
24	Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Quartet	118
25	Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1	119
26	Resultados del análisis de regresión de concentración de Al aéreo (mg/kg) de los cultivares	120
27	Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries	121

Anexo		Página
28	Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1	121
29	Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Kingston	122
30	Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Nui	122
31	Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Pastoral	123
32	Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Quartet	123
33	Resultados del análisis de regresión de concentración de Al radical (mg/kg) de los cultivares	124
34	log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries	124
35	log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Kingston	125
36	log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Nui	125
37	log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Pastoral	126
38	log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Quartet	126
39	log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1	127

Anexo		Página
40	Determinación de la actividad del AI necesaria para reducir la producción de MS total al 75 Y 50% ( $RY_{50}$ ), en base al modelo cuadrático inverso	127
41	Reducción del rendimiento cultivar Aries	127
42	Reducción del rendimiento cultivar Kingston	128
43	Reducción del rendimiento cultivar Nui	128
44	Reducción del rendimiento cultivar Pastoral	128
45	Reducción del rendimiento cultivar Quartet	128
46	Reducción del rendimiento cultivar Yatsyn 1	128

## 1 INTRODUCCION

La acidificación es un proceso natural en los suelos, debido a una constante pérdida de cationes básicos y la liberación de hidrógeno a la solución del suelo. El principal problema debido a la acidez es la toxicidad a las plantas producida por el aluminio en solución, lo cual limita su crecimiento y se combina con otros factores que incluyen la toxicidad por aluminio en si misma, la toxicidad por manganeso e hidrógeno y la deficiencia inducida de nutrientes esenciales, especialmente calcio, magnesio, fósforo y molibdeno, todos conocidos como el síndrome de la acidez del suelo.

En el sur de Chile (IX y X Regiones), las praderas constituyen el recurso forrajero más abundante, las cuales se utilizan preferentemente como pastoreo directo y ensilaje. Generalmente, con altos niveles de acidez, la pradera presenta una predominancia de especies mejor adaptadas a condiciones de altos niveles de Al como chépica (*Agrostis capillaris* L.) y pasto miel (*Holcus lanatus* L.), las cuales son consideradas de bajo y medio valor forrajero respectivamente. La mejor adaptación de éstas especies conduce a una ausencia total o parcial de especies de mayor valor forrajero como trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y ballicas (*Lolium* sp.). En el sur de Chile, la especie pratense más sembrada en los sistemas intensivos de producción de carne y leche es ballica inglesa (*Lolium perenne* L.) ya sea en siembras puras o asociada con trébol blanco (*Trifolium repens* L.).

De esta forma, en los últimos años y continuamente se están introduciendo nuevas variedades comerciales de ballicas perennes, principalmente provenientes de Nueva Zelandia y de Europa. Sin embargo, el comportamiento productivo y adaptativo de estas variedades en medios ácidos, es aún poco conocido y requiere su evaluación para estimar la adaptabilidad



que tendrán estos nuevos cultivares en las condiciones de los suelos ácidos del sur de Chile.

Basado en este contexto es que se plantea la siguiente investigación, estableciéndose como hipótesis general que:

- Cultivares de *Lolium perenne* L. poseen diferentes niveles de adaptación a la presencia de aluminio tóxico en la solución del suelo.

Tomando en cuenta la hipótesis expuesta se plantea estudiar el efecto del aluminio tóxico en solución, en jarras Leonard con cuarzo, sobre el comportamiento biológico de seis cultivares (variedades comerciales) de *Lolium perenne* L.

Para lograr el objetivo general se plantea los siguientes objetivos específicos:

- Medir el efecto fitotóxico de distintas concentraciones de aluminio en solución sobre los cultivares de *Lolium perenne* L., Aries HD, Kingston, Nui, Pastoral, Quartet y Yatsyn 1, evaluándose el efecto de la concentración de aluminio de la solución nutritiva en los cultivares a nivel radical, la translocación del aluminio absorbido desde la raíz hacia la parte aérea de la planta y la cantidad de materia seca producida, en su parte radical y su parte aérea.
- En base a los mecanismos de adaptación predominantes al aluminio soluble, así como de la producción de materia seca de los cultivares de *Lolium perenne* L., Aries HD, Kingston, Nui, Pastoral, Quartet y Yatsyn 1, establecer la resistencia o sensibilidad relativa al Al fitotóxico.

## 2 REVISION BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Concepto general de acidez del suelo.

La acidez de los suelos está asociada con la presencia de hidrógeno y aluminio en forma intercambiable. El concepto de acidez involucra conceptos diferentes en cuanto a su medición y actividad iónica presente en los suelos (BLACK, 1975; Bohn *et al.*, 1993, citado por RADIC, 2001). Los estudios sobre la acidez han mostrado tres tipos de acidez presente en el suelo: la acidez real o activa, la acidez intercambiable y la acidez residual (BRADY y WEIL, 1999).

**2.1.1 Acidez real o activa.** La acidez real del suelo está determinada por la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) en la solución del suelo y más exactamente por la actividad de estos (DOMINGUEZ, 1997). BRADY y WEIL (2000), definen la actividad del  $H^+$  y  $Al^{3+}$  en la solución del suelo, como la concentración efectiva de  $H^+$  en el suelo, así como en líquidos fisiológicos. En general, la concentración de  $H^+$  en estos medios es muy baja y por esta razón se expresa en términos logarítmicos. El pH se define como el logaritmo del recíproco de la concentración del ión hidrógeno en solución. Puede expresarse matemáticamente como:

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]} \quad (2.1)$$

donde  $[H^+]$  es la concentración del ión en moles por litro de solución. La escala de pH es una escala logarítmica que va de 0 a 14. En la escala 7 es neutro y en este punto la concentración de  $H^+$  es igual a la concentración de  $OH^-$ . Debajo de 7 es ácido y el  $H^+$  es mayor que el  $OH^-$  y sobre 7 es el caso contrario (MENGEL y KIRKBY, 1982; DOMINGUEZ, 1997).

En el suelo, los valores de pH varían entre 4 y 10 aproximadamente, teniendo este valor influencia en el desarrollo de los cultivos. Esta influencia es más bien indirecta a través de una gran cantidad de factores, en los que influye el pH del suelo, solubilidad de nutrientes, productos tóxicos, desarrollo de microorganismos, humidificación y mineralización de la materia orgánica, variación de la capacidad de adsorción de los coloides y otros (DOMINGUEZ, 1997).

La acidez activa es muy pequeña comparada con las formas de acidez intercambiable y acidez residual. Por ejemplo, solo son necesarios alrededor de 2 kg de carbonato de calcio en promedio para neutralizar la acidez activa (15 cm de profundidad) en una hectárea de suelo mineral a pH 4 y con 20% de humedad (BRADY y WEIL, 1999). No obstante, la acidez activa es extremadamente importante, ya que la solución del suelo es el medio ambiente de las raíces de las plantas y los microbios (BRADY y WEIL, 1999).

**2.1.2 Acidez intercambiable.** Este tipo de acidez está asociada con la presencia de iones aluminio e hidrógeno intercambiables, usualmente en grandes cantidades en muchos suelos ácidos. Estos iones pueden ser liberados a la solución del suelo por intercambio catiónico, por ello se utiliza en su determinación la sal no tamponada KCl en concentración 1M (BRADY y WEIL, 1999).

El equivalente químico de la acidez intercambiable en suelos fuertemente ácidos es comúnmente mil veces mayor que la acidez activa en la solución del suelo. Incluso en suelos moderadamente ácidos, la encaladura necesaria para neutralizar este tipo de acidez es comúnmente 100 veces mayor a la necesaria para neutralizar la solución del suelo (la acidez activa) (BRADY y WEIL, 1999).

La acidez intercambiable varía con el tipo de arcilla debido a la adsorción no específica de cationes. De esta forma, a un pH dado, la acidez intercambiable es mayor en esmectitas, intermedio en vermiculita y bajo en caolinita (BRADY y WEIL, 1999), pero en esta secuencia no fueron consideradas arcillas de carga variable significativa como son el alofán y las haloisistas.

**2.1.3 Acidez residual.** La acidez residual corresponde a la acidez activa más la acidez intercambiable más la acidez producida por todas aquellas otras fuentes del suelo que no son intercambiables. Está generalmente asociada con los iones de hidróxido de aluminio y con los iones de hidrógeno y de aluminio que están enlazados en formas no intercambiables por la materia orgánica y en las arcillas silicatadas (BRADY y WEIL, 2000).

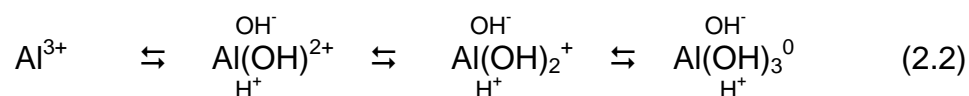
La acidez residual es mucho mayor que acidez activa y acidez intercambiable. Esta puede ser 1000 veces mayor que la acidez activa en un suelo arenoso y 50.000 o incluso 100.000 veces mayor en un suelo arcilloso y/o alto en materia orgánica (BRADY y WEIL, 1999).

**2.2 Aluminio.** Más del 15% de la corteza terrestre se compone de  $Al_2O_3$ , lo cual implica un contenido de Al de aproximadamente mayor a un 7% (BOHN *et al.*, 1993). El aluminio es así un constituyente importante de la materia mineral del suelo. Sin embargo, puede estar presente en distintas fracciones, donde destacan: la fracción en solución, la fracción intercambiable, la fracción no intercambiable y la fracción en los minerales primarios y secundarios del suelo.

**2.2.1 Especies de aluminio en la solución del suelo.** El Al presenta una coordinación seis. Ello significa que tiene la capacidad de enlazar seis moléculas distintas. De esta forma usualmente se presenta rodeado de  $OH^-$  formando una estructura octaédrica, que en la medida que el pH se hace más

ácido, se va llenando de  $H^+$  en la periferia. Así, el aluminio liberado desde los minerales del suelo a la solución del suelo bajo condiciones de acidez, o el aluminio en soluciones nutritivas a pH 4 y bajo éste, principalmente aparece como  $Al(H_2O)_6^{3+}$  (o también denominado  $Al^{3+}$ ). Cuando el pH aumenta se forman productos como  $Al(OH)^{2+}$  y  $Al(OH)_2^+$  (MARSCHNER, 1995). Cerca del pH neutro se presenta como  $Al(OH)_3^0$  o gibsita (precipitado) mientras que en condiciones de alcalinidad domina  $Al(OH)_4^-$  (DELHAIZE y RYAN, 1995).

Las reacciones que dan como resultado las distintas especies de aluminio son

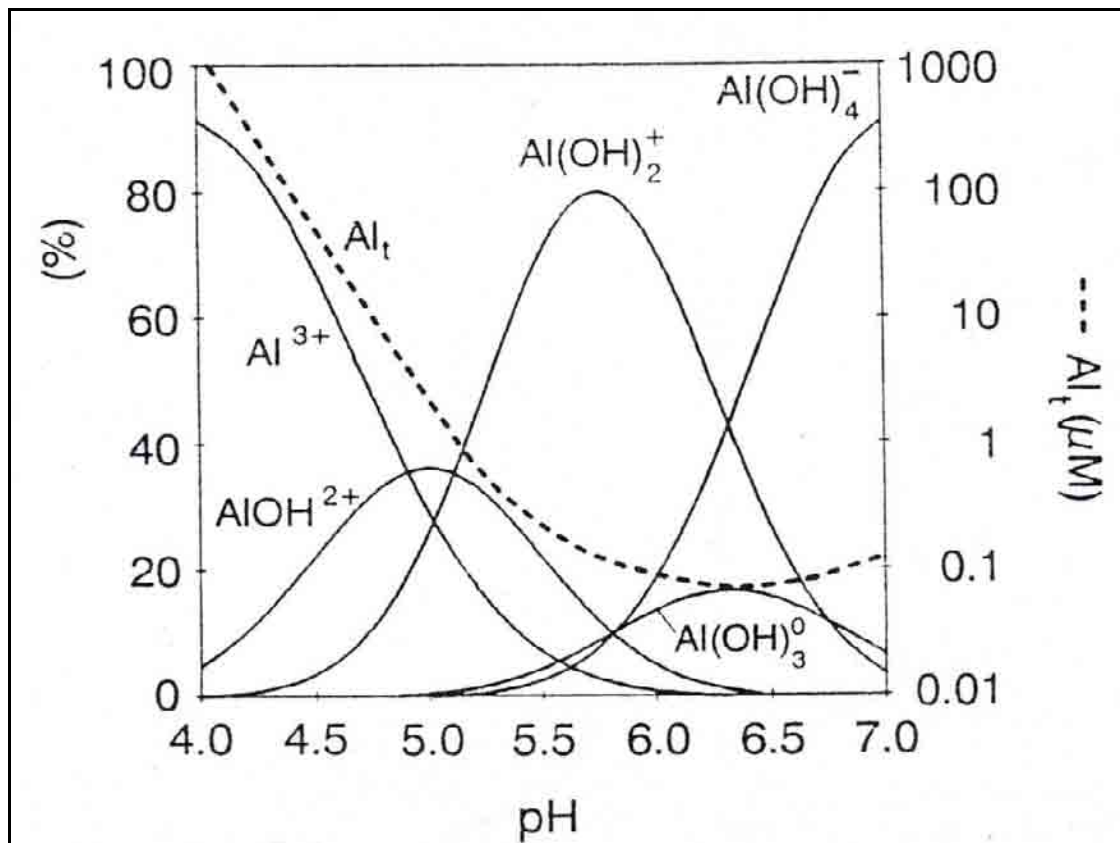


estas son reversibles adicionando  $OH^-$  o  $H^+$  (BRADY y WEIL, 2000).

Existen resultados contradictorios acerca de la toxicidad relativa de varias especies de aluminio mononuclear, salvo el ión aluminio no fitotóxico  $Al(OH)_4^-$  (Kinraide 1990, citado por MARSCHNER, 1995). La especie monomérica fitotóxica por excelencia es el  $Al^{3+}$ , la cual está presente en forma significativa en los suelos a partir del pH 5.0 (Figura 1). Además, un nivel fitotóxico alto se atribuye al aluminio polinuclear  $AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(H_2O)_{12}^{7+}$  o (Al13) que puede formarse a pH 4.5 y puede llevar a la inhibición total de alargamiento de raíz, pero su formación natural y contribución en los suelos ácidos es desconocida (DELHAIZE y RYAN, 1995; Parker *et al.*, 1988, 1989 citados por MARSCHNER, 1995).

Los resultados contradictorios en relación a la relativa fitotoxicidad de las diferentes especies de aluminio, se explica por varias razones, la principal es que no es posible variar la distribución relativa de las especies de aluminio sin variar el pH, y viceversa. Normalmente, se interpretan resultados

exclusivamente en términos de especies de aluminio mientras que la posible influencia de variaciones de  $H^+$  no es considerada (MARSCHNER, 1995).



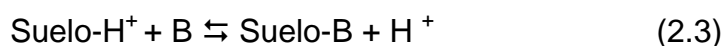
**FIGURA 1. Actividad relativa de especies de aluminio mononuclear y concentración total ( $Al_t$ ) de aluminio soluble como una función del pH.**

FUENTE: Kinraide (1991), citado por MARCHNER (1995).

**2.2.2 Aluminio intercambiable.** Si un suelo ácido se trata con una solución salina neutra no tamponada, como el cloruro de sodio o de potasio, se obtendrá un extracto ácido que, además de las bases intercambiables habituales (Ca, Mg, K y Na), contiene aluminio.

En suelos ácidos bajo pH 5,5 hay un aumento de sitios de cambio de cationes de las arcillas que son ocupados por aluminio que especialmente reemplaza otros cationes bivalentes ( $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ) y simultáneamente adsorbe fuertemente fosfato y molibdato. El porcentaje de aluminio intercambiable en el suelo esta correlacionado con el pH y la inhibición del crecimiento de las raíces de muchas especies de plantas. Sin embargo esta correlación no es a menudo tan estrecha respecto a las concentraciones, pero si a las especies de aluminio en solución del suelo que determinan la fitotoxicidad del aluminio hacia las raíces (MARSCHNER, 1995).

La relación de disociación:



es la expresión de una reacción de intercambio de cationes con la fase sólida adsorbente del suelo. En esta reacción se observa que la acidez cambiante sería la cantidad total de posiciones de cambio ocupados por los iones  $H^+$  y  $Al^{3+}$  que está en equilibrio con una determinada concentración de estos en la solución, es decir, un determinado pH. El  $H^+$  y el  $Al^{3+}$  son, en general, retenidos fuertemente por el complejo arcilloso-húmico, por lo que para la neutralización de la acidez del suelo se requieren bases en exceso a la cantidad total de iones ácidos adsorbidos (DOMINGUEZ, 1997).

**2.2.3 Aluminio no intercambiable.** El aluminio no intercambiable corresponde a hidróxidos de aluminio polimerizados que llevan cargas positivas, pero que no son intercambiables y óxidos hidratados de aluminio. El aluminio no intercambiable no tiene un efecto directo sobre el crecimiento de las plantas (Rowel 1992, citado por PONCE, 1999).

**2.2.4 Aluminio en minerales primarios y secundarios.** El origen primario de los suelos se debe a la evolución del material parental. La roca madre de los suelos esta compuesta de minerales, siendo la mayoría de ellos alúmino-silicato de metales. Estos minerales primarios que principalmente constituyen las rocas son cuarzo, ortoclasa, muscovita, biotita, hornablenda, augita, olivino, magnetita y apatita (HONORATO, 1993).

La arena, limo y arcillas o minerales secundarios (arcillas silicatadas, alofán e imogolita y óxidos de Fe y Al) se componen principalmente de Al, Si y O<sub>2</sub>, además de constituyentes básicos dependiendo de los minerales existentes (HONORATO, 1993).

### **2.3 Aluminio fitotóxico.**

La toxicidad por aluminio es probablemente el factor más importante que limita el crecimiento de las plantas en suelos ácidos (TISDALE *et al.*, 1993). Esto ha sido probado en soluciones nutritivas en las que la simple adición de cantidades mínimas de este elemento produce una reducción del desarrollo (DOMINGUEZ, 1997). Las concentraciones de aluminio en soluciones de suelo, con valores de pH inferiores a 5, por lo general se encuentran dentro de los límites en que la toxicidad por aluminio se da en las soluciones nutritivas (BLACK, 1975).

**2.3.1 Efectos generales del aluminio en las plantas.** La toxicidad por aluminio restringe en primer lugar el crecimiento de las raíces, pero con mayores exposiciones aparecen diferentes síntomas en raíces y parte aérea, los que generalmente se confunden con deficiencias de nutrientes en los suelos (DE LA FUENTE y HERRERA, 1999). Los síntomas de lesiones por aluminio no son siempre fáciles de determinar, ya que a nivel foliar se parece a deficiencias de P impidiendo el crecimiento general, observándose plantas pequeñas, color verde oscuro en las hojas, madurez tardía, tallos, hojas y venas de las hojas



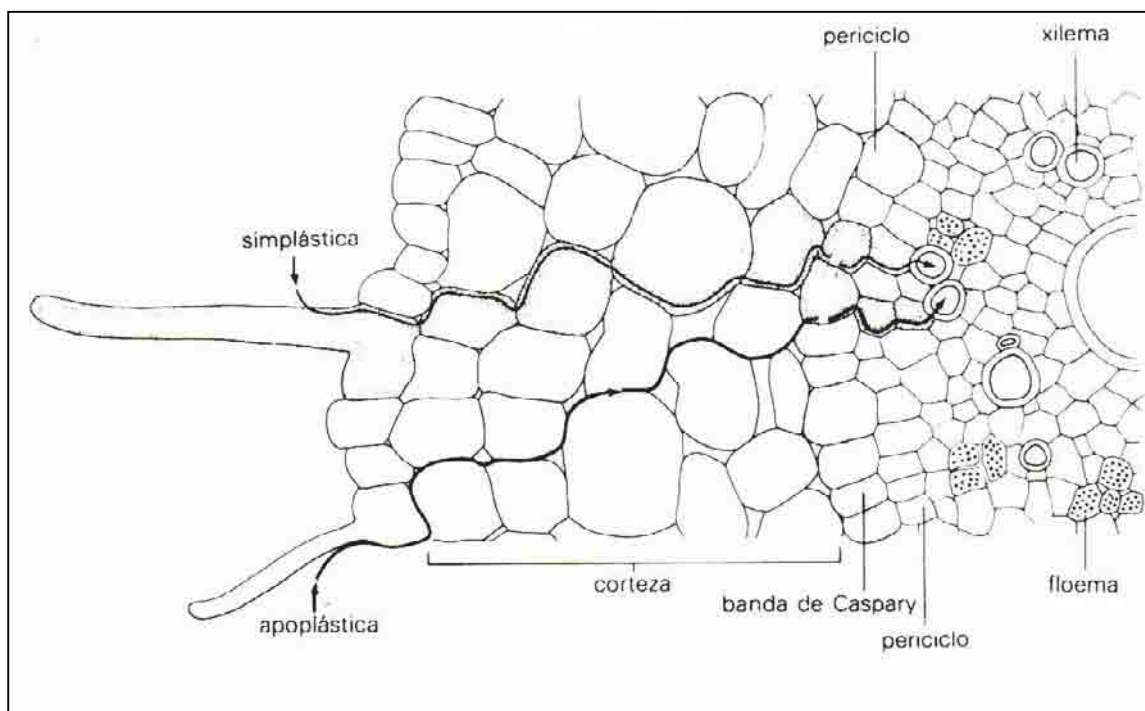
de color púrpura, amarillamiento y muerte de puntas de hojas (FOY *et al.*, 1978).

2.3.1.1 Mecanismos de entrada, captación y ubicación de aluminio en las plantas. Estudios realizados con maíz indican que el sulfato de aluminio es tomado por las raíces primarias, lo que indica que el sitio inicial de captación es la cofia y las secreciones mucilaginosas que cubren las células epidermales de la raíz (ROY *et al.*, 1988). Tratamientos largos con aluminio dan como resultado la acumulación de apreciables cantidades del metal en el exterior de las células corticales, acompañado de una desorganización morfológica en el ápice de la raíz y finalmente la desintegración del exterior de las células, sin embargo, esta severa desorganización celular no afecta el interior de la región cortical, que indica que la protección es soportada por la cofia de la raíz (ROY *et al.*, 1988).

El aluminio es absorbido por un proceso no metabólico en un modo de intercambio en todos los sitios de ligamiento del calcio en la superficie de la célula. Después de tener saturada una larga porción de los sitios de absorción por un período determinado (30 horas) el aluminio no puede ser absorbido hasta que nuevos sitios de absorción sean producidos por el crecimiento de más raíces (Wagatsuma 1983b, citado por ROY *et al.*, 1988).

El camino de transporte de los iones a través de las células corticales puede ser simplástica o apoplástica (Aimi y Murakami, 1964; Huett y Menary, 1980; Ikeda *et al.*, 1965; Matsumoto *et al.*, 1976; Mclean y Gilbert, 1927; Naidoo *et al.*, 1978 citados por ROY *et al.*, 1988). La ruta simplástica implica transporte a través del citosol de las células que se hayan camino a xilema no vivo. En la ruta apoplástica el movimiento se da a través de la red de paredes celulares hasta la banda de Caspary, a partir de donde se toma la vía del simplasto (SALISBURY y ROSS, 1994).

El aluminio es un catión polivalente que puede seguir la vía apoplástica, pero informes de su acumulación en el núcleo indican que algunos iones también usan la vía simplástica (Aimi y Murakami, 1964; Huett y Menary, 1980; Ikeda *et al.*, 1965; Matsumoto *et al.*, 1976; Mclean y Gilbert, 1927; Naidoo *et al.*, 1978, citados por ROY *et al.*, 1988).



**FIGURA 2. Rutas simplástica y apoplástica para la absorción de iones en la región de los pelos radicales.**

FUENTE: SALISBURY y ROSS (1994).

2.3.1.2 Toxicidad en las plantas. Cuando las plantas crecen y se desarrollan en suelos ácidos en condiciones naturales, la continua exposición al aluminio produce daños que son acumulativos, generando síntomas complejos, sin embargo, cuando las plantas son estudiadas en condiciones de laboratorio algunos síntomas de toxicidad por aluminio pueden ser detectados en un corto

tiempo de exposición a éste. La reducción del crecimiento de la raíz es el síntoma visible más rápido (DE LA FUENTE y HERRERA, 1999).

El aluminio afecta negativamente el crecimiento radical, especialmente de las raíces secundarias, altamente absorbentes influyendo fuertemente en la disponibilidad de agua y en la nutrición mineral de la planta cultivada en estas condiciones (GALLARDO *et al.*, 1994). Las puntas de la raíz y las raíces laterales, se vuelven color castaño y se observan gruesas y quebradizas sin una buena ramificación (FOY *et al.*, 1978). Tal engrosamiento es el resultado de la inhibición de la elongación en el eje principal y las raíces laterales (MARSCHNER, 1995). Los cambios morfológicos inducidos por el aluminio en las raíces incluyen disminución en la turgencia de las células de la epidermis de la punta de la raíz, ocurrencia de pequeñas depresiones, destrucción de la epidermis y el exterior de las células de la corteza, roturas profundas en el interior de las células de la corteza (Wagatsuma *et al.*, 1987b, citados por ROY *et al.*, 1988).

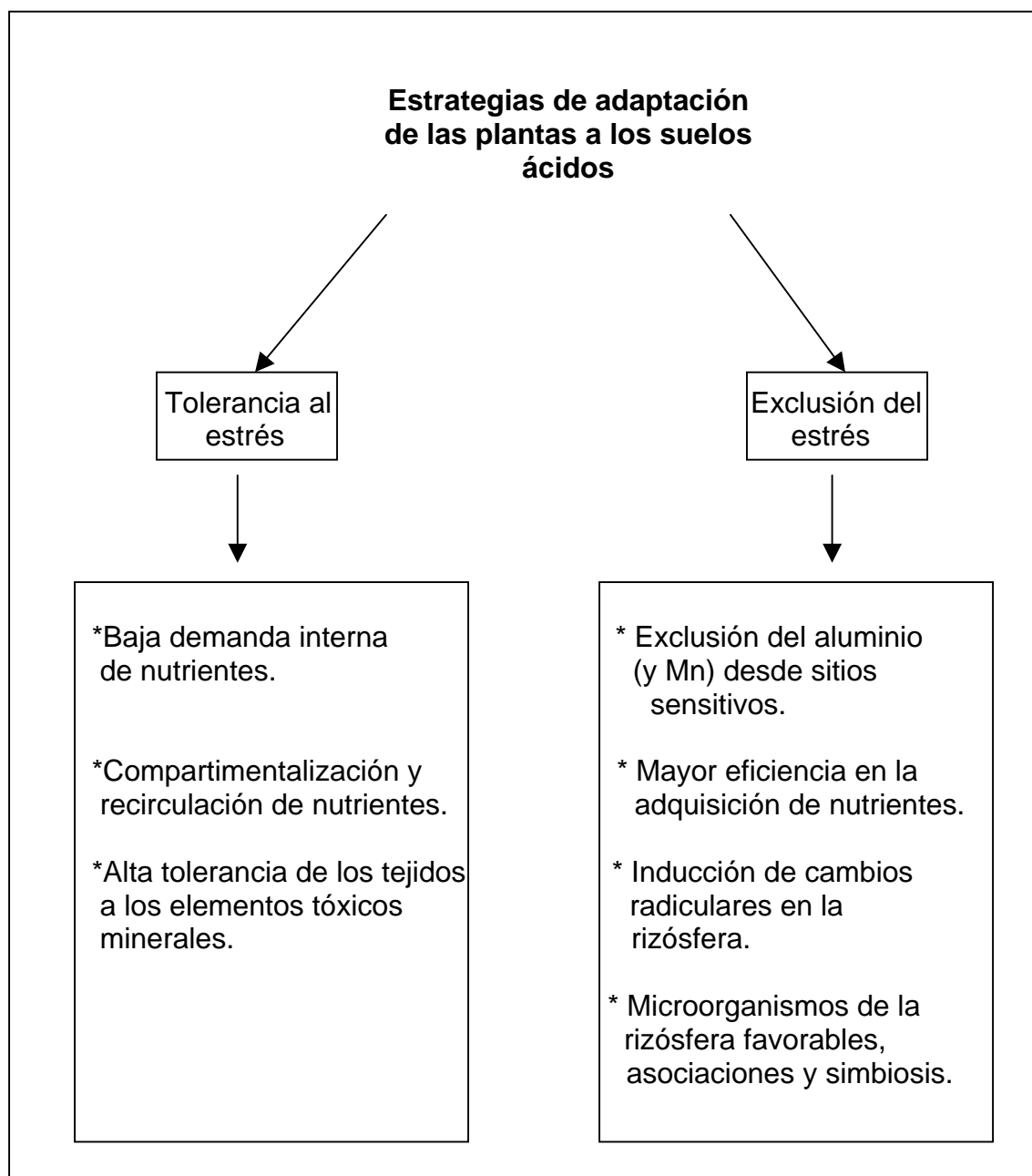
En general, se ha demostrado que desde el punto de vista fisiológico, el aluminio produce interferencia en la división celular de la raíz, fijación de fósforo en formas menos disponibles en el suelo y en las raíces de la planta, disminución de la respiración y fotosíntesis de las raíces, interfiere con ciertas enzimas gobernando la depositación de polisacáridos en la pared celular, incrementando su rigidez, e interfiriendo con la captación, transporte y uso de varios elementos (Ca, Mg, P, K) y agua (FOY *et al.*, 1978). Todos los efectos producidos por el aluminio en las plantas, anteriormente mencionados han sido descritos en la revisión bibliográfica del trabajo de tesis de RADIC (2001).

**2.4 Mecanismos de adaptación al estrés del aluminio.** En general es una regla que la tolerancia al aluminio es el factor más importante para la adaptación de las especies y cultivares a los suelos ácidos. Pueden existir

grandes diferencias dentro de una misma especie por variabilidad genética, producida involuntariamente por haber sido desarrolladas en diferentes regiones, con distintos niveles de pH del suelo (MARSCHNER, 1995; FOY *et al.*, 1978).

**2.4.1 Tolerancia al aluminio en diferentes plantas.** Los diferentes mecanismos fisiológicos sobre la toxicidad o tolerancia al aluminio aún son debatidos, estos pueden ser muy distintos en diferentes especies y variedades y ser controlados por genes diferentes a través de diferentes vías bioquímicas. Las plantas tolerantes deben prevenir la absorción en exceso de aluminio o detoxificarse después de que el aluminio ha sido absorbido (FOY *et al.*, 1978). Desde un punto de vista agronómico en el cultivo la suma de estos mecanismos individuales determinan los requerimientos para mejorar los suelos ácidos (fertilizantes y particularmente enmiendas calcáreas) (MARSCHNER, 1995).

El concepto de adaptación a la tolerancia al aluminio puede ser por tolerancia al estrés, exclusión del estrés o ambos medios. Debido a los variados factores de estrés a los que las plantas son expuestas al crecer en suelos ácidos, ambas estrategias son requeridas simultáneamente, aunque en diferente grado. Los componentes más importantes de las adaptaciones a la tolerancia al estrés y exclusión del estrés se observan en la Figura 3.



**FIGURA 3. Mecanismos de tolerancia versus mecanismos de exclusión del aluminio.**

FUENTE: MARSCHNER (1995)

Existen diversas estrategias de adaptación de las especies vegetales a los suelos minerales ácidos: la exclusión de los sitios sensitivos de las plantas, la alteración del pH de la rizósfera, la producción de exudados radicales, la

presencia de asociaciones micorrizicas, existiendo además de estas estrategias relaciones con la nutrición del calcio de las plantas, nutrición del fósforo de las plantas y nutrición del nitrógeno de las plantas (MARSCHNER,1995; ROY *et al.*, 1988). Así, dentro de ciertos límites, las plantas pueden alterar sus ambientes para su propio beneficio o detrimento (FOY *et al.*, 1978).

2.4.1.1 Exclusión de los sitios sensitivos de la planta. En términos de toxicidad por aluminio, los sitios sensibles son: citoplasma, la interfase membrana plasmática-apoplasto y la cofia (MARSCHNER, 1995).

Según FOY *et al.* (1978), con respecto a las concentraciones de aluminio, las plantas tolerantes al aluminio pueden ser divididas en por lo menos tres grupos. En el primer grupo, las concentraciones de aluminio en la parte aérea no son consistentemente diferentes de las plantas sensibles al aluminio, pero las raíces de plantas tolerantes contienen a menudo menos aluminio que aquéllas de plantas sensibles a igual suministro de Al. En tales casos, al parecer se relaciona la tolerancia al aluminio a un mecanismo de exclusión. En un segundo grupo de plantas, la tolerancia al aluminio está asociada con niveles más bajos de aluminio en la parte aérea y entrapar el exceso de aluminio en las raíces. En un tercer grupo de plantas, la tolerancia está directamente asociada con la acumulación de aluminio en la parte aérea.

2.4.1.2 Cambios de pH en la zona de las raíces. La diferencia en la tolerancia al aluminio en las plantas puede asociarse con la habilidad de la planta para alterar el pH de su zona radical (rizósfera). Un bajo pH aumenta la solubilidad y la toxicidad potencial del Al, por lo que este cambio de pH sería así un mecanismo provisional adecuado para explicar el diferencial de tolerancia al aluminio en algunas especies y variedades de plantas (MORTVEDT *et al.*, 1972). Algunos cultivares de trigo, cebada, arroz y maíz tolerantes al aluminio aumentan el pH de sus soluciones nutritivas y así disminuyen la solubilidad y

toxicidad de aluminio. En contraste, cultivares sensibles de las mismas especies disminuyen o no tiene efecto sobre el pH de sus soluciones nutritivas y así se exponen a concentraciones más altas de aluminio por periodos más largos (FOY *et al.*, 1978).

Subramoney y Saukaranarayanan (1964) citados por MORTVEDT *et al.*, (1972) encontraron que en la germinación, las semillas de arroz tolerante a suelos ácidos (probablemente tolerantes al aluminio) aumentaron el pH del suelo de 3.2 a 5.5, por el contrario, las variedades no tolerantes a suelos ácidos no produjeron tales aumentos de pH.

2.4.1.3 Exudados radicales y producción de ácidos orgánicos. Los exudados radicales tales como los mucilagos y los ácidos orgánicos juegan un rol principal en la estrategia de exclusión de aluminio. Una variedad de trigo tolerante al aluminio, con mayor exudación radical, debido a impedimentos mecánicos incrementó la tolerancia al aluminio más de 10 veces. Los mucilagos son principalmente secretados en la cofia y en las zonas apicales de la raíz y exhiben una gran capacidad para unir y complejar el aluminio (MARCHNER, 1995).

La liberación de ácidos orgánicos en grandes cantidades es una característica de las plantas adaptadas a los suelos altamente acidificados. La complejación del aluminio por ácidos orgánicos, como el ácido cítrico, no solo provee protección contra los efectos perjudiciales del aluminio libre sobre el crecimiento radical, además es importante para la adquisición del fósforo. (MARSCHNER, 1995).

Los ácidos orgánicos se pueden dividir en tres grupos según su capacidad de detoxificar el aluminio. Los ácidos orgánicos más efectivos en aliviar los efectos tóxicos del aluminio son ácido cítrico, oxálico y tartárico en el

mismo orden decreciente y son considerados como ácidos fuertes; dentro de los ácidos moderados se encuentra el ácido málico, malónico y salicílico y por último los ácidos considerados débiles son succínico, láctico, fórmico y acético. Esta capacidad está directamente relacionada con la posición relativa de los grupos OH/COOH sobre las cadenas de los carbonos principales, favoreciendo la formación de estructuras estables de cinco o seis uniones formadoras de anillos (HUE *et al.*, 1986).

2.4.1.4 Micorrizas. La colonización radical con micorrizas es un componente importante en la adaptación a suelos minerales ácidos con baja disponibilidad de fósforo y altas concentraciones de aluminio soluble. El rol de las micorrizas vesículo-arbusculares (MVA) es particularmente evidente para especies con sistemas radiculares toscos. Esto es importante en especies de plantas o genotipos donde las deficiencias de fósforo inducen respuestas de las raíces, semejantes al daño producido por toxicidad de aluminio en el alargamiento del sistema radical (tolerancia al aluminio baja a moderada) o donde una intensificación de liberación de ácidos orgánicos a las raíces no puede ocurrir (MARSCHNER, 1995).

2.4.1.5 Nutrición de calcio de las plantas. La tolerancia al aluminio en ciertos cultivares de trigo, cebada y soya ha sido asociado con la habilidad de resistir deficiencias o reducción del transporte de calcio (FOY *et al.*, 1987; MORDVEDT, 1972; ROY *et al.*, 1988). El aumentar las concentraciones de calcio, tiene un claro efecto benéfico en el crecimiento de la raíz bajo estrés de aluminio, ya que se pueden proteger las raíces de los efectos detrimentales del aluminio monomérico de una forma análoga al efecto proteccionista del calcio contra la lesión producida por  $H^+$  y  $Mn^{2+}$ , además, al aumentar la concentración de calcio, se suple la deficiencia inducida por la toxicidad de aluminio que permite aliviar en cierto grado la inhibición del crecimiento de la raíz (ALVA *et al.*, 1986).



2.4.1.6 Nutrición del fósforo de las plantas. En muchas plantas, la tolerancia al aluminio parece estrechamente relacionada con tolerar bajos niveles de fósforo y su uso eficiente (FOY *et al.*, 1978; ROY *et al.*, 1988). La proporción P/Al molar, es un factor importante que determina la concentración de aluminio que permanece en solución. En estudios realizados por ALVA *et al.* (1986), se observó una reducción significativa en concentraciones de aluminio total y monomérico ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3^*$ ,  $\text{Al}(\text{SO}_4^+)$ ) a proporciones molares P/Al 0.2. Blamey *et al.* (1983), citados por ALVA *et al.* (1986), indicaron que se producía una reducción de un 20% en la concentración inicial de aluminio (40  $\mu\text{M}$ ), cuando la proporción P/Al molar aumentaba de 0 a 0.2.

2.4.1.7 Nutrición del nitrógeno de las plantas. Parte del metabolismo del nitrógeno, puede estar involucrado en mecanismos de tolerancia. La mayor tolerancia de algunas especies puede relacionarse con la habilidad para usar  $\text{NO}_3\text{-N}$  en presencia de  $\text{NH}_4\text{-N}$  e incrementar el pH en el medio de crecimiento o rizósfera (Dodge y Hiatti, 1974; Foy y Fleming, 1978; Foy *et al.*, 1978; citados por ROY *et al.*, 1988). La síntesis de una proteína específica desconocida, ha sido sugerida en relación con la tolerancia al aluminio (ROY *et al.*, 1988). En suelos fuertemente ácidos, la nitrificación es inhibida y el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) pasa a ser la fuente más importante de nitrógeno para las plantas. Muchas plantas que están adaptadas a estos suelos y toleran aluminio, en algunos casos parecen preferir nitrógeno como amonio, que nitrógeno como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (FOY *et al.*, 1978).

**2.4.2 Control genético de la tolerancia al aluminio.** La posible existencia del funcionamiento de mecanismos celulares diferentes, pueden otorgar tolerancia a la toxicidad por aluminio en las plantas. La tolerancia al aluminio en algunos cultivares de trigo es multigénica, pero es condicionada por un solo gen dominante en otros cultivares (Aniol y Gustafson 1994, citados por DE LA FUENTE y HERRERA, 1999). Un mismo nivel de acidez que origina una

determinada cantidad de aluminio soluble, puede ser tóxica para una especie e inocua para otra, debido a sus distintas sensibilidades o tolerancias, además, existen diferencias dentro de una misma especie. Esto se explica por el diferente origen natural de las especies (características suelo-clima donde se han generado naturalmente) y por el mejoramiento genético que ha dado lugar a variedades, cultivares y tipos dentro de una misma especie. Las gramíneas, por ejemplo, poseen mayor tolerancia a la toxicidad por aluminio que las forrajeras leguminosas, pero también es posible reconocer comportamientos diferentes dentro de tipos de ballicas, tréboles y alfalfa (SUAREZ, 1996).

La severidad de la inhibición en el crecimiento de las raíces es un apropiado indicador de las diferencias genotípicas con respecto a la toxicidad al aluminio (MARSCHNER, 1995).

La tolerancia al aluminio parece ser resultado del uso de material genético proveniente de regiones ácidas, con el objetivo de magnificar la expresión de una característica deseada. Se ha postulado además, que no existen variedades tolerantes a bajo pH-aluminio de poblaciones seleccionadas en programas de mejoramiento en suelos sin problemas de acidez (VENEGAS, 1993).

**2.5 Efectos benéficos del aluminio.** En ocasiones, bajas concentraciones de aluminio producen efectos benéficos en muchas plantas como arroz, legumbres tropicales, eucaliptos, té, durazno, remolacha, maíz y trigo (ROY *et al.*, 1988). Konishi *et al.* (1985), citados por MARSCHNER (1995), señalan además, que plantas como el té no solo toleran altos niveles de Al, sino que presentan un fuerte crecimiento con dosis bajas de Al. Por su parte, Foy (1983), citado por MARSCHNER (1995), sugiere que especies tolerantes a efectos tóxicos del Al, presentan un mayor efecto estimulador del crecimiento con bajas dosis de Al, pero los mecanismos de tal estimulación del crecimiento son poco claras.

Los mecanismos de los efectos benéficos pueden ser diferentes para los diferentes genotipos tales como, aumento de la solubilidad y disponibilidad del Fe en suelos calcáreos, corrigiendo o previniendo deficiencias de Fe FOY *et al.*, (1978); Foy (1984), citados por ROY *et al.* (1988), bloqueando sitios cargados negativamente en las paredes celulares y por consiguiente promoviendo la captación de fósforo FOY *et al.* (1978); Mullette (1975), citados por ROY *et al.* (1988), corrigiendo o previniendo la toxicidad por fósforo FOY *et al.* (1978); Clark (1977), citados por ROY *et al.* (1988), previniendo la toxicidad por cobre y manganeso Liebig *et al.* (1942); Rees y Sidrak (1961), citados por ROY *et al.* (1988), sirviendo como fungicida Ko y Hora (1972); Lewis (1973); citados por ROY *et al.* (1988), reduciendo crecimientos aéreos indeseables en semilleros ricos en nitrógeno Borkenhagen y Iyer (1972), citados por ROY *et al.* (1988) y alterando la distribución de reguladores de crecimiento en raíces (FOY *et al.*, 1978).

**2.6 Relación entre el aluminio y la producción animal.** Las deficiencias nutricionales del suelo pueden ser traspasadas a los animales a través del consumo de forraje. El exceso de aluminio en el suelo produce deficiencia por falta de magnesio, que puede provocar hipomagnesemia. En el rumen de animales muertos por hipomagnesemia se han encontrado valores de 2373 ppm de aluminio, mientras que en promedio para animales sanos alcanza a 405 ppm, lo que sugiere la existencia de una relación entre ambas anomalías (Fontenot 1979; citado por ALFARO, 1997). Aun cuando el aluminio no provoca alteraciones metabólicas en animales por si mismo, disminuye ostensiblemente la disponibilidad de otros elementos necesarios para el normal funcionamiento del animal (ALFARO, 1997).

En un ensayo realizado por ALFARO (1997), se observó que animales alimentados con forraje proveniente de sectores con problemas de acidificación,

tienen concentraciones sanguíneas de aluminio un 22,44% mayor que animales testigo.

**2.7 Ballica perenne (*Lolium perenne* L.).** Ballica perenne es una especie nativa de las regiones templadas y con buena precipitación de Europa, Asia y norte de Africa, por lo que se adapta mejor en Chile en zonas de climas templados o fríos con buena distribución de lluvias (LOPEZ, 1996).

Se adapta a las condiciones existentes en el valle central de riego de la zona centro-sur y principalmente a las condiciones de alta humedad y precipitaciones que predominan de Malleco al sur. En la IX Región representa la principal especie en aproximadamente el 35% de las praderas sembradas y en la X Región esta cifra se eleva a cerca del 80% (AGRICOLA NACIONAL S.A. COMERCIAL E INDUSTRIAL, ANASAC, 1997).

**2.7.1 Descripción de la especie.** Ballica perenne es una gramínea perenne de hojas glabras color verde oscuro y con macollos achatados típicos. La cara inferior es brillante, las aurículas son pequeñas y a menudo ausentes, la lígula es corta y no visible, la inflorescencia es una espiga, con un número variable de espiguillas (Langer 1981, citado por LOPEZ, 1996).

Su sistema radical es muy denso pero superficial, desarrollándose principalmente en los primeros 20 cm del suelo. Es de alta palatabilidad y gran valor nutritivo, con buen potencial de producción de forraje, gran capacidad de macollaje y rapidez de rebrote (ANASAC, 1997). Una vez establecida en condiciones favorables, persiste en el campo por lo menos 5 años (Aguila, 1979, citado por LOPEZ, 1996). Por su parte, DEMANET (1994), señala que su persistencia en condiciones de clima templado y escaso estrés hídrico, es solo superior a 3 años.

Las plantas se adaptan a diferentes tipos de suelo, pero crecen mejor en suelos de textura media y prosperan bien en suelos arcillosos, pesados y algo húmedos. El drenaje superficial debe ser bueno, ya que no se adaptan adecuadamente a terrenos anegados (Spedding y Diekmahn 1972, citados por LOPEZ, 1996). Su comportamiento más deficiente es en suelos de textura arenosa, debido al excesivo drenaje y la consecuente falta de humedad (Aguila 1979, citado por LOPEZ, 1996).

No se adapta a condiciones térmicas extremas, especialmente temperaturas altas (>25° C) con las cuales entra rápidamente en latencia (ANASAC, 1997). Para expresar su máximo potencial requiere de abundante disponibilidad de N en el suelo (LOPEZ, 1996).

Dependiendo de la época en que inician la floración y aparición de la espiga, son clasificadas como precoz, intermedia y tardía, esta es una característica de gran importancia, especialmente donde además de pastoreo se elabora ensilaje (DEMANET, 1994).

Las variedades provenientes de Nueva Zelanda, poseen incorporado en la semilla un hongo endófito (*Neotyphodium lolii* (Latch, Christensen y Samuels) Glenn, Bacond y Hanlin) para controlar el insecto denominado barrenador del tallo o gorgojo argentino del tallo (*Listronotus bonariensis* (Kuschel), que es un insecto plaga que ataca a las gramíneas, fundamentalmente ballicas (DEMANET, 1994; TORRES, 1996). Este insecto es nativo de la región sur de Sudamérica y fue introducido a Nueva Zelanda antes de 1920 y a partir de 1950 comenzó a producir fuertes daños a las praderas de ese país. En la zona sur de Chile, a pesar de la existencia del insecto en poblaciones similares a las encontradas en Nueva Zelanda, hasta fines de 1994, no se habían reportado casos con daños de importancia económica en forma frecuente, debido a que, por el hecho de ser nativo, era mantenido por sus enemigos naturales en

poblaciones bajo el umbral de daño económico. Sin embargo, en 1995, se detectaron casos con pérdidas de hasta un 90%, que los registrados en los últimos 5 o 6 años, situación que se repitió en 1996, similar a lo ocurrido en Nueva Zelanda a partir de 1950 (TORRES, 1996). Los adultos y las larvas de *L. bonariensis*, son los estados que producen los principales daños a las plantas. El daño de los adultos es producido por el consumo de tejido vegetal principalmente en los ápices de las láminas foliares donde el insecto consume la epicutícula y el mesófilo. Este tipo de daño no es de importancia en plantas desarrolladas, pero adquiere importancia en plántulas, donde los daños pueden producir pérdida de plantas y por ende un deficiente establecimiento de las gramíneas (CISTERNAS, 1996).

Las toxinas producidas por el hongo endófito (*Acremonium lolii*), pueden causar trastornos nerviosos en el ganado, cuando este tipo de ballicas son establecidas solas y son mal utilizadas durante el período de espigadura (DEMANET, 1994).

**2.7.2 Cultivares a estudiar.** A continuación se describen los seis cultivares que componen el estudio clasificados en tres grupos, según su origen y ploidía.

2.7.2.1 Cultivares diploides con origen en Nueva Zelanda. En esta clasificación se encuentran los cultivares Aries HD, Kingston, Nui y Yatsyn 1.

2.7.2.1.1 Aries HD. Variedad diploide que fue seleccionada a través de un complejo proceso de comparación de cientos de plantas individuales con testigos de variedades comerciales, midiendo sus características nutritivas y agronómicas. Las mejores plantas fueron nuevamente seleccionadas varias veces por digestibilidad y otras características de adaptación, persistencia y productividad (ANASAC, 1997).

Fue creada por Wrightson, Nueva Zelanda, especialmente para sistemas que utilizan pastoreos intensivos y frecuentes, donde muestra una mayor digestibilidad, especialmente en primavera, debido a su menor rebrote de tallos florales (ANASAC, 2001a).

Se adapta a variadas condiciones de clima y suelos, mostrando su mayor potencial en los suelos de fertilidad media a alta y condiciones de clima templado. Se recomienda para sistemas intensivos de leche y carne en la zona centro sur y sur de Chile (ANASAC, 1997).

Se ha observado una alta persistencia de las plantas progenitoras y una baja tendencia a la espigadura en el año de establecimiento, lo que indica que la persistencia de las praderas de Aries HD debe ser alta (ANASAC, 1997).

Las plantas son de hábito de crecimiento semipostrado, con hojas finas y gran capacidad de macollamiento. La precocidad es similar a Nui (ANASAC, 1997).

Tiene alto contenido de endófito y por lo tanto presenta muy alta resistencia al ataque de insectos, especialmente el gorgojo barrenador del tallo (*Listronotus bonariensis*). Esta característica sin embargo, no limita el consumo de forraje tanto como en otras variedades con alto endófito, debido supuestamente a que la secreción de lolitrem B y ergovalina es menor en los hongos que viven dentro de las plantas de esta variedad (ANASAC, 2001a).

2.7.2.1.2 Kingston. Variedad Neozelandesa precoz, diploide con hongo endófito que se caracteriza por su gran capacidad de macollaje y rápida recuperación a pastoreo intensivo. Es tolerante a suelos ácidos y con alto contenido de aluminio (T/A). Presenta buen crecimiento en otoño e invierno y mayor tolerancia a sequía y a suelos con bajo contenido de nutrientes

(SEMILLAS GENERACIÓN-2000, 2001; SEMILLAS GENERACIÓN-2000, 1999).

2.7.2.1.3 Nui. Variedad diploide creada a partir de un ecotipo de la zona de Auckland en Nueva Zelanda y certificada por primera vez en 1975. Las plantas que dieron origen a la variedad fueron colectadas de una pradera de 40 años de antigüedad, a fines de la década de 1950 (ANASAC, 1997).

Nui es un cultivar de floración precoz, presenta un hábito de crecimiento semiprostrado, adaptándose en mejor forma a la asociación con tréboles blancos de hábito rastrero y hoja pequeña (DEMANET, 1994)

Se adapta mejor a suelos de media a alta fertilidad y de preferencia de texturas más pesadas con mayor retención de humedad. En relación a otros cultivares, tiene mejor tolerancia a las bajas temperaturas y registra comparativamente mayores producciones en otoño, invierno y principios de primavera. Responde vigorosamente a la humedad luego de periodos secos en otoño (ANASAC, 1997)

Aunque resiste bien las altas presiones de pastoreo durante el verano, en años con alto déficit hídrico se ve afectada su persistencia (DEMANET, 1994; ANASAC, 1997).

La tendencia a la espigadura el año de establecimiento es alta y es de floración precoz. Presenta buena asociación con trébol blanco de hábito rastrero, presenta una baja tolerancia a royas y un nivel de endófito variable (ANASAC, 1997).

2.7.2.1.4 Yatsyn 1. Cultivar sintético diploide, creado en Nueva Zelanda por la empresa NZ AGRISEEDS, cuyas líneas parentales fueron seleccionadas a



partir de ecotipos de *Lolium perenne* L., los cuales presentaban una mayor palatabilidad y producción anual de materia seca que la variedad Ellet. Es considerada una variedad de floración temprana dado que inicia dicho período al menos siete días antes que Nui. Presenta un hábito de crecimiento a la espigadura semierecto, con una altura natural baja. El temprano inicio de la espigadura, le confiere la precocidad y baja longitud de tallos, hoja bandera e inflorescencia. La tendencia a la espigadura durante el año de establecimiento es mediana. Presenta una alta tolerancia a *Puccinia coronata* y *Puccinia recondita*. La semilla posee alto y bajo nivel de endófito (DEMANET, 1994).

2.7.2.2 Cultivares tetraploides con origen en Nueva Zelanda. En esta clasificación se encuentra el cultivar Quartet.

2.7.2.2.1 Quartet. Primer cultivar de ballica perenne tetraploide creado por Wrightson, Nueva Zelanda. Se caracteriza por su alto nivel de endófito, hábito de crecimiento semi-erecto, hojas anchas y de color verde oscuro. Ha sido desarrollado para producir forraje de alta calidad y aumentar la productividad animal en sistemas de pastoreo, especialmente desde mediados de primavera y fines de otoño. Para expresar su máximo potencial, quartet requiere de suelos fértiles y sin problemas de estrés hídrico (ANASAC, 2001b).

Al igual que otros cultivares de ballica perenne de alto endófito, quartet presenta una alta resistencia a distintas plagas, especialmente a *Listronotus* (gorgojo argentino del tallo) (ANASAC, 2001b).

Debido a su floración tardía, quartet mantiene una elevada tasa de crecimiento hasta tarde en primavera y verano. Por tratarse de un cultivar nuevo, existe limitada evidencia para probar la persistencia de quartet, pese a lo cual, en ensayos, se ha observado que ésta es alta y similar a la de otros cultivares con alto endófito. Sin embargo, deben tenerse presente algunas

condiciones para lograr la persistencia deseada, tales como: suelos de mediana a alta fertilidad, no tener sequías estivales prolongadas y evitar el sobrepastoreo, el cual tiende a ser recurrente en cultivares tetraploides de alta palatabilidad (ANASAC, 2001b).

2.7.2.3 Cultivares tetraploides con origen en Europa. En esta clasificación se encuentra el cultivar Pastoral.

2.7.2.3.1 Pastoral. Cultivar tetraploide de floración tardía, un mes más tarde que el cultivar Nui. Pastoral fue creada en Gran Bretaña para dar respuesta a las necesidades de los productores como por ejemplo, producir la mayor cantidad de forraje posible, especialmente en la temporada de verano y otoño, ser lo más palatable posible, gracias a la gran resistencia a enfermedades (Ragt-Semences 2000, citado por ISLA, 2001).

Otros puntos importantes sobre las características de pastoral son resistencia a la sequía y altas temperaturas, resistencia a enfermedades, ideal para pastoreo, muy buena palatabilidad y buena adaptabilidad a la asociación con trébol blanco (Ragt-Semences 2000, citado por ISLA, 2001).

## **2.8 Sistemas de producción en base a praderas y su relación con la acidez.**

En sistemas intensivos de producción de lechería, basados fundamentalmente en praderas de ballica establecidas en el sur de Chile, una de las principales limitantes es el bajo contenido de bases y el alto grado de acidez que se genera en el suelo. Como consecuencia, la composición mineral del forraje es alterada y la calidad nutricional disminuye (MORA *et al.*, 1997). Esta excesiva acidez afecta además el proceso de fijación simbiótica del trébol blanco y también en casos más extremos su persistencia en la pradera (SIERRA, 1994).

Generalmente con altos niveles de saturación de aluminio, la pradera presenta una predominancia de especies de bajo valor forrajero como chéptica (*Agrostis capillaris* L.) y pasto miel (*Holcus lanatus* L.) y una ausencia total de especies nobles como trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y ballicas (*Lolium perenne* L., *Lolium multiflorum* Lam.) (SIERRA, 1992).

### 2.8.1 Sensibilidad de especies forrajeras a la saturación de aluminio y pH.

El efecto de toxicidad es variable según la especie, el Cuadro 1 muestra el grado de tolerancia a la toxicidad por aluminio de diferentes cultivos en suelos de Escocia.

**CUADRO 1. Nivel crítico y sensibilidad de plantas de clima templado al aluminio.**

Especie	Sensibilidad	Nivel de Al sobre el cual los rendimientos se reducen (% de saturación de Al de la CIC).
Alfalfa Remolacha Cebada Hualputra	Altamente Sensible	1-5
Raps Falaris (plántulas) Trigo	Sensible	5-10
Lupino blanco Algunas avenas Trébol blanco Trébol subterráneo Festuca Ballica Algunos Triticales	Moderadamente tolerante	10-20
Algunos Triticales Lupino (angustifolius) Pasto ovillo Algunas avenas Centeno	Tolerante	20-30

FUENTE: Cregan y Scott (1986), citados por SIERRA (1992).

RUZ y CAMPILLO (1996), señalan que entre las especies forrajeras, la alfalfa no tolera la presencia de aluminio y le siguen en orden de menor a mayor tolerancia trébol rosado, trébol blanco, ballica, col forrajera que pueden tolerar entre 1 y 8 % de Al CICE, quedando según su clasificación de sensibilidad en el rango de medianamente tolerantes.

Usando como referencia el pH (en agua), su utilización para interpretar el grado del problema debe considerar las diferentes sensibilidades o tolerancias de las distintas especies forrajeras. Para ello se deben definir dos conceptos: pH crítico y pH suficiente. El primero, es aquel bajo el cual existe depresión significativa de la productividad a causa del aluminio tóxico y el segundo es aquel sobre el cual no existen limitaciones de la productividad. En el siguiente cuadro se presentan los valores de pH críticos y suficientes para las diferentes praderas del sur de Chile (SUAREZ, 1996).

**CUADRO 2. Valores de pH críticos y suficientes para algunos cultivos y praderas de la X Región, Chile.**

Especies	pH crítico	pH suficiente
Papa	5.0	5.5
Ballica	5.5	5.7
Avena	5.5	5.7
Trigo	5.5	5.8
Trébol blanco	5.6	5.8
Pradera mixta	5.6	5.8
Raps	5.7	5.9
Cebada	5.8	6.0
Trébol rosado	5.8	6.0
Remolacha	6.0	6.4
Alfalfa	6.2	6.6

FUENTE: SUAREZ (1996).

Según RUZ y CAMPILLO (1996), el rango de pH óptimo del suelo para el crecimiento de las principales especies forrajeras es el siguiente.

**CUADRO 3. Rango óptimo de pH del suelo para el crecimiento de las principales especies forrajeras.**

Especie	Rango de pH
Alfalfa	6.5 - 8.0
Trébol blanco	5.5 - 7.3
Trébol rosado	6.0 - 8.0
Ballica	5.5 - 7.0
Col forrajera	5.5 - 6.5
Maíz para ensilaje	5.5 - 8.0

FUENTE: RUZ y CAMPILLO (1996).

### 2.8.2 Ensayos realizados en tolerancia al aluminio en especies forrajeras.

A continuación se exponen los ensayos realizados en ballicas perennes y otras especies forrajeras de importancia, existentes en la literatura nacional e internacional.

2.8.2.1 Ensayos nacionales. GALLARDO *et al.* (1994), realizaron un estudio de 15 días de crecimiento bajo condiciones controladas, en una cámara de crecimiento con una temperatura de 25° C y un fotoperíodo de 16 horas, de tres especies forrajeras (2 cultivares de ballica bianual (*Lolium multiflorum* Lam.), 1 cultivar de ballica anual, 6 cultivares de ballica perenne (*Lolium perenne* L.), 4 cultivares de festuca (*Festuca arundinacea* Schreber) y tres cultivares de pasto ovilla (*Dactylis glomerata* L.)). Se utilizaron cuatro niveles de Al (0, 50, 100, 200,  $\mu$ M) y dos de pH (4.8 y 6.0) y el parámetro de evaluación fue el crecimiento radical relativo (%CRR). De sus resultados los autores concluyeron que la sensibilidad a la presencia de protones es dependiente de la variedad (ballica Concord y pasto ovilla Wana fueron sensibles a H<sup>+</sup>) ya que el crecimiento radical relativo fue afectado a pH 4.8, independientemente de los niveles de Al utilizados en el experimento por lo que la fitotoxicidad en estos casos no se vió aumentada en presencia de aluminio. Por el contrario, todas las otras

variedades forrajeras evaluadas fueron afectadas por fitotoxicidad de aluminio, en mayor o menor grado. Además, se concluyó que de los cultivares evaluados los más tolerantes a  $H^+$  y Al son las ballicas perenne Tama y Yatsyn 1.

En un estudio posterior realizado por GALLARDO y BORIE (1999), de 19 días de crecimiento, bajo condiciones controladas, en soluciones nutritivas con diferentes pH (4.8 y 6.0) y concentraciones de aluminio (0, 100 y 200  $\mu\text{Mol/L}$ ), se evaluó el efecto de la fitotoxicidad del aluminio sobre el crecimiento radical de diferentes cultivares de ballicas de rotación y ballicas perennes. Los resultados indicaron que el grado de tolerancia a Al de mayor a menor en ballicas de rotación fue Tama > Tetrone > Concord y en ballicas perennes fue Yatsyn 1 > Nui > Ellett > Anita > Marathon > Embassy.

Con respecto una clasificación de tolerancia al aluminio propuesta por los autores, utilizando como parámetro de evaluación el crecimiento radical relativo ( $\text{CRR}_{\text{Al}}\%$ ), considerando como 100% al largo radical de las plantas crecidas en solución nutritiva en ausencia de Al y pH 6,0, en la cual se crearon cuatro categorías: Tolerante, semitolerante, semisensible y sensible, evaluada en solución nutritiva con 100  $\mu\text{M}$  Al, los resultados muestran que en ballicas de rotación se destacaron como mas tolerante al Al el cultivar Tama y en ballicas perennes Yatsyn 1, Nui y Ellett (Cuadro 4).

**CUADRO 4. Selección de tolerancia a aluminio de seis cultivares de ballica perenne.**

	Tolerante ( $>80\% \text{ CRR}_{\text{Al}}$ )	Semitolerante ( $70-80\% \text{ CRR}_{\text{Al}}$ )	Semisensible ( $60-70\% \text{ CRR}_{\text{Al}}$ )	Sensible ( $< 60\% \text{ CRR}_{\text{Al}}$ )
rotación	Tama		Tetrone	Concord
	Yatsyn 1	Anita	Embassy	
perenne	Nui	Marathon		
	Ellett			

FUENTE: GALLARDO y BORIE, 1999.

Posteriormente BORIE *et al.* (1999), realizaron ensayos de campo en un suelo Andisol acidificado (Panguipulli), donde se evaluó el efecto de dos dosis de cal sobre la producción de siete cultivares de ballica perenne. Se registraron diferencias del rendimiento entre cultivares, lo que fue atribuido a la diferencia de sensibilidad a la acidez y toxicidad de aluminio de los diferentes cultivares de ballica perenne. En este ensayo, los cultivares desarrollados en Nueva Zelanda (Marathon, Embassy y Solo) fueron más tolerantes que los desarrollados en Europa (Jumbo y Revital -100), logrando una producción intermedia los cultivares Nui y Vedette (ambos de origen neozelandés).

En estudios más recientes realizados en la Universidad Austral, PONCE (1999), evaluó el comportamiento de cinco especies pratenses ante distintos niveles de aluminio en solución en jarras Leonard, bajo condiciones controladas. El estudio tuvo una duración de 72 días y se evaluó chéptica (*Agrostis capillaris* L.), bromo (*Bromus valdivianus* Phil.), alfalfa chilota (*Lotus uliginosus* Schkuhr), trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y ballica inglesa (*Lolium perenne* L.) cultivar Yatsyn 1. Los tratamientos fueron 0, 1.35, 5.35, 13.35 y 26.7 mg/L de Al en solución nutritiva y los parámetros de evaluación fueron Al radicular, Al aéreo, MS radicular, MS aérea y MS total.

De sus resultados PONCE (1999), infiere que las especies leguminosas presentaron un mayor traspaso de Al radical a Al aéreo por unidad de Al ingresado a nivel radical y específicamente dentro de las gramíneas, ballica inglesa presentó las mayores concentraciones de Al aéreo. La especie que presentó la mayor absorción total de Al fue ballica inglesa, siendo alfalfa chilota la especie con menor absorción total de Al.

Con respecto a la producción de MS radical en gramíneas, PONCE (1999), observó que no existieron diferencias significativas entre las especies, en la producción de MS radical (mg/jarra) ante los distintos niveles de Al en solución. Sin embargo, ballica inglesa y bromo, presentaron una cierta tendencia, no significativa, a un mayor crecimiento radical con bajos niveles de Al en solución, siendo éste un efecto benéfico. En relación a la producción de MS aérea, ballica inglesa presentó la mayor producción de MS aérea en el tratamiento 1.35 mg/L de Al en solución, señalando nuevamente un efecto benéfico de ese nivel de Al en solución. La producción de MS aérea de las especies leguminosas no presentó diferencias significativas y fue mucho menor que la de las especies gramíneas.

Los resultados del trabajo de PONCE (1999), evidenciaron que las especies alfalfa chilota y chépica serían especies resistentes a concentraciones crecientes de Al en solución, en tanto que ballica inglesa y bromo serían especies sensibles. Alfalfa chilota y chépica tendrían mecanismos de adaptación que bloquearían la toxicidad de Al (mecanismos de exclusión) y que las vías de adaptación de ballica inglesa, se inclinarían hacia los mecanismos de tolerancia, más que los de exclusión.

Por su parte, RADIC (2001), evaluó el comportamiento de cuatro ecotipos de bromo (*Bromus valdivianus* Phil.) seleccionados previamente de acuerdo a su sensibilidad al aluminio tóxico en relación con ballica perenne



cultivar Anita. De los ecotipos de bromo evaluados dos eran clasificados como tolerantes, uno semitolerante y uno sensible. La metodología de trabajo y los parámetros evaluados, fueron similares a los utilizados por PONCE (1999). El ensayo tuvo una duración de 73 días y los niveles de Al en solución utilizados fueron, 0, 1.9, 5.7, 17, 51, 152.9 mg/L. Los resultados obtenidos por RADIC (2001), evidenciaron que los cuatro ecotipos de la especie *Bromus valdivianus* Phil. fueron más sensibles al aluminio en solución que ballica perenne cv Anita presentada como control. Todas las gramíneas evaluadas presentarían un mecanismo de tolerancia por exclusión, sugerido por la mayor acumulación del Al en la parte radical que en la parte aérea.

2.8.2.2 Ensayos internacionales. RENGEL y ROBINSON (1989), estudiaron los efectos del aluminio en el crecimiento y absorción de macronutrientes en ballica anual (*Lolium multiflorum* Lam.). En el estudio se evaluaron cuatro cultivares de ballica anual, que son ampliamente cultivados en el sudeste de Estados Unidos (Gulf, Marshall, Urbana y Wilo). Los cultivares fueron cultivados en una cámara de crecimiento en soluciones nutritivas a 0, 37, 74, 148, 296 y 592  $\mu\text{M}$  de Al, con pH ajustado a 4.2 y con un posterior monitoreo diario de los cambios producidos en el pH. La duración del ensayo fue de 18 días. Se definió el índice de tolerancia de las raíces (RTI) como el peso seco de las raíces cultivadas con aluminio, dividido por el peso seco de las raíces cultivadas sin aluminio y el índice de tolerancia de la parte aérea (STI) como el peso seco de la parte aérea de las plantas cultivadas con aluminio, dividido por el peso seco de la parte aérea de las plantas cultivadas sin aluminio.

Los resultados obtenidos por RENGEL y ROBINSON (1989), señalan cambios en el pH de las soluciones nutritivas que se elevaron a 6.7, en los cultivares Marshall y Gulf, después de la primera renovación de la solución nutritiva, ya que en la solución nutritiva inicial no ocurrieron cambios importantes de pH. Los cultivares Marshall y Gulf mostraron diferencia

significativa ( $P \leq 0.05$ ) en el pH, en relación a los otros cultivares, excepto en las dos concentraciones más altas de aluminio (296 y 592  $\mu\text{M}$  de Al) presentando una mayor tolerancia total al aluminio.

Al comparar las concentraciones de Al, se encontraron incrementos muy grandes entre las plantas cultivadas en solución nutritiva libre de Al y las plantas cultivadas en solución nutritiva con Al. Sin embargo, tal incremento en la concentración de Al en las raíces se produjo hasta la solución nutritiva que contenía 37  $\mu\text{M}$  de Al, ya que posteriores incrementos de Al en la solución nutritiva originó pequeños incrementos en las concentraciones de Al en las raíces. El transporte de Al desde las raíces hacia la parte aérea fue lento y la mayor parte del aluminio permaneció en las raíces (RENGEL y ROBINSON, 1989).

De sus resultados, basados en los índices de tolerancia de raíces y parte aérea, RENGEL y ROBINSON (1989), concluyeron que el orden decreciente de resistencia al estrés por Al entre los cultivares de ballica evaluados fue Marshall > Gulf > Urbana > Wilo, siendo el indicador más sensible de tolerancia al Al, el índice de tolerancia radical.

En relación a los cambios en el pH, los autores señalan que la resistencia a la acidificación del medio de cultivo, no fue probablemente el mecanismo responsable de la tolerancia diferencial al aluminio entre los cultivares de ballica, ya que la tolerancia diferencial al aluminio fue visualizada después de 5 o 6 días de tratamiento con Al, antes que cualquier cambio en el pH ocurriera en la solución nutritiva. Por lo tanto, la tolerancia diferencial fue inicialmente alcanzada por otros mecanismos (RENGEL y ROBINSON, 1989).

Ya que los cultivares fueron diferencialmente dañados por el Al, la tasa a la cual ellos podrían utilizar el  $\text{NH}_4^+$  y/o el  $\text{NO}_3^-$  podría haber sido desigualmente

afectada, causando las diferencias observadas en la elevación del pH. Ya que la especificidad y la solubilidad del Al dependen del pH de la solución, el crecimiento relativo de los cultivares, así como también, la absorción de nutrientes, podrían ser afectados por el Al a pH más bajo, magnificando por lo tanto las diferencias existentes en tolerancia al Al. Es por esto que las diferencias del pH observadas fueran probablemente un efecto más que una causa de la tolerancia diferencial al Al entre los cultivares de ballica en su estudio. Sin embargo, la habilidad de los cultivares Marshall y Gulf para elevar el pH en las soluciones nutritivas conteniendo Al podría capacitarlos para crecer y absorber nutrientes a tasas más altas que los otros cultivares evaluados (RENGEL y ROBINSON, 1989).

Gran parte de la investigación más reciente en toxicidad por Al en especies forrajeras ha sido desarrollado por Wheeler y colaboradores. WHEELER *et al.* (1992a), realizaron un análisis de tolerancia al Al, en aproximadamente 11.500 plántulas de 510 líneas de ballica perenne, que provenían de la progenie de plantas individuales a través de una policruza como parte de un programa para mejorar cultivares de alta producción. Los niveles de aluminio utilizados fueron 10, 20, 30, 40 y 60  $\mu\text{M}$  de Al. Aun cuando ninguna línea individual fue consistentemente más tolerante que otra, cualitativamente se seleccionaron 23 plantas individuales, por vigor y color superior en presencia de Al. El crecimiento de tres de estas plantas seleccionadas, fue examinado sobre un perfil de suelo ácido y evaluado junto con otros cultivares (Ariki, Ellett y Droughtmaster) y otras cuatro líneas provenientes de terrenos montañosos seleccionadas previamente por altos rendimientos en presencia y ausencia de nitrógeno y por resistencia a la sequía y larvas del suelo. Las líneas seleccionadas por tolerancia al Al (correspondiente a 23 líneas) tuvieron rendimientos significativamente más altos que los otros cultivares evaluados. Los resultados obtenidos, según WHEELER *et al.* (1992a), no tienen una clara explicación sobre el porqué se presenta un desempeño superior de las plantas

tolerantes a Al seleccionadas desde suelos ácidos con respecto a otras plantas. Según WHEELER *et al.* (1992a), dado que las plantas fueron seleccionadas por tolerancia al Al y que además, fueron evaluadas en un suelo ácido, es probable que estas plantas puedan explorar un volumen de suelo mayor en un suelo ácido con Al tóxico que otras plantas. Esta habilidad para explorar un mayor volumen de suelo, podría explicar, entonces, los rendimientos más altos obtenidos por estas plantas.

Posteriormente, de estas 23 líneas se hicieron tres policruzas, y las familias resultantes fueron evaluadas en cultivo en solución y comparadas con el cultivar Nui. El rendimiento total de las familias en presencia de Al, fue el doble que Nui en un experimento realizado en una época del año, pero similar a Nui en otro, realizado en una época del año diferente (WHEELER *et al.*, 1992a). Este resultado según WHEELER *et al.* (1992a), sugiere que al haber sido realizados en diferentes épocas del año, existe la posibilidad que los mecanismos de tolerancia al Al, puedan interactuar con factores ambientales desconocidos, modificando la respuesta de las plantas al Al. También, se especula que la edad de la planta puede influir en la expresión de tolerancia al Al, aunque el mecanismo de tal efecto es desconocido.

Finalmente, plantas individuales provenientes de dos policruzas entre las familias anteriores, fueron cultivadas en almacigueras y evaluadas en comparación a los cultivares Nui y Yatsyn 1, no detectándose diferencias significativas. Es importante señalar que estas líneas tuvieron alto porcentaje de daño por el gorgojo de las ballicas, por tener un bajo nivel de infección con endófito (*Acremonium lolii*) (WHEELER *et al.*, 1992a). Los autores concluyen que las plantas de ballica perenne seleccionadas en su estudio por tolerancia al Al tienen buen potencial agronómico en suelos ácidos y fértiles. Sin embargo, el endófito de las ballicas necesita ser reintroducido a estas plantas para prevenir

daño y por lo tanto una carencia de la persistencia debido a la infestación con gorgojo argentino de las ballicas.

WHEELER *et al.* (1992b), resumen los resultados de 5 años de experimentación del efecto del aluminio sobre 34 especies vegetales (87 cultivares). Todos los experimentos fueron realizados con cultivos en solución inmóvil o cultivo flotante, en invernaderos de temperatura controlada y usando una técnica de solución de cultivo de baja fuerza iónica. Las dosis de aluminio variaron entre experimentos, pero estuvieron generalmente entre 0 y 50  $\mu\text{M}$  de Al, el pH de la solución nutritiva fue 4.7. Se incluyó un control sin Al en una solución de pH 6.0. La actividad del  $\text{Al}^{3+}$  ( $\mu\text{M}$ ) a la cual los rendimientos fueron reducidos en 50% ( $\text{Al}_{\text{RY50}}$ ) fue determinada para cada cultivar (Cuadro 5).

**CUADRO 5. Categoría propuesta para tolerancia a la solución de aluminio basada en la actividad del aluminio ( $\mu\text{M Al}^{3+}$ ) requerida para reducir los rendimientos en 50% ( $\text{Al}_{\text{RY50}}$ ).**

Categoría	Rango en $\text{Al}_{\text{RY50}}$
Muy sensible	<1
Sensible	1-2
Moderadamente sensible	2-5
Moderadamente tolerante	5-10
Tolerante	10-20
Muy tolerante	>20

FUENTE: WHEELER *et al.* (1992b).

En base a las categorías propuestas (Cuadro 5) WHEELER *et al.* (1992b), clasificaron las diversas leguminosas y gramíneas forrajeras (Cuadro 6).

**CUADRO 6. Tolerancia relativa al AI de 20 especies de gramíneas y leguminosas pratenses.**

Categoría	Especie	Cultivar
Muy sensible	<i>Bromus willdenowii</i> Kunth.	Matua
	<i>Poa pratensis</i> L.	Baron
Sensible	<i>Lolium perenne</i> L.	Cvs. de Nueva Zelanda <sup>a</sup>
	<i>Lotus corniculatus</i> L.	Maitland
Moderadamente sensible	<i>Dactylis glomerata</i> L.	Apanui Kara
	<i>Lolium hybridum</i> Hauskn.	G4708 Manawa Ariki Concord
		Augusta
		Tama Paroa Moata
		Cvs. de Europa y Australia <sup>b</sup>
	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	Roa Triumph
	<i>Lolium perenne</i> L.	Pawera
	<i>Festuca arundinacea</i> Schreber	Turoa
	<i>Trifolium pratense</i> L.	G18
	<i>Trifolium repens</i> L.	Pitau
<i>Trifolium subterraneum</i> L.	Tallarook Woogenellup	
Moderadamente tolerante	<i>Dactylis glomerata</i> L.	Wana
	<i>Lotus pedunculatus</i> Cav.	Maku
	<i>Paspalum dilatatum</i> Poiret	Raki
	<i>Phalaris aquatica</i> L.	Maru
Tolerante	<i>Festuca rubra</i> L.s.l.	Desconocido
	<i>Holcus lanatus</i> L.	Massey Basyn
	<i>Medicago sativa</i> L.	Hunter River
Muy tolerante	<i>Agrostis tenuis</i> Sibth	Desconocido

<sup>a</sup> Nui, Ruanui, Ellet, Droughtmaster, Takapau broad, Takapau persistor, levin.

<sup>b</sup> Meltra, Mantilla, Vigour, Kangaroo Valley, Victoria.

FUENTE: WHEELER *et al.* (1992b)

La especie más tolerante evaluada fue chépica (*Agrostis tenuis* Al<sub>RY50</sub>>30) Edmeades *et al.* (1991), citados por WHEELER *et al.* (1992b), ya que su Al<sub>RY50</sub> fue aproximadamente el doble que las otras especies cercanas más tolerantes.

Las variaciones de las gramíneas templadas observadas en el Cuadro 6 van desde muy sensibles (*Poa pratense*, *Bromus willdenowii*) a muy tolerantes (*Agrostis tenuis*). Especies gramíneas de menor valor forrajero, en praderas productivas (*Paspalum dilatatum*, *Holcus lanatus*, *Festuca rubra*, *Agrostis tenuis*) son más tolerantes al Al que las especies pratenses normalmente preferidas (especies de *Lolium*, *Dactylis glomerata*, *Bromus willdenowii*) (WHEELER *et al.*, 1992b).

Dentro de las especies de *Lolium*, los cultivares derivados de Nueva Zelanda de ballica perenne (*Lolium perenne* L.) resultaron más sensibles al Al que los cultivares derivados de Australia y Europa. Más aun, estos cultivares derivados de Nueva Zelanda son más sensibles que cultivares de *Lolium hybridum* o *Lolium multiflorum*. Es posible que estas diferencias puedan reflejar el hecho de que la mayoría del material de ballica neozelandés ha sido seleccionado y mejorado sobre suelos fértiles y por tanto de pH alto (Edmeades *et al.*, 1991b, citados por WHEELER *et al.*, 1992b).

WHEELER *et al.* (1992b), señalan que al comparar los resultados obtenidos entre gramíneas y leguminosas forrajeras se observa que las gramíneas no fueron, generalmente, más tolerantes al Al que las leguminosas. Si bien algunas gramíneas tales como poa (*Poa pratense*) y bromo (*Bromus willdenowii*) son más sensibles en relación al Al que las leguminosas, hay gramíneas tales como *Agrostis tenuis*, pasto dulce (*Holcus lanatus*) y festuca (*Festuca rubra*) que son más tolerantes. En general, las ballicas (cultivares de *Lolium*) parecen ser al menos tan sensibles como las leguminosas (*T. pratense*

y *T. repens*) normalmente cultivadas en asociación con ellas en las praderas de Nueva Zelanda.

Sorprendentemente, *Phalaris aquatica* y alfalfa (*Medicago sativa*) mostró algún grado de tolerancia al Al. Sin embargo, estas especies son también muy sensibles al pH bajo (4.7 comparado con 6.0) lo cual explicaría su dificultad para crecer en suelos ácidos. Ninguna de las otras especies forrajeras en las cuales un tratamiento de pH fue incluido fueron sensibles a pH bajo (Edmeades *et al.*, 1991a;b citados por WHEELER *et al.*, 1992b).

Un experimento de similares características al anterior, en la metodología y criterios de clasificación, fue realizado posteriormente por WHEELER y DODD (1995), para observar el efecto del aluminio sobre el rendimiento y composición químicas de leguminosas templadas.

En sus resultados WHEELER y DODD (1995), concluyeron que en la mayoría de las especies leguminosas templadas evaluadas, los  $Al_{RY50}$  fueron más altos en las raíces que en los tallos. La mayoría de los genotipos de trébol blanco (72% en los tallos y 78% en las raíces) y los genotipos de las otras especies (61% en los tallos y 58% en las raíces) tuvieron un  $Al_{RY50}$  entre 1 y 2  $\mu M$  Al. En la especie *Trifolium pratense* se evaluaron 5 genotipos y en el caso de el genotipo Grassland Pawera el  $Al_{RY50}$  fue 1.34 y 1.98  $\mu M$  Al para los tallos y raíces, respectivamente. Aun cuando no se evaluó en este estudio *Medicago sativa*, si se evaluaron *Medicago tornata*, *Medicago lupulina*, *Medicago trunculata*, *Medicago ruthenica*, *Medicago scutellata* y *Medicago polymorpha* obteniendo en todos los casos un  $Al_{RY50} < 1 \mu M$  Al.

Según los resultados obtenidos por WHEELER y DODD (1995), y la clasificación propuesta por WHEELER *et al.* (1992b), la mayoría de los genotipos evaluados estarían en la clasificación de tolerancia a la solución de



Al, en la categoría sensible (1-2  $\mu\text{M}$  Al) lo que contrasta con los resultados obtenidos por WHEELER *et al.* (1992b) en el que *Trifolium pratense*, *Trifolium repens* están en la categoría moderadamente sensible (2-5  $\mu\text{M}$  Al) y *Medicago sativa* que se encuentra en la categoría tolerante (10-20  $\mu\text{M}$  Al) en el estudio realizado por WHEELER *et al.* (1992b), no concuerda con las especies *Medicago* evaluadas en el estudio de WHEELER y DODD (1995) que entran en la categoría de muy sensible (<1  $\mu\text{M}$  Al).

Los estudios realizados tanto a nivel nacional como internacional, difieren entre ellos en su metodología de trabajo y criterios de clasificación propuestos para definir la tolerancia o sensibilidad de las diferentes especies forrajeras. Sin embargo, en general son concordantes en afirmar que bromo (*Bromus valdivianus*) es sensible al Al en mayor grado que ballica perenne (*Lolium perenne* L.), festuca (*Festuca arundinacea*) y pasto ovilla (*Dactylis glomerata*), siendo chéptica (*Agrostis capillaris*) y alfalfa chilota (*Lotus uliginosus*) más resistentes al Al. Las diferencias más notorias entre los resultados de los ensayos realizados se refieren a que en el caso de ballica perenne (*Lolium perenne* L.) según BORIE *et al.* (1999), los cultivares derivados de Nueva Zelanda, son más tolerantes que los cultivares derivados de Europa. Dentro de los estudios realizados con el fin de comparar cultivares de ballica perenne (*Lolium perenne* L.), GALLARDO y BORIE (1999), señalan que Yatsyn 1 y Niu son cultivares que presentan mayor tolerancia al Al, al compararlos con Ellitte, Anita, Marathon y Embassy. Estos resultados contrastan con lo expuesto por WHEELER *et al.* (1992b), que clasificó a *Lolium perenne* L. derivados de Nueva Zelanda como sensibles y a *Lolium perenne* L. derivados de Europa y Australia como moderadamente sensibles, lo que puede deberse a la gran diferencia en la metodología empleada y criterios de clasificación.

### 3 MATERIAL Y METODO

#### 3.1 Ubicación.

El experimento fue realizado en la Cámara de Crecimiento del Laboratorio de Forrajeras, ubicada en el Instituto de Producción Animal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Austral de Chile, Valdivia. El período de crecimiento de las plantas tuvo una duración de 98 días dividido en tres fases. La primera fase constó del crecimiento de la especie sin inclusión de aluminio en la solución nutritiva durante 21 días, asegurando su buen establecimiento, la segunda fase en la cual se aplicaron dosis bajas de aluminio en la solución nutritiva durante 21 días y la tercera fase fueron evaluados con inclusión de aluminio (dosis finales) en la solución nutritiva por 56 días.

#### 3.2 Control de las condiciones ambientales.

Las condiciones ambientales del experimento, fueron reguladas con el fin de obtener un ambiente homogéneo de crecimiento y desarrollo de las plantas, estas fueron:

**3.2.1 Temperatura.** La temperatura de la cámara fue controlada con un sistema de aire acondicionado regulado a una temperatura promedio de  $22^{\circ} \pm 4^{\circ}\text{C}$ . Las temperaturas registradas durante el período experimental se registraron diariamente a través de un termómetro de máxima y mínima.

**3.2.2 Humedad relativa.** Esta se controló con un sistema de ventilación y los valores de humedad relativa durante el ensayo se registraron diariamente a través de un higrómetro.

**3.2.3 Luz.** Se utilizó un fotoperíodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad. La duración del fotoperíodo fue controlada mediante un sistema automático a través de relojes sincronizados. Este fotoperíodo entrega a la cámara aprox. 12.000 lux.

### **3.3 Especie y cultivares evaluados.**

La especie correspondió a *Lolium perenne* L. y los cultivares utilizados fueron Aries HD, Kingston, Nui, Pastoral, Quartet, y Yatsyn 1.

### **3.4 Material a utilizar.**

Se utilizaron Jarras Leonard confeccionadas a partir de botellas de 750 cm<sup>3</sup> de capacidad, las cuales fueron cortadas por la mitad. La parte superior de las jarras presentaba un alto de 8,5 cm y un área de 40,7 cm<sup>2</sup> lo que corresponde a un volumen de 346 cm<sup>3</sup>. Como sustrato se utilizó cuarzo, previamente lavado, además se utilizó mecha de algodón y fibra de vidrio para conducir la solución nutritiva.

### **3.5 Preparación y montaje de las Jarras Leonard.**

Esta etapa constó del lavado de las jarras, lavado del sustrato y el montaje y llenado de las jarras.

**3.5.1 Lavado de las jarras.** Las jarras fueron lavadas con agua potable y detergente. Posteriormente el material fue sometido a lavados sucesivos con agua destilada.

**3.5.2 Lavado del sustrato.** El cuarzo fue lavado con agua potable para eliminar impurezas, seguido de un lavado con ácido clorhídrico (3 Molar) para finalizar con lavados de agua destilada. Posteriormente, se determinó el aluminio intercambiable en el sustrato utilizado en el ensayo, por medio del

método (KCI 1 Molar) para la determinación de este elemento en los suelos (PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE (PUC), 1975).

**3.5.3 Montaje y llenado de las jarras.** En cada jarra se montó una mecha confeccionada a partir de mechas de estufa a parafina de algodón y fibra de vidrio para la conducción de la solución nutritiva por capilaridad desde el recipiente inferior hacia el recipiente superior de la jarra. La mecha fue sujeta a la altura del gollete de la botella por medio de un anillo de goma, de manera que se impidiera su deslizamiento, y a la vez, sirviendo de soporte del volumen de cuarzo seco depositado en el recipiente superior. Dentro del volumen ocupado por el cuarzo, la mecha se dividió en cinco partes que se distribuyeron en diferentes direcciones de manera de permitir una mayor superficie de contacto con la arena de cuarzo y posteriormente con las raíces.

### **3.6 Pregerminación y transplante de las semillas.**

Las semillas fueron germinadas sobre papel filtro saturado con agua destilada en un germinador de vidrio. El período total de duración en la etapa de germinación fue de 12 días, para todos los cultivares.

Se seleccionaron 9 plantas homogéneas que se trasplantaron a las Jarras Leonard para el comienzo del ensayo.

### **3.7 Homogeneización de las jarras.**

Para evitar la muerte por deshidratación sumado al estrés del transplante las plántulas fueron regadas durante 7 días con agua destilada sobre el sustrato, luego se regó solución nutritiva sin aluminio de la misma manera durante 7 días más. Finalmente, se agregó la solución nutritiva en el recipiente inferior de la jarra durante 7 días. En esta etapa se procedió a eliminar las plantas menos vigorosas dejando siete plantas por Jarra Leonard.

**3.8 Crecimiento y corte de homogeneización de las plantas.** Luego del período de establecimiento y homogenización de las jarras, las plantas se mantuvieron durante 21 días con solución nutritiva con aluminio en bajas dosis (0.5, 1.0, 2.0, 4.0 y 8,0  $\mu\text{Mol Al/L}$ ), posteriormente se realizó un corte de homogeneización a una altura de 10 centímetros de la base de la planta para luego aplicar los tratamientos correspondientes.

### 3.9 Solución nutritiva.

Se utilizó la composición de la solución nutritiva propuesta por RENGEL y ROBINSON (1989), en experimentos de similares características a éste. La composición de la solución nutritiva en  $\mu\text{mol L}^{-1}$  se presenta en el Cuadro 7.

**CUADRO 7. Composición de la solución nutritiva.**

NUTRIENTE	$\mu\text{Mol Al/L}$
N-NO <sub>3</sub>	3.710
N-NH <sub>4</sub>	300
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	100
K	750
Ca	1.380
B	13
Na	85.8
Cl	85.8
Mo	1.5
Mg	270
Mn	5.5
Zn	1.2
Cu	0.3
Fe	18
SO <sub>4</sub>	277

FUENTE: RENGEL y ROBINSON (1989).

**3.9.1 Aplicación de la solución nutritiva.** Las soluciones nutritivas fueron renovadas diariamente, utilizando un volumen aproximado de 125 mL por jarra. Una vez por semana se controló el pH para mantener un nivel constante de 4,2. Utilizando hidróxido de sodio (NaOH), para corregir cuando el pH estaba ácido y ácido clorhídrico (HCl) cuando el pH estaba básico.

### 3.10 Tratamientos.

Las dosis de aluminio aplicadas como sulfato de aluminio hidratado ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ ) en la tercera fase y los cultivares de *Lolium perenne* L. usados en el estudio, se presentan en el Cuadro 8.

**CUADRO 8. Cultivares y nivel de aluminio del ensayo.**

Especie	Variedad comercial	Nivel de aluminio ( $\mu\text{Mol Al/L}$ )
<i>Lolium perenne</i> L.	Aries HD	0 -70 -140 -280 -560 -1120
	Kingston	0 -70 -140 -280 -560 -1120
	Nui	0 -70 -140 -280 -560 -1120
	Pastoral	0 -70 -140 -280 -560 -1120
	Quartet	0 -70 -140 -280 -560 -1120
	Yatsyn 1	0 - 70 - 140 - 280 -560 -1120

### 3.11 Variables evaluadas.

Se midieron las siguientes variables:

- Producción de materia seca radical (g/jarra).
- Producción de materia seca aérea (g/jarra).
- Producción de materia seca total (g/jarra).
- Concentración del aluminio radical (mg/kg de MS).
- Concentración del aluminio aéreo (mg/kg de MS).

A partir de la producción de MS y la concentración de aluminio se estimó:

- Absorción de aluminio en las raíces (mg Al/jarra).
- Absorción de aluminio aéreo (mg Al/jarra).

**3.11.1 Cosecha del material vegetal.** Las plantas fueron cosechadas completas desde las jarras en un solo día, luego se congelaron. Posteriormente se separó la parte aérea y las raíces de las plantas. Luego, el material vegetal fue secado a 60° C por 48 horas, determinándose en base a peso la materia seca de la parte aérea y la parte radical (PUC, 1975).

**3.11.2 Determinación de aluminio en el material vegetal.** El material vegetal completo fue picado finamente. En los crisoles descontaminados se pesaron, la parte aérea y la parte radical.

Las muestras fueron calcinadas en una mufla a 550 °C por 5 horas. En las cenizas se determinó el aluminio a través de la metodología propuesta por la PUC (1975), utilizando espectrofotometría de absorción atómica.

**3.12 Diseño experimental y análisis estadístico.** El ensayo se manejó como un experimento completamente al azar, con seis tratamientos de Al para cada uno de los seis cultivares y cada tratamiento tuvo cinco repeticiones. Para detectar si existieron diferencias significativas entre los tratamientos se realizó un análisis de varianza de Fisher, utilizándose el test de Tukey (5% nivel de significancia) para la separación de medias, cuando existieron diferencias estadísticas. El programa estadístico utilizado fue Statgraphics plus 2.0. Para determinar el comportamiento de los cultivares de *Lolium perenne* L. evaluados frente a los niveles crecientes de Al, se utilizó análisis de regresión entre los parámetros evaluados y la concentración de Al en solución, usándose el programa Kurv4+ para la determinación de las ecuaciones y posteriormente para el ajuste de las regresiones el programa GraphPad Prism versión 2.0.

## 4 PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

### 4.1 Determinación de contaminación con aluminio en el material experimental.

La contaminación con aluminio es un factor común en experimentos realizados en toxicidad por Al.

En los resultados finales del experimento se encontró aluminio en el tratamiento sin aluminio adicionado (tratamiento 0  $\mu\text{M}$  Al/L). Esta situación concuerda con otros resultados en experimentos realizados por RADIC (2001), PONCE (1999), FOY *et al.* (1978), WHEELER y DODD (1995). Según WHEELER y DODD (1995), la contaminación se puede atribuir a las soluciones nutritivas, sin embargo, FOY *et al.* (1978) y ROY *et al.* (1988) señalan que es imposible evitar la contaminación con aluminio de los materiales.

Para poder determinar el aluminio existente en los materiales utilizados, se midió el aluminio presente en el sustrato previamente lavado, la mecha de algodón, el agua destilada y en la solución nutritiva.

**4.1.1 Contaminación del sustrato.** El resultado de los análisis del cuarzo, que fue el sustrato utilizado para el crecimiento de las plantas en las jarras Leonard, se cuantificó el aluminio por medio del método de extracción con cloruro de potasio. El sustrato, después del proceso de lavado, presentó en promedio una contaminación de 1.35 mg/kg y una desviación estándar de 0.09 mg/kg de  $\text{Al}^{n+}$ .



**4.1.2 Agua destilada.** Al realizar el análisis para determinar la concentración de aluminio en el agua destilada, se obtuvo como resultado 0,003 mg/L de aluminio, 450 veces menor a la contaminación encontrada en el sustrato, siendo el agua destilada la menor fuente de contaminación encontrada.

**4.1.3 Solución nutritiva.** El análisis realizado a la solución nutritiva sin inclusión de sulfato de aluminio (tratamiento 0  $\mu\text{M/L}$ ) entregó un valor de 0,06 mg/L. Este valor es 20 veces mayor al encontrado en el agua destilada, lo que indica que la contaminación de Al de la solución nutritiva no proviene del agua destilada, sino que de los reactivos utilizados para la preparación de la solución nutritiva, esto concuerda con lo señalado por WHEELER y DODD (1995) y RADIC (2001).

**4.1.4 Mecha de conducción de la solución nutritiva.** Al realizar el análisis a la mecha de algodón, a través de la metodología propuesta por la PUC (1975), utilizando espectrofotometría de absorción atómica, se obtuvo como resultado 23.75 mg/kg de Al. Este valor representa la cantidad total de Al presente por kilogramo de mecha, sin embargo, el peso aproximado de cada mecha utilizada en las jarras Leonard fue de 5.5 g, con una cantidad aproximada de 0.180 mg de Al por mecha. Las lecturas de Al de los análisis de determinación de contaminación se presentan en los anexos 1, 2, 3 y 4.

**4.1.5 Equipo utilizado para la medición.** El rango óptimo de trabajo del espectrómetro de absorción atómica es sobre 5  $\mu\text{g/mL}$ . Valores entre 0 y 5  $\mu\text{g/mL}$  pueden ser inexactos, lo que indica que los datos obtenidos como fuente de contaminación varían en su exactitud, lo que no indica que estén errados.

## **4.2 Problemas metodológicos encontrados.**

En la realización de este experimento se pudieron detectar dos problemas metodológicos. El primero de ellos está relacionado con el estrés producido

por el trasplante de las plántulas, desde el germinador hacia las jarras Leonard y el segundo con la inclusión del Al en la formulación de las soluciones nutritivas, en el inicio del experimento.

**4.2.1 Adaptación luego del trasplante.** Cuando las plántulas fueron transplantadas desde el germinador hacia las jarras Leonard, fue necesario regar continuamente con agua destilada durante 7 días y luego con solución nutritiva sin inclusión de aluminio durante 7 días más, sobre la arena de cuarzo, utilizando una pizeta, finalmente se incluyó la solución nutritiva sin aluminio a la parte inferior de la jarra durante otros 7 días.

La metodología señalada anteriormente, se realizó debido a que después de la germinación, hay un moderado crecimiento de la plántula con poco desarrollo radical. El riego continuo de agua destilada y solución nutritiva sin Al adicionado, impidió que se acentuara un evidente estrés hídrico, evitando la muerte de las plántulas, situación de la que existían antecedentes del experimento realizado por RADIC (2001).

**4.2.2 Inclusión del Al en la formulación de las soluciones nutritivas.** Luego del período de adaptación de las plántulas al trasplante, se comenzó a incluir en la solución nutritiva, las dosis de aluminio correspondientes a los tratamientos inicialmente establecidos. Se aplicaron dosis bajas de aluminio (0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 y 8.0  $\mu\text{Mol Al/L}$ ) a las soluciones nutritivas, durante 21 días, período en el cual se observó un crecimiento homogéneo de todos los tratamientos, con un rápido desarrollo de la parte aérea y radical. Posteriormente, se reformularon los tratamientos, aumentando la inclusión de Al en 0, 70, 140, 280, 560 y 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$  y se realizó un corte de homogeneización de la parte aérea, sobre los 10 cm de la base de la planta. Para poder comprobar si existían diferencias de producción de materia seca hasta ese momento (42 días desde el trasplante), se recolectó el corte de cada

cultivar, el cual fue secado por 48 hr a 60 °C, determinando la producción de MS del corte; posteriormente, se realizó un análisis de varianza, con comparación múltiple de promedios aplicando la prueba de Tukey (Cuadro 9).

**CUADRO 9. Producción promedio de materia seca aérea del corte de homogeneización ( $\pm$  d.e.) (g/jarra)**

<b>Cultivar</b>	<b>Promedio</b>
Yatsyn 1	0.96 $\pm$ 0.44 n.s.
Nui	0.83 $\pm$ 0.39 n.s.
Quartet	0.69 $\pm$ 0.42 n.s.
Kingston	0.78 $\pm$ 0.43 n.s.
Pastoral	0.77 $\pm$ 0.31 n.s.
Aries	0.66 $\pm$ 0.26 n.s.

n.s. indica diferencias no significativas ( $p > 0,05$ , TUKEY).

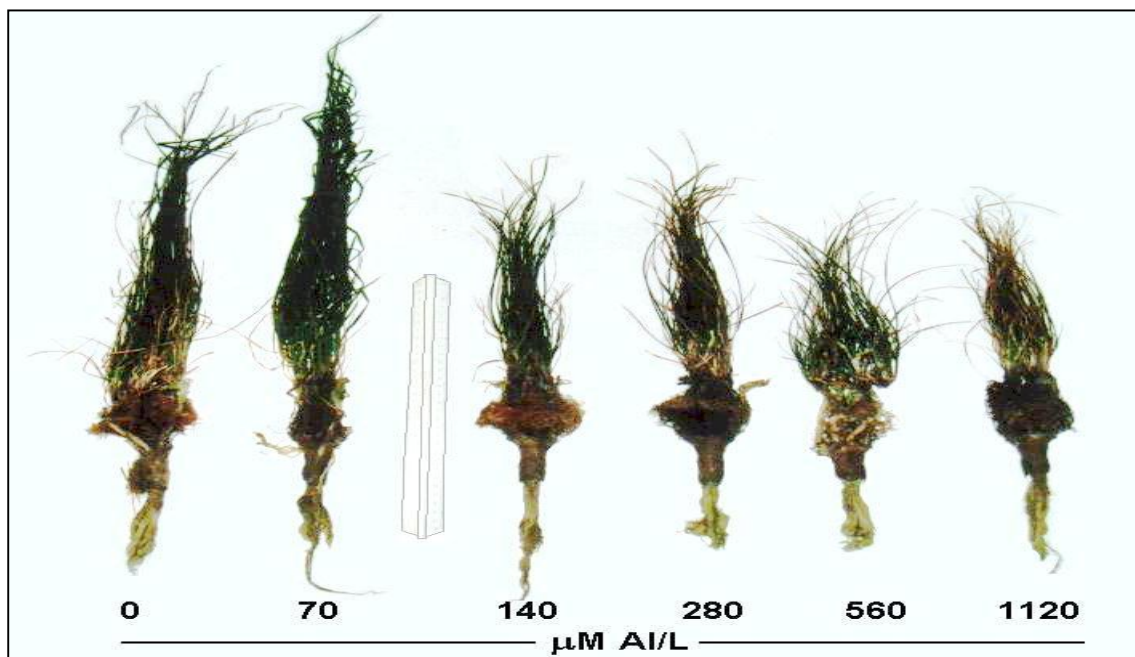
Como se observa en el Cuadro 9, no existieron diferencias estadísticamente significativas, lo que indica que en ese momento todos los cultivares tenían una similar producción de MS.

#### **4.3 Análisis de las variables evaluadas.**

En este experimento las variables evaluadas fueron la producción de materia seca radical, materia seca aérea y materia seca total, además de la concentración y absorción de aluminio de la parte aérea y radical.

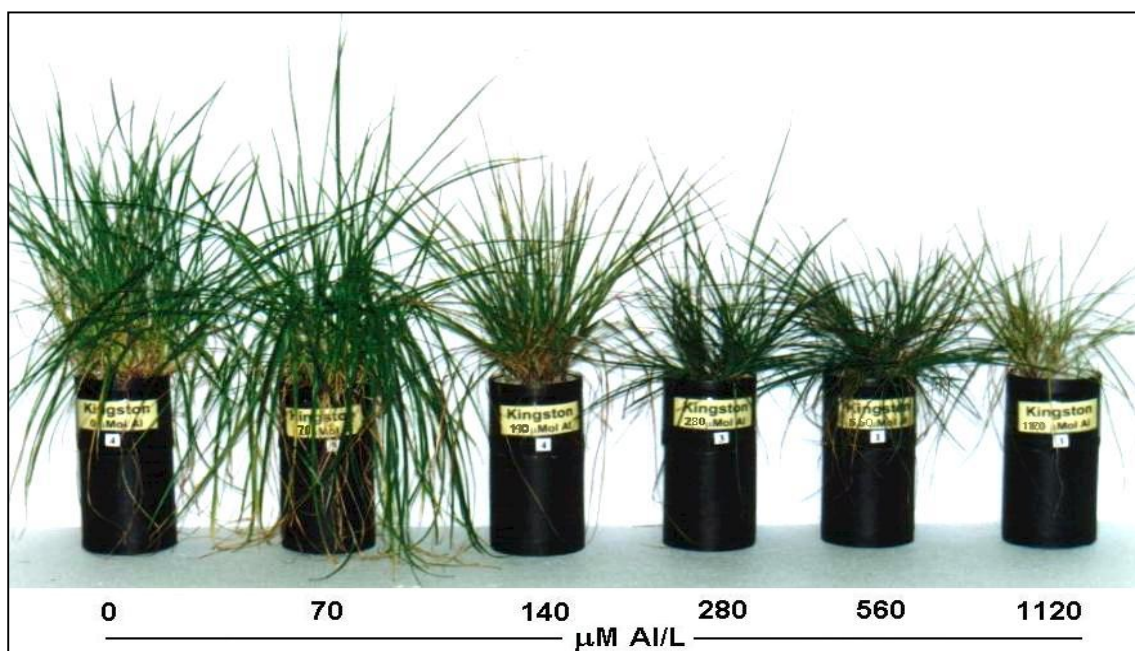
##### **4.3.1 Producción de materia seca (MS) de los cultivares de *Lolium perenne***

**L.** A medida que aumenta la dosis de Al en la solución nutritiva, se observa una disminución de la producción de MS en todos los cultivares de ballica perenne evaluados (Figura 4).



**FIGURA 4.** *Lolium perenne* L. cultivar Yatsyn 1 en distintos niveles de concentración de Al en solución (raíces incluyen mecha de algodón). (Escala comparativa = 33 cm)

Se presentaron síntomas visuales de toxicidad, plantas con menor desarrollo, raíces seminales gruesas y oscuras, con pocas raíces adventicias y menor ramificación. En la parte aérea, se observó un menor desarrollo foliar (pocos macollos), con una mayor cantidad de hojas secas, en las últimas dos semanas del experimento. Esto puede estar relacionado en mayor medida con la duración del experimento, ya que la aparición de hojas secas ocurrió en todos los tratamientos y según BALOCCHI (2000), el largo de vida de una hoja individual en invierno es de 8 a 10 semanas (Figura 5). Los efectos descritos han sido señalados en la literatura por FOY *et al.* (1978), MARSCHNER (1995) y RADIC (2001).



**FIGURA 5.** Presencia de hojas secas en todos los tratamientos de *Lolium perenne* L. cultivar Kingston, previo a la cosecha (día 98 del experimento).

4.3.1.1 Producción de materia seca en la parte aérea. Los resultados obtenidos en el experimento (Cuadro 10) permiten observar que a medida que aumenta la dosis de aluminio adicionado en la solución nutritiva, disminuye la producción de materia seca en todos los cultivares de *L. perenne*.

La comparación múltiple de promedios, prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) muestra que se determinaron tres grupos de promedios homogéneos para los cultivares Nui, Kingston, Pastoral y Quartet. Sin embargo, para los cultivares Aries y Yatsyn 1 se presentaron dos grupos de promedios homogéneos (Cuadro 10).

**CUADRO 10. Producción promedio de materia seca aérea (g/jarra) en los seis cultivares de *Lolium perenne* L.**

Tratamientos	Producción promedio de materia seca aérea ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)		
	Aries	Kingston	Nui
0 $\mu\text{mol Al/L}$	7.53 $\pm$ 2.08 a	7.78 $\pm$ 2.94 a	8.53 $\pm$ 2.33 a
70 $\mu\text{mol Al/L}$	7.24 $\pm$ 1.02 a	6.60 $\pm$ 1.76 a b	5.98 $\pm$ 1.06 a b
140 $\mu\text{mol Al/L}$	3.59 $\pm$ 1.03 b	3.56 $\pm$ 1.18 b c	3.42 $\pm$ 0.82 b c
280 $\mu\text{mol Al/L}$	3.50 $\pm$ 1.03 b	2.62 $\pm$ 1.41 c	4.14 $\pm$ 0.80 b c
560 $\mu\text{mol Al/L}$	3.40 $\pm$ 1.08 b	4.47 $\pm$ 0.70 a b c	3.68 $\pm$ 1.92 b c
1120 $\mu\text{mol Al/L}$	2.46 $\pm$ 1.26 b	2.23 $\pm$ 1.24 c	2.68 $\pm$ 0.77 c
	Pastoral	Quartet	Yatsyn 1
0 $\mu\text{mol Al/L}$	9.09 $\pm$ 1.26 a	8.21 $\pm$ 2.04 a	8.13 $\pm$ 1.40 a
70 $\mu\text{mol Al/L}$	5.49 $\pm$ 1.95 b	5.45 $\pm$ 1.39 a b	8.81 $\pm$ 3.76 a
140 $\mu\text{mol Al/L}$	3.81 $\pm$ 0.25 b c	3.72 $\pm$ 1.71 b c	5.13 $\pm$ 1.32 a b
280 $\mu\text{mol Al/L}$	2.67 $\pm$ 0.63 c	1.94 $\pm$ 1.03 c	4.63 $\pm$ 1.25 a b
560 $\mu\text{mol Al/L}$	2.35 $\pm$ 1.34 c	2.17 $\pm$ 1.36 c	5.56 $\pm$ 1.02 a
1120 $\mu\text{mol Al/L}$	2.47 $\pm$ 1.29 c	2.07 $\pm$ 1.16 c	3.05 $\pm$ 0.98 b

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

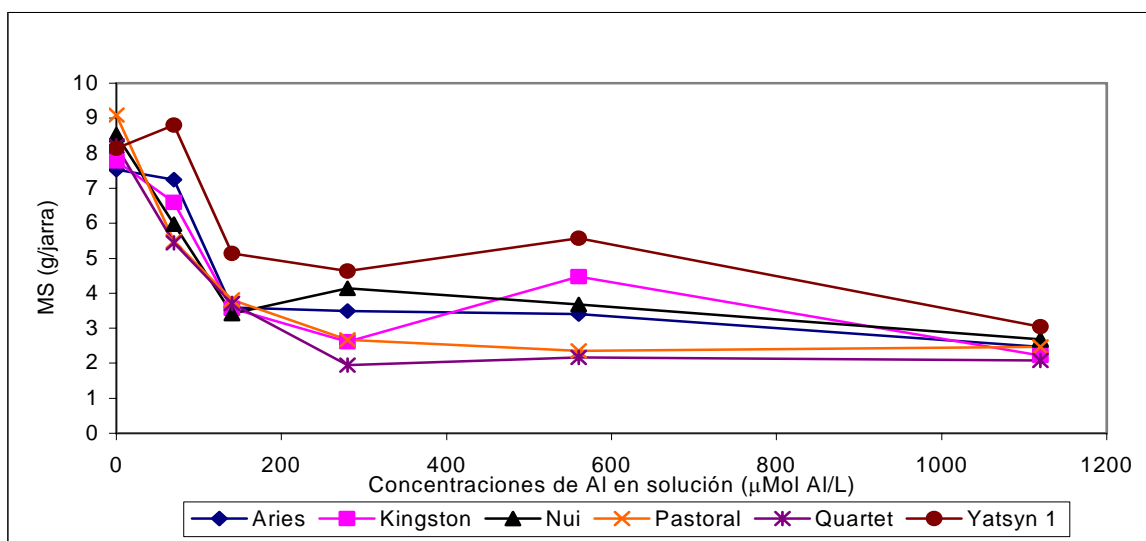
En el Cuadro 10 se observa que hay diferencias de producción de MS entre los cultivares en el primer tratamiento con Al adicionado (70  $\mu\text{Mol Al/L}$ ). Este primer efecto del Al produce una baja en la producción de MS aérea para el cultivar Pastoral. Los cultivares Quartet, Kingston y Nui presentan una reducción de producción de MS aérea intermedia entre los tratamientos 0 y 70  $\mu\text{Mol Al/L}$  y los cultivares Aries y Yatsyn 1 mantienen la producción de MS, al compararlos con el tratamiento sin Al adicionado.

Entre los tratamientos 140 y 280  $\mu\text{Mol Al/L}$  se presenta el tercer grupo de promedios homogéneos para los cultivares Nui, Kingston, Pastoral y Quartet y el segundo grupo de promedios homogéneos para los cultivares Aries y Yatsyn 1. Esto indica que en ese rango se produce un segundo efecto importante en la reducción de producción de MS aérea. Sin embargo, en los cultivares Yatsyn 1 y Nui solo se observa una disminución de la producción significativa en el tratamiento 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ .

Posterior al tratamiento 280  $\mu\text{Mol Al/L}$  la producción de MS aérea de los cultivares disminuye no significativamente, lo que sugiere que el efecto del Al tóxico reduce en mayor grado los rendimientos de MS aérea entre los tratamientos 0 y 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ .

El cultivar Yatsyn 1 presenta una mayor acumulación de MS (g/jarra) en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$  (Cuadro 10), que según ROY *et al.* (1988) se debe a un posible efecto estimulador del crecimiento, producido por bajas concentraciones de Al en la solución. Este cultivar, además, destaca por producir más MS aérea en todos los tratamientos con Al adicionado (Figura 6).

En los cultivares Quartet y Pastoral, se observa que luego del tratamiento sin adición de Al (0  $\mu\text{Mol Al/L}$ ) existe una reducción estadísticamente significativa en producción de MS hasta el tratamiento 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Posteriormente, las reducciones de MS aérea no son estadísticamente significativas. El cultivar Pastoral presenta, además, la mayor producción de MS aérea en el tratamiento sin Al adicionado.



**FIGURA 6. Producción de materia seca aérea (g/jarra) en los seis cultivares.**

Los resultados de producción de MS aérea de los cultivares en relación a las concentraciones de Al aplicadas a la solución nutritiva, se observan en el Cuadro 11.

**CUADRO 11. Producción de MS aérea promedio (g/jarra) de los seis cultivares por tratamiento.**

Tratamientos	Producción de MS aérea promedio ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)
0 $\mu$ Mol Al/L	8.21 $\pm$ 0.55 a
70 $\mu$ Mol Al/L	6.59 $\pm$ 1.28 b
140 $\mu$ Mol Al/L	3.87 $\pm$ 0.63 c
280 $\mu$ Mol Al/L	3.25 $\pm$ 1.02 c d
560 $\mu$ Mol Al/L	3.61 $\pm$ 1.29 c
1120 $\mu$ Mol Al/L	2.49 $\pm$ 0.35 d

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

La producción de MS aérea disminuye significativamente en el rango 0 - 280  $\mu$ Mol Al/L. En el tratamiento 560  $\mu$ Mol Al/L se produce un leve incremento no significativo en la producción de MS aérea influenciado por los cultivares Yatsyn 1 y Kingston. El tratamiento 1120  $\mu$ Mol Al/L presenta diferencias significativas con el tratamiento 560  $\mu$ Mol Al/L, lo que indica que la MS aérea producida es menor en ese tratamiento.

En el Cuadro 12 se observa la comparación múltiple de promedios, de la producción de MS aérea entre cultivares.



**CUADRO 12. Producción de MS aérea promedio (g/jarra) de los seis tratamientos por cultivar.**

Cultivares	Producción de MS aérea promedio ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)	
Yatsyn 1	5.88 $\pm$ 2.18	a
Nui	4.74 $\pm$ 2.16	a b
Aries	4.62 $\pm$ 2.18	b
Kingston	4.54 $\pm$ 2.22	b
Pastoral	4.31 $\pm$ 2.62	b
Quartet	3.93 $\pm$ 2.50	b

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

El cultivar Yatsyn 1 presenta la mayor producción de MS aérea, diferenciándose estadísticamente de los cultivares Aries, Kingston, Pastoral y Quartet (ver Figura 6). El cultivar Nui presenta producciones de MS aérea que no se diferencian de Yatsyn 1, pero tampoco de los demás cultivares, estando en un nivel intermedio de producción entre ambos grupos.

4.3.1.2 Producción de materia seca en la parte radical. En el Cuadro 13 se observa la producción de materia seca radical. Aun cuando se presenta una tendencia similar a la encontrada en la parte aérea, la reducción de la producción de MS (g/jarra) es menor al aumentar la concentración de Al y en tres cultivares no es estadísticamente significativa.

**CUADRO 13. Producción promedio de materia seca radical (g/jarra) en los seis cultivares de *Lolium perenne* L.**

Tratamientos		Producción promedio de materia seca radical ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)								
		Aries			Kingston			Nui		
0	$\mu\text{mol Al/L}$	1.85	$\pm 0.78$	n.s.	1.85	$\pm 0.63$	a b	1.47	$\pm 0.22$	n.s.
70	$\mu\text{mol Al/L}$	1.90	$\pm 0.51$	n.s.	1.89	$\pm 0.50$	a	1.31	$\pm 0.21$	n.s.
140	$\mu\text{mol Al/L}$	1.44	$\pm 0.14$	n.s.	1.04	$\pm 0.29$	b c	1.20	$\pm 0.40$	n.s.
280	$\mu\text{mol Al/L}$	1.36	$\pm 0.35$	n.s.	1.25	$\pm 0.45$	a b c	1.46	$\pm 0.30$	n.s.
560	$\mu\text{mol Al/L}$	1.53	$\pm 0.32$	n.s.	1.20	$\pm 0.16$	a b c	1.03	$\pm 0.49$	n.s.
1120	$\mu\text{mol Al/L}$	1.17	$\pm 0.39$	n.s.	0.96	$\pm 0.41$	c	1.25	$\pm 0.58$	n.s.
		Pastoral			Quartet			Yatsyn 1		
0	$\mu\text{mol Al/L}$	2.24	$\pm 0.79$	a	2.18	$\pm 0.49$	a	1.69	$\pm 0.33$	n.s.
70	$\mu\text{mol Al/L}$	1.43	$\pm 0.48$	a b	1.62	$\pm 0.19$	a b	1.89	$\pm 0.70$	n.s.
140	$\mu\text{mol Al/L}$	1.42	$\pm 0.17$	a b	1.51	$\pm 0.48$	a b	1.21	$\pm 0.45$	n.s.
280	$\mu\text{mol Al/L}$	1.36	$\pm 0.18$	a b	1.05	$\pm 0.48$	b	1.56	$\pm 0.35$	n.s.
560	$\mu\text{mol Al/L}$	1.02	$\pm 0.37$	b	1.17	$\pm 0.48$	b	1.54	$\pm 0.56$	n.s.
1120	$\mu\text{mol Al/L}$	0.99	$\pm 0.43$	b	1.25	$\pm 0.77$	a b	1.18	$\pm 0.30$	n.s.

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).  
n.s. indica diferencias no significativas ( $p > 0,05$ , TUKEY).

El Cuadro 13 muestra que los cultivares Aries, Nui y Yatsyn 1, no presentan diferencias estadísticamente significativas en la producción de MS radical (g/jarra) entre los tratamientos. Lo anterior sugiere que los crecientes niveles de Al aplicados no afectan el rendimiento de la MS radical de los cultivares Aries, Nui y Yatsyn 1. Caso contrario se observa en los cultivares Kingston, Pastoral y Quartet, donde se presentan diferencias estadísticamente significativas en la producción de MS radical, ante los crecientes niveles de Al en solución, separándolos en dos grupos de promedios homogéneos para los cultivares tetraploides Pastoral y Quartet y tres grupos de promedios homogéneos para el cultivar Kingston. Se observa, además, que los cultivares Pastoral y Quartet obtienen las mayores producciones de MS radical en el tratamiento sin Al adicionado ( $0 \mu\text{Mol Al/L}$ ) (Figura 7).

La comparación múltiple de promedios muestra que las raíces, en general, afectan su producción de MS en los tratamientos con mayor cantidad

de Al adicionado. El cultivar Quartet en el tratamiento 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ , el cultivar Pastoral en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$  y el cultivar Kingston en el tratamiento 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Este comportamiento es diferente al observado en producción de MS aérea, ya que la reducción del rendimiento se produce, en general, para todos los cultivares ente los tratamientos 70 y 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ .

Los cultivares Aries, Kingston y Yatsyn 1 obtuvieron mayores producciones de MS en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ , al compararlo con el tratamiento 0  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Debido a que la producción de MS radical no es significativamente diferente del tratamiento sin Al adicionado para los tres cultivares, solo se puede sugerir y no ratificar el efecto estimulador del crecimiento producido por bajas concentraciones de Al, señalado por (ROY *et al.*, 1988).

En el Cuadro 14 se presentan los resultados de producción de MS radical de los cultivares en relación a las concentraciones de Al aplicadas a la solución nutritiva.

**CUADRO 14. Producción de MS radical promedio (g/jarra) de los seis cultivares por tratamiento.**

Tratamientos	Producción de MS radical promedio ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)
0 $\mu\text{Mol Al/L}$	1.88 $\pm$ 0.29 a
70 $\mu\text{Mol Al/L}$	1.67 $\pm$ 0.26 a b
140 $\mu\text{Mol Al/L}$	1.30 $\pm$ 0.18 c
280 $\mu\text{Mol Al/L}$	1.34 $\pm$ 0.17 b c
560 $\mu\text{Mol Al/L}$	1.25 $\pm$ 0.23 c
1120 $\mu\text{Mol Al/L}$	1.13 $\pm$ 0.13 c

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

Los resultados muestran que a medida que aumenta el Al en solución, disminuye la producción de MS radical, separando a los tratamientos en tres grupos de promedios homogéneos. El tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$  se encuentra en un nivel intermedio de producción entre el tratamiento 0  $\mu\text{Mol Al/L}$  y el grupo de promedios formado por los tratamientos 140, 280, 560 y 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Esto se debe al posible efecto estimulador del crecimiento encontrado en los cultivares Aries, Yatsyn1 y Kingston en ese tratamiento (ver Figura 7).

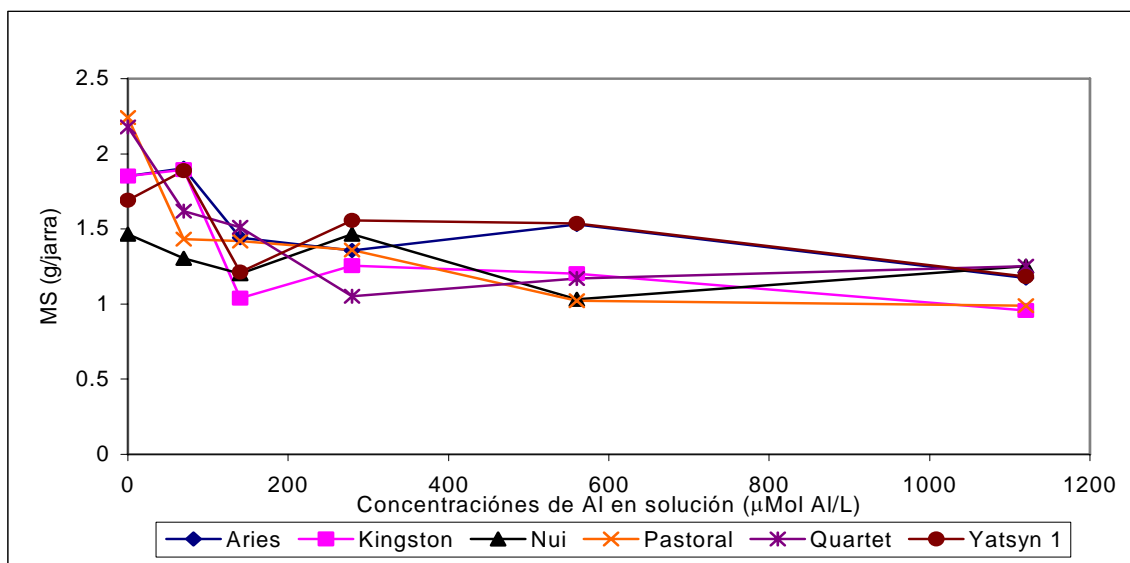
En el Cuadro 15 se observa la comparación múltiple de promedios, de la producción de MS radical entre cultivares.

**CUADRO 15. Producción de MS radical promedio (g/jarra) de los seis tratamientos por cultivar.**

Cultivares	Producción de MS radical promedio ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)	
Aries	1.54 $\pm$ 0.29	n.s.
Yatsyn 1	1.51 $\pm$ 0.27	n.s.
Quartet	1.46 $\pm$ 0.41	n.s.
Pastoral	1.41 $\pm$ 0.45	n.s.
Kingston	1.37 $\pm$ 0.47	n.s.
Nui	1.28 $\pm$ 0.17	n.s.

n.s. indica diferencias no significativas ( $p > 0,05$ , TUKEY).

El Cuadro 15 muestra que no existen diferencias significativas en la producción de MS radical entre los cultivares.



**FIGURA 7. Producción de materia seca radical (g/jarra) en los seis cultivares.**

4.3.1.3 Producción de materia seca total. La producción de materia seca total se ve fuertemente influenciada por la cantidad de biomasa aérea, debido a esto, el gráfico de la materia seca total (Figura 8) es similar al de materia seca aérea (Figura 6). A medida que aumenta la inclusión de aluminio adicionado en la solución nutritiva, disminuye la producción de materia seca total en todos los cultivares de *L. perenne*. La disminución de la producción de materia seca total con el aumento de la concentración de Al en solución, ha sido señalado por otros investigadores (FOY *et al.*, 1978; ROY *et al.*, 1988; MARSCHNER, 1995; WHEELER y DODD, 1995; PONCE, 1999 y RADIC, 2001).

En el Cuadro 16 se puede observar una situación similar a la del Cuadro 10 (producción de MS aérea), ya que hay diferencias de producción de MS entre los cultivares en el primer tratamiento con Al adicionado (70 μMol Al/L), que al igual que en producción de MS aérea, produce una baja en la producción de MS total para el cultivar Pastoral. Los cultivares Quartet, Kingston y Nui presentan una reducción de producción de MS total intermedia entre 0 y 70

$\mu\text{Mol Al/L}$  y los cultivares Aries y Yatsyn 1 mantienen la producción de MS total, al compararlos con el tratamiento sin Al adicionado. Lo anterior se debe a que, en general, la producción de MS total está dominada por la producción de MS aérea.

**CUADRO 16. Producción promedio de materia seca total (g/jarra) en los seis cultivares de *Lolium perenne* L.**

Tratamientos	Producción promedio de materia seca total ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)		
	Aries	Kingston	Nui
0 $\mu\text{mol Al/L}$	9.38 $\pm$ 2.62 a	9.63 $\pm$ 3.52 a	10.00 $\pm$ 2.51 a
70 $\mu\text{mol Al/L}$	9.15 $\pm$ 1.40 a	8.49 $\pm$ 2.12 a b	7.29 $\pm$ 0.91 a b
140 $\mu\text{mol Al/L}$	5.03 $\pm$ 1.12 b	4.60 $\pm$ 1.42 b c	4.62 $\pm$ 1.19 b c
280 $\mu\text{mol Al/L}$	4.85 $\pm$ 1.00 b	3.87 $\pm$ 1.78 c	5.60 $\pm$ 0.71 b c
560 $\mu\text{mol Al/L}$	4.93 $\pm$ 1.29 b	5.67 $\pm$ 0.70 a b c	4.71 $\pm$ 2.34 b c
1120 $\mu\text{mol Al/L}$	3.63 $\pm$ 1.61 b	3.18 $\pm$ 1.65 c	3.94 $\pm$ 1.04 c
	Pastoral	Quartet	Yatsyn 1
0 $\mu\text{mol Al/L}$	11.33 $\pm$ 1.74 a	10.39 $\pm$ 2.43 a	9.82 $\pm$ 1.59 a b
70 $\mu\text{mol Al/L}$	6.92 $\pm$ 2.39 b	7.07 $\pm$ 1.49 a b	10.69 $\pm$ 4.06 a
140 $\mu\text{mol Al/L}$	5.23 $\pm$ 0.39 b c	5.22 $\pm$ 2.17 b c	6.34 $\pm$ 1.59 b c
280 $\mu\text{mol Al/L}$	4.03 $\pm$ 0.77 b c	3.00 $\pm$ 1.50 c	6.18 $\pm$ 1.57 b c
560 $\mu\text{mol Al/L}$	3.37 $\pm$ 1.70 c	3.34 $\pm$ 1.75 c	7.10 $\pm$ 1.48 a b c
1120 $\mu\text{mol Al/L}$	3.46 $\pm$ 1.68 c	3.33 $\pm$ 1.86 c	4.23 $\pm$ 1.21 c

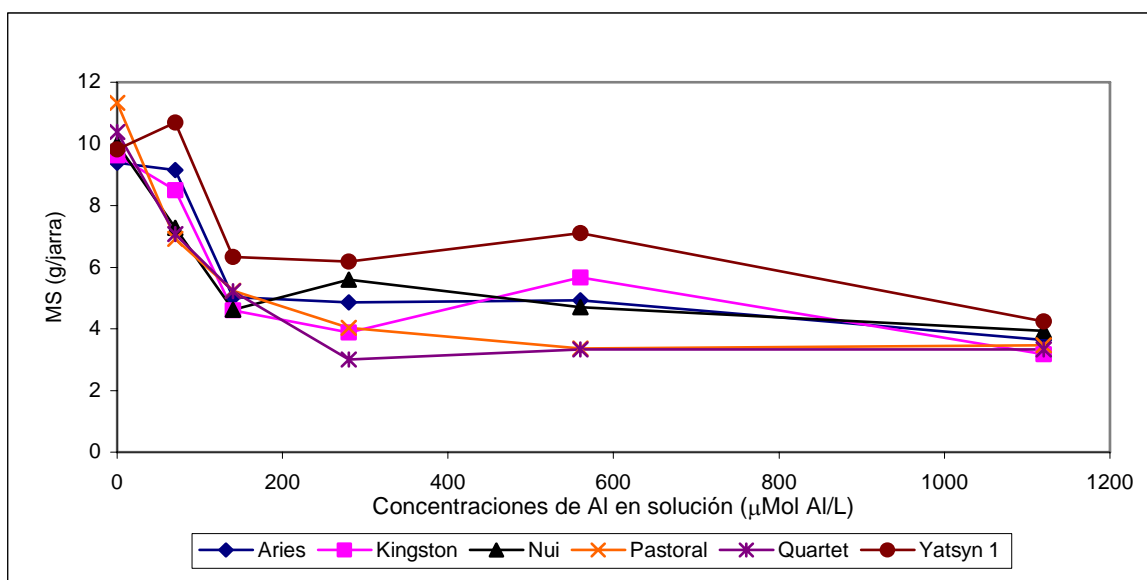
Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0.05$ , TUKEY).

El cultivar Yatsyn 1, al igual que en la producción de MS aérea y radical, presenta una mayor acumulación de MS (g/jarra) en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Trabajos de investigación anteriores a éste, realizados por PONCE (1999), con el cultivar Yatsyn 1 y RADIC (2001), con el cultivar Anita, presentaron una mayor producción de MS con bajas dosis de Al incorporadas a la solución nutritiva (50 y 70.4  $\mu\text{Mol Al/L}$  respectivamente) y al igual que en este trabajo, no fueron estadísticamente significativas. Como se ha sugerido anteriormente, en los resultados de producción de MS aérea y radical, esto puede deberse al efecto benéfico que producen bajas concentraciones de Al, señalado por ROY *et al.* (1988) y más específicamente, al efecto estimulador del crecimiento

producido por bajas concentraciones de Al en especies tolerantes a éste, señalado por Foy (1983), citado por MARSCHNER (1995).

La comparación múltiple de promedios, produjo dos grupos de promedios homogéneos para el cultivar Aries y tres grupos de promedios homogéneos para los cultivares Kingston, Nui, Pastoral, Quartet y Yatsyn 1. Para todos los cultivares el tercer grupo de promedios homogéneos se observa en el tratamiento 140  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Sin embargo, en los cultivares Kingston y Quartet se diferencia del grupo anterior en el tratamiento 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ , el cultivar Pastoral en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$  y los cultivares Nui y Yatsyn 1 en el tratamiento 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ .

En la Figura 8 se puede observar que los cultivares Yatsyn 1 y Kingston, presentan un incremento de la producción de MS total en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Estos aumentos de producción de MS total, no son estadísticamente significativos, pero a la vez no se diferencian de los otros grupos de promedios formados por la prueba de Tukey (Cuadro 16).



**FIGURA 8. Producción de materia seca total (g/jarra) en los seis cultivares.**

En el Cuadro 16 y la Figura 8 se puede observar que los cultivares tetraploides Pastoral y Quartet presentaron la mayor producción de MS total en el tratamiento 0  $\mu\text{Mol Al/L}$ , al compararlos con la producción de los otros cultivares. Sin embargo, la producción disminuye en los tratamientos con Al, presentando producciones de MS menores que los cultivares diploides, Pastoral en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$  y Quartet en los tratamientos 280  $\mu\text{Mol Al/L}$  y 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Esto sugiere que los cultivares tetraploides producen más MS en ausencia de Al tóxico en la solución nutritiva, pero a la vez, son mayormente afectados en condiciones de toxicidad de Al, al compararlos con los cultivares diploides.

En el Cuadro 17 se presentan los resultados de producción de MS total de los cultivares en relación a las concentraciones de Al aplicadas a la solución nutritiva.

**CUADRO 17. Producción de MS total promedio (g/jarra) de los seis cultivares por tratamiento.**

Tratamientos	Producción de MS total promedio ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)
0 $\mu\text{Mol Al/L}$	10.09 $\pm$ 0.70 a
70 $\mu\text{Mol Al/L}$	8.27 $\pm$ 1.48 b
140 $\mu\text{Mol Al/L}$	5.18 $\pm$ 0.64 c
280 $\mu\text{Mol Al/L}$	4.59 $\pm$ 1.18 c d
560 $\mu\text{Mol Al/L}$	4.86 $\pm$ 1.43 c d
1120 $\mu\text{Mol Al/L}$	3.63 $\pm$ 0.39 d

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

Los resultados muestran que a medida que aumenta la concentración de Al en solución, se produce una disminución significativa de la producción de MS total, entre los tratamientos 0, 70 y 140  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Posterior al tratamiento 140  $\mu\text{Mol Al/L}$ , la reducción de la producción de MS es de menor intensidad, diferenciándose solamente el tratamiento 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ .



En el Cuadro 18, se observa la comparación múltiple de promedios de la producción de MS total, entre cultivares.

**CUADRO 18. Producción de MS total promedio (g/jarra) de los seis tratamientos por cultivar.**

Cultivares	Producción de MS total promedio ( $\pm$ d.e.) (g/jarra)	
Yatsyn 1	7.395 $\pm$ 2.43	a
Aries	6.164 $\pm$ 2.46	a b
Nui	6.026 $\pm$ 2.26	a b
Kingston	5.908 $\pm$ 2.60	b
Pastoral	5.723 $\pm$ 3.05	b
Quartet	5.390 $\pm$ 2.90	b

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

Los resultados del Cuadro 18 muestran que el cultivar Yatsyn 1 presenta la mayor producción de MS total, diferenciándose estadísticamente de los cultivares Kingston Pastoral y Quartet. Los cultivares Aries y Nui se encuentran en un nivel intermedio de producción de MS total. Dentro del grupo de promedios formado por los cultivares Aries, Nui, Kingston, Pastoral y Quartet, se observa que los cultivares tetraploides Quartet y Pastoral producen menor cantidad de MS total.

4.3.1.4 Análisis de regresión entre la concentración de aluminio en solución y la materia seca. El análisis de regresión entre las variables de aluminio en solución ( $\mu\text{Mol/L}$ ) y materia seca (g/jarra) se realizó en función del modelo cuadrático inverso para los parámetros de materia seca aérea, radical y total.

$$\text{Modelo cuadrático inverso: } Y = A + B/X + C/X^2 \quad (4.1)$$

Los coeficientes de regresión y determinación para producción de materia seca aérea, radical y total se presentan en el Cuadro 19.

Se utilizó una sola ecuación para ajustar los datos de producción de materia seca radical, aérea y total, en relación al aluminio aplicado en solución. Según RADIC (2001), al ajustar una ecuación particular a cada cultivar evaluado produce mejores coeficientes de determinación, sin embargo la posibilidad de compararlos aumenta al ajustar la misma ecuación para todos los cultivares.

**CUADRO 19. Coeficientes de regresión y determinación para producción de materia seca aérea, radical y total.**

Cultivar	Parámetros de la ecuación ajustada			R <sup>2</sup>
	A	B	C	
	Materia seca aérea			
Aries	1.912	561.2	-11260	0.8934
Kingston	2.202	439.2	-7894	0.8035
Nui	2.703	320.5	-4394	0.9246
Pastoral	1.767	399.4	-5439	0.9907
Quartet	1.269	460.8	-7442	0.9744
Yatsyn 1	3.082	629.4	-13610	0.8095
	Materia seca radical			
Aries	1.190	77.61	-1648	0.7815
Kingston	0.8975	98.14	-1992	0.7524
Nui	1.202	12.17	-135.1	0.3249
Pastoral	1.013	57.41	-648.1	0.9431
Quartet	1.080	60.58	-832.6	0.9154
Yatsyn 1	1.249	60.47	-1340	0.4290
	Materia seca total			
Aries	3.096	639.9	-12940	0.8870
Kingston	3.095	537.7	-9888	0.8101
Nui	3.906	332.7	-4529	0.9220
Pastoral	2.779	457.0	-6090	0.9967
Quartet	2.352	521.2	-8273	0.9694
Yatsyn 1	4.329	689.8	-14950	0.7811

Los resultados de los análisis de regresión y las curvas de regresión de MS aérea, MS radical y MS total se presentan entre los anexos 5 y 25.

En el Cuadro 19 se observa que los coeficientes de determinación de MS aérea son mayores al 80.3 % para todos los cultivares. Los cultivares Nui Pastoral y Quartet, se ajustaron mejor al modelo cuadrático inverso con coeficientes de determinación superiores al 92.4 %. Los cultivares Aries, Yatsyn 1 y Kingston, presentan coeficientes de determinación menores, lo que se debe a que los cultivares Aries y Yatsyn 1, no disminuyen la producción de MS aérea en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ , además en los cultivares Yatsyn 1 y Kingston hay un aumento de la producción de MS en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ , al compararlo con el tratamiento anterior. En el cultivar Aries se observa una mantención de la producción de MS en el mismo tratamiento.

En la producción de MS radical, el modelo ajustado produce coeficientes de determinación inferiores a los observados en MS aérea. Los cultivares tetraploides Quartet y Pastoral presentan coeficientes de determinación superiores al 91.5 %, siendo los que mejor se ajustan a la curva. Los cultivares Aries y Kingston presentan coeficientes de determinación entre 75 y 78 % y los cultivares Nui y Yatsyn 1 presentan coeficientes de determinación bajos (32.4 y 42.9 % respectivamente). Lo anterior se debe a que los cultivares Aries, Nui y Yatsyn 1, no presentan disminución significativa de la producción de MS radical entre los tratamientos, lo que indica que la producción de MS radical no disminuye, a medida que se adiciona Al a la solución nutritiva, por lo que no se ajustan satisfactoriamente al modelo cuadrático inverso. Esta situación es contraria a la observada con los cultivares Kingston, Quartet y Pastoral, siendo los cultivares tetraploides, más sensibles que el cultivar Kingston.

Los resultados de regresión de producción de materia seca total, son similares a los de MS aérea, ya que como se ha argumentado anteriormente, está dominada por la producción de biomasa aérea, sobre la producción radical. Los coeficientes de determinación son superiores a 78.1 %, los cultivares tetraploides Pastoral y Quartet presentan mayores coeficientes de determinación (sobre 96.9%).

En relación a las ecuaciones ajustadas para producción de materia seca aérea, radical y total, se utilizaron promedios de los datos debido a que las ecuaciones fueron una herramienta utilizada para describir el comportamiento de los cultivares de *Lolium perenne* L., a través de los distintos tratamientos de aluminio en solución y no son utilizadas como una herramienta de predicción.

**4.3.2 Concentración de aluminio de los cultivares de *Lolium perenne* L.** A continuación, se presentan los resultados de la concentración de aluminio (mg/kg) de la parte aérea y radical de los cultivares de ballica perenne.

4.3.2.1 Concentración de Al en la parte aérea. En el Cuadro 20 se observan los resultados de concentración de aluminio en la parte aérea de los cultivares de *Lolium perenne* L.

Todos los cultivares evaluados presentaron diferencias significativas. Esto indica que hay un incremento en la concentración de Al aéreo a medida que aumenta la concentración de Al en solución, efecto observado también en trabajos similares realizados por PONCE (1999) y RADIC (2001). Los cultivares Pastoral, Quartet y Kingston presentan dos grupos de promedios homogéneos, los cultivares Nui y Yatsyn 1 presentan tres grupos de promedios homogéneos y el cultivar Aries presenta cuatro grupos de promedios homogéneos.

**CUADRO 20. Concentración promedio de aluminio en la parte aérea (mg/kg) en los seis cultivares de ballica perenne.**

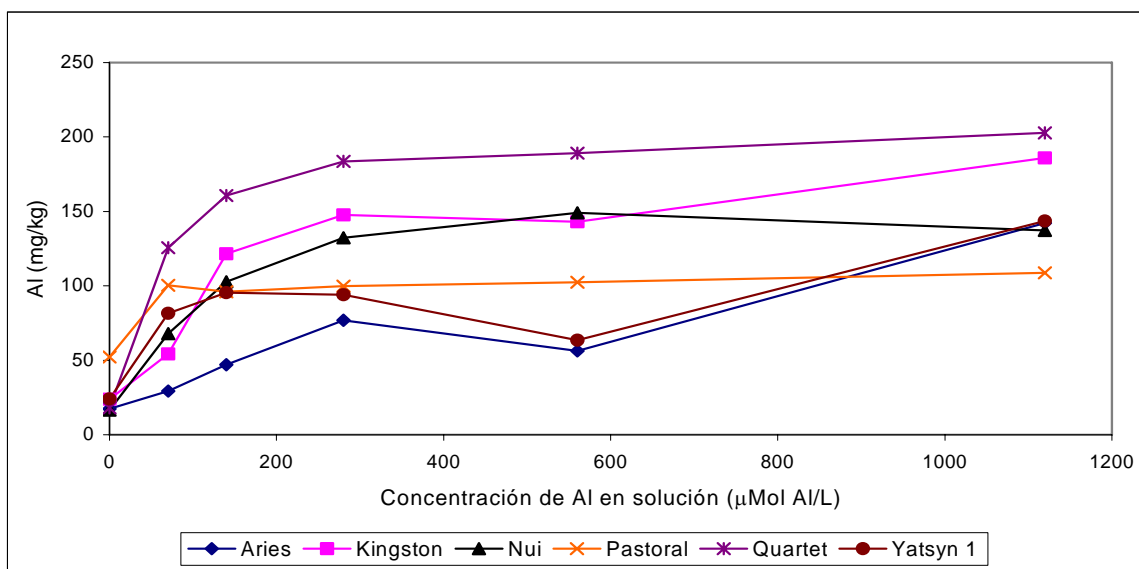
Tratamientos	Concentración de Al en la parte aérea ( $\pm$ d.e.) (mg/kg)		
	Aries	Kingston	Nui
0 $\mu$ mol Al/L	17.34 $\pm$ 2.17 a	23.76 $\pm$ 8.68 a	16.48 $\pm$ 6.85 a
70 $\mu$ mol Al/L	29.43 $\pm$ 5.25 b	54.21 $\pm$ 30.92 a	67.92 $\pm$ 21.92 b
140 $\mu$ mol Al/L	46.86 $\pm$ 9.91 b c	121.58 $\pm$ 34.35 b	102.69 $\pm$ 25.25 b c
280 $\mu$ mol Al/L	76.71 $\pm$ 37.47 c	147.70 $\pm$ 28.75 b	132.36 $\pm$ 18.06 c
560 $\mu$ mol Al/L	56.15 $\pm$ 14.36 c	142.97 $\pm$ 36.98 b	149.07 $\pm$ 76.83 c
1120 $\mu$ mol Al/L	142.22 $\pm$ 14.11 d	185.91 $\pm$ 128.22 b	137.19 $\pm$ 24.58 c
	Pastoral	Quartet	Yatsyn 1
0 $\mu$ mol Al/L	52.20 $\pm$ 13.28 a	18.06 $\pm$ 5.85 a	24.12 $\pm$ 7.72 a
70 $\mu$ mol Al/L	100.28 $\pm$ 19.68 b	125.49 $\pm$ 56.44 a b	81.39 $\pm$ 19.16 b
140 $\mu$ mol Al/L	96.00 $\pm$ 18.83 b	160.65 $\pm$ 24.82 b	95.28 $\pm$ 10.64 b
280 $\mu$ mol Al/L	99.66 $\pm$ 19.09 b	183.48 $\pm$ 34.49 b	93.87 $\pm$ 20.23 b
560 $\mu$ mol Al/L	102.44 $\pm$ 47.92 b	189.12 $\pm$ 91.65 b	63.41 $\pm$ 26.17 b
1120 $\mu$ mol Al/L	108.81 $\pm$ 55.31 b	202.60 $\pm$ 79.64 b	143.58 $\pm$ 17.87 c

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

En el tratamiento 70  $\mu$ Mol Al/L se observa un aumento significativo de la concentración de Al aéreo para los cultivares Aries, Nui, Pastoral y Yatsyn 1. El cultivar Kingston mantiene la concentración de Al aéreo y el cultivar Quartet aumenta su concentración de Al de manera no significativa.

En los cultivares tetraploides Quartet y Pastoral no se observan aumentos significativos de la concentración de Al aéreo entre los tratamientos 70 y 1120  $\mu$ mol Al/L. Este comportamiento se observa también en el cultivar Kingston, entre los tratamientos 140 y 1120  $\mu$ mol Al/L. Los cultivares Aries, Nui y Yatsyn 1 en cambio presentan aumentos significativos de la concentración de Al aéreo, posteriores al efecto inicial observado en el tratamiento 70  $\mu$ mol Al/L. El cultivar Aries aumenta significativamente en los tratamientos 280 y 1120  $\mu$ mol Al/L, el cultivar Nui en el tratamiento 280  $\mu$ mol Al/L y el cultivar Yatsyn 1 en el tratamiento 1120  $\mu$ mol Al/L.

Los cultivares Yatsyn 1, Aries y Kingston presentan una disminución no significativa de la concentración de Al aéreo en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ , (ver Figura 9).



**FIGURA 9. Concentración de Al (mg/kg) en la parte aérea en los seis cultivares.**

Aun cuando se han señalado leves disminuciones de la concentración de Al de los cultivares en los tratamientos intermedios, los análisis de varianza y prueba de Tukey ( $p > 0.05$ ) demuestran que todos los cultivares aumentan su concentración de Al, a medida que aumentan los niveles de Al en la solución nutritiva.

Los resultados de la concentración de Al aéreo en relación a la concentración de Al aplicado en solución se presentan en el Cuadro 21. Este muestra que existen diferencias significativas entre los tratamientos, separándolos en cuatro grupos de promedios homogéneos.

**CUADRO 21. Concentración promedio de Al aéreo (mg/kg) de los tratamientos aplicados en la solución nutritiva.**

Tratamientos	Concentración de Al aéreo promedio ( $\pm$ d.e.) (mg/kg)
0 $\mu$ Mol Al/L	25.33 $\pm$ 13.57 a
70 $\mu$ Mol Al/L	76.45 $\pm$ 13.01 b
140 $\mu$ Mol Al/L	103.84 $\pm$ 14.46 c
280 $\mu$ Mol Al/L	122.30 $\pm$ 15.18 c d
560 $\mu$ Mol Al/L	117.19 $\pm$ 11.69 c
1120 $\mu$ Mol Al/L	153.39 $\pm$ 42.20 c d

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

Existe un aumento significativo de la concentración de Al aéreo en los tratamientos 70  $\mu$ Mol Al/L y 140  $\mu$ Mol Al/L. Entre los tratamientos 140 y 1120  $\mu$ Mol Al/L, no hay diferencias significativas. Se observa además una disminución no significativa en la concentración de Al en el tratamiento 560  $\mu$ Mol Al/L, influenciado por los cultivares Aries, Kingston y Yatsyn 1.

La concentración de Al aéreo promedio de cada cultivar en los seis tratamientos de Al aplicados, se presenta en el Cuadro 22.

**CUADRO 22. Concentración promedio de Al aéreo (mg/kg) de los cultivares.**

Cultivar	Concentración de Al aéreo promedio ( $\pm$ d.e.) (mg/kg)
Aries	61.45 $\pm$ 44.65 a
Yatsyn 1	83.61 $\pm$ 39.47 b
Pastoral	93.23 $\pm$ 20.54 b
Nui	100.95 $\pm$ 50.68 b c
Kingston	112.68 $\pm$ 61.50 b c
Quartet	146.56 $\pm$ 68.51 c

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

El cultivar Aries presenta la menor concentración de Al aéreo, diferenciándose estadísticamente de los demás cultivares. Los cultivares Nui y Kingston presentan concentraciones de Al aéreo mayores que los cultivares



Yatsyn 1 y Pastoral, sin embargo no son estadísticamente diferentes de éstos. El cultivar Quartet presenta la mayor concentración de Al aéreo, diferenciándose de los cultivares Aries, Yatsyn 1 y Pastoral.

4.3.2.2 Concentración de Al en la parte radical. En el Cuadro 23 se presenta la concentración de aluminio radical. Los cultivares presentaron, en todos los casos, una mayor concentración de aluminio en la parte radical al compararlos con la concentración de Al de la parte aérea. Esto concuerda con resultados de RENGEL y ROBINSON (1989), PONCE (1999) y RADIC (2001), que indican que la mayor parte del aluminio permanece en las raíces.

**CUADRO 23. Concentración promedio de aluminio en la parte radical (mg/kg) en los seis cultivares de ballica perenne.**

Tratamientos	Concentración de Al promedio en la parte radical ( $\pm$ d.e.) (mg/kg)		
	Aries	Kingston	Nui
0 $\mu$ mol /L	97 $\pm$ 16 a	129 $\pm$ 49 a	125 $\pm$ 19 a
70 $\mu$ mol /L	2165 $\pm$ 719 b c	1497 $\pm$ 843 b	2257 $\pm$ 1350 b c
140 $\mu$ mol /L	1640 $\pm$ 306 a b c	1365 $\pm$ 453 b	1904 $\pm$ 870 b c
280 $\mu$ mol /L	1380 $\pm$ 739 a b	1280 $\pm$ 152 b	1023 $\pm$ 262 b
560 $\mu$ mol /L	2993 $\pm$ 1168 c	3065 $\pm$ 1207 b	3313 $\pm$ 752 c
1120 $\mu$ mol /L	2556 $\pm$ 1173 b c	3713 $\pm$ 3524 b	3039 $\pm$ 653 c
	Pastoral	Quartet	Yatsyn 1
0 $\mu$ mol /L	90 $\pm$ 28 a	82 $\pm$ 19 a	105 $\pm$ 23 a
70 $\mu$ mol /L	1144 $\pm$ 567 b	1066 $\pm$ 408 b	1581 $\pm$ 431 b
140 $\mu$ mol /L	1254 $\pm$ 457 b c	1016 $\pm$ 605 b	1570 $\pm$ 732 b
280 $\mu$ mol /L	998 $\pm$ 249 b	1165 $\pm$ 374 b c	1038 $\pm$ 303 a b
560 $\mu$ mol /L	3237 $\pm$ 1720 c	3042 $\pm$ 1926 d	2962 $\pm$ 895 c
1120 $\mu$ mol /L	2869 $\pm$ 1494 b c	2391 $\pm$ 701 c d	2780 $\pm$ 662 c

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

Las diferencias en concentración de aluminio radical en los cultivares evaluados fueron estadísticamente significativas para cada cultivar ante los distintos tratamientos de Al en solución.

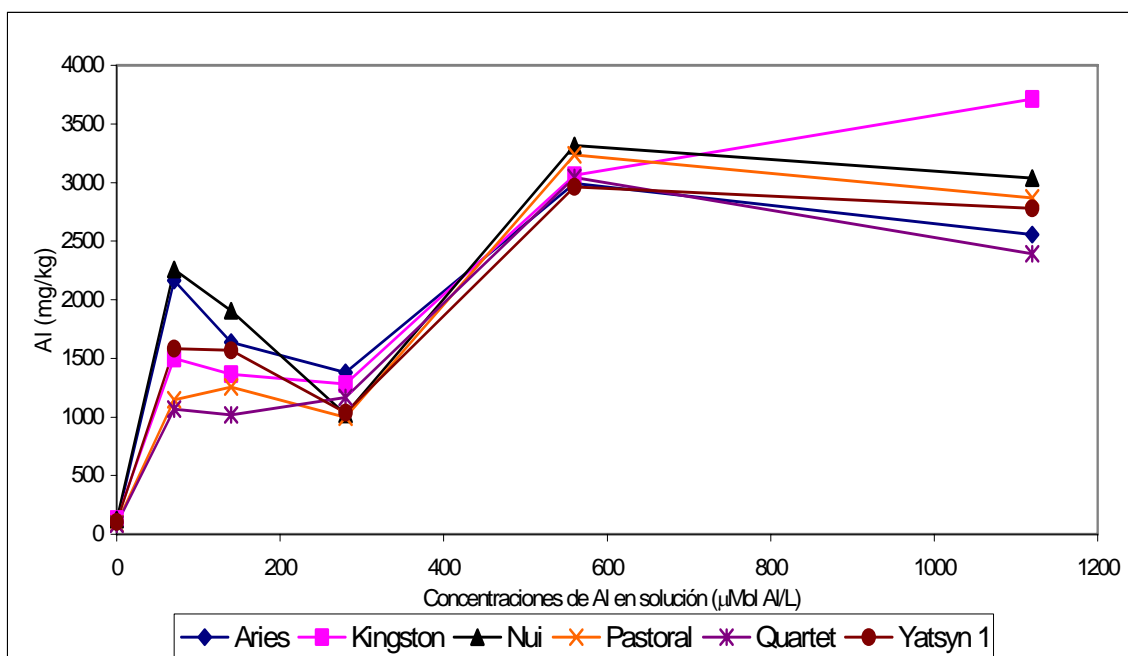
Los grupos homogéneos formados por la comparación múltiple de promedios ( $p < 0.05$ ) de concentración de Al radical, determinó tres grupos de promedios homogéneos para los cultivares Aries, Nui, Pastoral y Yatsyn 1, cuatro grupos de promedios para el cultivar Quartet y dos grupos de promedios para el cultivar Kingston.

Entre los tratamientos 0 y 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ , todos los cultivares presentan diferencias estadísticamente significativas en la concentración de Al radical. Esta diferencia en la concentración de Al radical, es el primer efecto producido por niveles crecientes de Al en solución. En ese tratamiento los cultivares diploides (Aries, Kingston, Nui y Yatsyn 1) presentan mayores concentraciones de Al que los cultivares tetraploides (Pastoral y Quartet). Esto puede deberse a que los cultivares Aries, Yatsyn 1, Nui y Kingston mantienen o disminuyen de manera no significativa la producción de MS aérea, además los cultivares Aries, Nui y Yatsyn 1, no afectan su producción de MS radical. El hecho de que no detengan su desarrollo en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$  sugiere, que al ser plantas más desarrolladas que los cultivares tetraploides, tienen tasas de transpiración mayores, lo que produce una mayor absorción de nutrientes y Al por mecanismos de absorción pasivos, debido principalmente al flujo de masa, producido por la transpiración.

En los tratamientos siguientes (140 y 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ ) en todos los cultivares, se observan concentraciones de Al menores a las del tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$  (ver Figura 10). Sin embargo, esta baja en la concentración de Al no es estadísticamente significativa, para los cultivares. La disminución de la concentración de Al radical se puede deber a que las plantas en general reducen su producción de MS total entre los tratamientos 70 y 140  $\mu\text{Mol Al/L}$  (Cuadro 17), disminuyendo también su transpiración y absorción de nutrientes y Al.

Posteriormente en todos los cultivares se observa un importante aumento en la concentración de Al en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ , llegando a concentraciones de Al que fluctúan entre 2961 y 3313 mg/kg. Este aumento de la concentración de Al no fue estadísticamente significativo para el cultivar Kingston.

Entre los tratamientos 560 y 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ , se mantienen los altos niveles de concentración de Al radical. Aun cuando se observan leves disminuciones en la concentración de Al; estas no fueron estadísticamente significativa para los cultivares (Figura 10).



**FIGURA 10. Concentración de Al radical (mg/Kg) en los seis cultivares.**

Los resultados de concentración de Al radical en relación a la concentración de Al aplicado a la solución se observan en el Cuadro 24. Estos muestran que existen diferencias significativas entre los tratamientos, separándolos en tres grupos de promedios homogéneos .

**CUADRO 24. Concentración promedio de Al radical (mg/kg) de los tratamientos aplicados en la solución nutritiva.**

Tratamientos	Concentración de Al radical promedio ( $\pm$ d.e.) (mg/kg)
0 $\mu$ Mol Al/L	104.98 $\pm$ 18.92 a
70 $\mu$ Mol Al/L	1618.35 $\pm$ 500.41 b
140 $\mu$ Mol Al/L	1458.34 $\pm$ 312.88 b
280 $\mu$ Mol Al/L	1147.25 $\pm$ 156.15 b
560 $\mu$ Mol Al/L	3101.74 $\pm$ 140.93 c
1120 $\mu$ Mol Al/L	2891.25 $\pm$ 463.35 c

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0.05$ , TUKEY).

Los resultados de concentración de Al muestran que existe diferencia significativa entre el tratamiento 0  $\mu$ Mol Al/L y los tratamientos 70, 140 y 280  $\mu$ Mol Al/L, los cuales a su vez presentan diferencias significativas con los tratamientos 560 y 1120  $\mu$ Mol Al/L. Es posible observar que desde el tratamiento 70  $\mu$ Mol Al/L hasta el tratamiento 280  $\mu$ Mol Al/L existe una disminución de la concentración de Al de los cultivares, influenciado mayoritariamente por los cultivares Aries, Nui y Yatsyn 1.

La concentración de Al radical promedio de cada cultivar en los seis tratamientos de Al aplicados, se presenta en el Cuadro 25.

**CUADRO 25. Concentración promedio de Al radical (mg/kg) de los cultivares.**

Cultivar	Concentración de Al radical promedio ( $\pm$ d.e.) (mg/kg)
Quartet	1460 $\pm$ 1068 a
Pastoral	1598 $\pm$ 1205 a b
Yatsyn 1	1673 $\pm$ 1074 a b
Aries	1805 $\pm$ 1023 a b
Kingston	1842 $\pm$ 1311 a b
Nui	1944 $\pm$ 1211 b

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0.05$ , TUKEY).

La comparación múltiple de promedios produjo dos grupos de promedios, homogéneos. Solo se diferencian estadísticamente el cultivar Quartet del cultivar Nui, los demás cultivares están en un nivel intermedio de concentración de Al radical.

4.3.2.3 Análisis de regresión entre la concentración de aluminio en solución y la concentración de aluminio aéreo y radical. El análisis de regresión entre las variables de aluminio en solución ( $\mu\text{Mol Al/L}$ ) y concentración de aluminio aéreo ( $\text{g/kg}$ ) se analizó en función de dos modelos, el modelo lineal inverso (4.2), para los cultivares Nui, Pastoral y Quartet, eligiéndose otra ecuación, el modelo cúbico (4.3) para los cultivares Aries, Kingston y Yatsyn 1. El análisis de regresión entre las variables de aluminio en solución ( $\mu\text{Mol/L}$ ) y concentración de aluminio radical ( $\text{mg/kg}$ ), se realizó transformando los datos en base a logaritmo y se utilizó un modelo exponencial (4.4). Esto, debido a que no fue posible ajustar ninguno de los modelos anteriores, como tampoco los utilizados por RADIC (2001) y PONCE (1999), en experimentos anteriores.

$$\text{Modelo lineal inverso: } Y = A + BX + C/X \quad (4.2)$$

$$\text{Modelo cúbico: } Y = A + BX + CX^2 + DX^3 \quad (4.3)$$

$$\text{Modelo exponencial: } Y = Y_{\text{max}} (1 - \exp(-KX)) \quad (4.4)$$

Los coeficientes de regresión y determinación para concentración de Al aéreo y radical se presentan en el Cuadro 26 y los resultados de los análisis de regresión y curvas de regresión de concentración de Al aéreo y radical se presentan entre los Anexos 26 y 39.

**CUADRO 26. Coeficientes de regresión y determinación para concentración de aluminio en la parte aérea y radical.**

Parámetros de la ecuación ajustada					
Cultivar	A	B	C	D	R <sup>2</sup>
Concentración de Al aéreo					
Aries	-0.710	0.4614	-0.0009	5.70e-7	0.9808
Kingston	-7.377	0.9548	-0.0017	9.00e-7	0.9753
Nui	120.1	0.0266	-3063	-	0.9026
Pastoral	107.5	0.0005	-1502	-	0.9545
Quartet	182.8	0.0227	-4678	-	0.9901
Yatsyn 1	14.83	0.7026	-0.0016	9.81e-7	0.9518
Concentración de Al radical					
	Ymax	K	-	-	
Aries	3.308	20.5000	-	-	0.9389
Kingston	3.276	0.03576	-	-	0.9023
Nui	3.318	0.03602	-	-	0.8761
Pastoral	3.217	0.03178	-	-	0.8853
Quartet	3.194	0.03155	-	-	0.8998
Yatsyn 1	3.271	0.03430	-	-	0.8983

La concentración de Al aéreo de los cultivares Aries, Yatsyn 1 y Kingston, se ajustan al modelo cúbico, con coeficientes de determinación superiores al 95.1 % y los cultivares Nui, Pastoral y Quartet se ajustan al modelo lineal inverso, con coeficientes de determinación superiores a 90.2 %. El ajuste de dos modelos diferentes, utilizados para concentración de Al aéreo, sugiere que hay un comportamiento distinto entre los cultivares Aries, Yatsyn 1 y Kingston (modelo cúbico) y los cultivares Nui, Quartet y Pastoral (Modelo lineal inverso), ya que los primeros presentan una disminución de la concentración de Al aéreo

en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Este comportamiento puede deberse a que en ese tratamiento los cultivares Aries, Yatsyn 1 y Kingston, mostraron un aumento no significativo de la producción de MS total, por lo que la concentración de Al aéreo se diluiría en una mayor cantidad de MS.

El modelo logarítmico ajustado a los cultivares en concentración de Al radical, presenta coeficientes de determinación superiores a 87 %. Debido al efecto observado en concentración de Al radical, no fue posible ajustar un modelo matemático a los datos sin transformarlos en base a log. Sin embargo, el efecto observado en los tratamientos iniciales (0 a 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ ) sugiere que los cultivares disminuyen el ingreso de concentraciones crecientes de Al hacia sus raíces, cuando se afecta la producción de MS. El importante aumento en la concentración de Al radical observado en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ , indicaría que este mecanismo de exclusión del estrés de Al, se ve sobrepasado por las altas concentraciones de Al en solución.

En relación a las ecuaciones ajustadas para concentración de Al aéreo y radical, al igual que en las ecuaciones ajustadas para MS, se utilizaron promedios de los datos debido a que las ecuaciones fueron una herramienta utilizada para describir el comportamiento de los cultivares de *Lolium perenne* L. través de los distintos tratamientos de aluminio en solución y no son utilizadas como una herramienta de predicción.

**4.3.3 Absorción de aluminio de los cultivares de *Lolium perenne* L.** La absorción de Al, resulta de la multiplicación de la producción de MS (g/jarra) por la concentración de Al (mg/kg), por lo que los resultados de absorción se presentan como mg de Al/jarra. A continuación, se presentan y se discuten los Cuadros correspondientes a la absorción de aluminio aéreo y radical de los cultivares de *Lolium perenne* L.

4.3.3.1 Absorción de Al en la parte aérea. En el Cuadro 27 se muestra la absorción de aluminio de la parte aérea.

**CUADRO 27. Absorción promedio de aluminio en la parte aérea (mg Al/jarra) en los seis cultivares de *Lolium perenne* L.**

Tratamientos		Absorción de Al promedio ( $\pm$ d.e.) parte aérea (mg/jarra)					
		Aries		Kingston		Nui	
0	$\mu\text{mol /L}$	0.133 $\pm$ 0.047	a	0.179 $\pm$ 0.080	a	0.144 $\pm$ 0.087	a
70	$\mu\text{mol /L}$	0.216 $\pm$ 0.064	a b	0.344 $\pm$ 0.209	a b	0.404 $\pm$ 0.139	b
140	$\mu\text{mol /L}$	0.169 $\pm$ 0.074	a b	0.441 $\pm$ 0.221	a b	0.351 $\pm$ 0.122	a b
280	$\mu\text{mol /L}$	0.266 $\pm$ 0.137	a b	0.388 $\pm$ 0.214	a b	0.545 $\pm$ 0.124	b
560	$\mu\text{mol /L}$	0.183 $\pm$ 0.044	a b	0.619 $\pm$ 0.092	b	0.443 $\pm$ 0.173	b
1120	$\mu\text{mol /L}$	0.355 $\pm$ 0.196	b	0.309 $\pm$ 0.171	a b	0.363 $\pm$ 0.099	a b
		Pastoral		Quartet		Yatsyn 1	
0	$\mu\text{mol /L}$	0.471 $\pm$ 0.127	a b	0.152 $\pm$ 0.085	a	0.197 $\pm$ 0.077	a
70	$\mu\text{mol /L}$	0.521 $\pm$ 0.119	a	0.697 $\pm$ 0.345	b	0.670 $\pm$ 0.212	b
140	$\mu\text{mol /L}$	0.364 $\pm$ 0.066	a b c	0.594 $\pm$ 0.255	b	0.495 $\pm$ 0.168	a b
280	$\mu\text{mol /L}$	0.271 $\pm$ 0.102	b c	0.347 $\pm$ 0.164	a b	0.445 $\pm$ 0.176	a b
560	$\mu\text{mol /L}$	0.199 $\pm$ 0.071	c	0.335 $\pm$ 0.162	a b	0.351 $\pm$ 0.163	a
1120	$\mu\text{mol /L}$	0.221 $\pm$ 0.118	c	0.360 $\pm$ 0.099	a b	0.438 $\pm$ 0.149	a b

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0,05$ , TUKEY).

Como se observa en el Cuadro 27, todos los cultivares presentan diferencias significativas entre los tratamientos. Los niveles más altos de absorción de Al aéreo se presentaron en el tratamiento 70  $\mu\text{mol Al/L}$ , para los cultivares Quartet, Yatsyn 1. Posterior al tratamiento 70  $\mu\text{mol Al/L}$ , en ambos cultivares disminuyen los niveles de absorción de Al, sin embargo esta disminución de la absorción de Al no es estadísticamente significativa, con excepción del tratamiento 560  $\mu\text{mol Al/L}$ , en Yatsyn 1. El cultivar Yatsyn 1 presentó la mayor producción de MS aérea, diferenciándose estadísticamente del cultivar Quartet (Cuadro 12). Además, el cultivar Yatsyn 1 presentó después de Aries, la menor concentración de Al aéreo, diferenciándose nuevamente del cultivar Quartet, que presentó la mayor concentración de Al aéreo (Cuadro 22). Esto demuestra que aun cuando los niveles de absorción



de Al aéreo, son similares para ambos cultivares, en el caso de Yatsyn 1 se debe a una mayor producción de MS aérea y bajas concentraciones de Al, caso contrario a lo observado en el cultivar Quartet.

El cultivar Pastoral presenta niveles de absorción similares entre los tratamientos 0 y 140  $\mu\text{Mol Al/L}$ , posterior a esto, la absorción de Al disminuye. El comportamiento de Pastoral se explica porque la concentración de Al aéreo, fue constante entre los tratamientos 70 y 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$  (Cuadro 20) pero la productividad decayó significativamente (Cuadro 10).

En el cultivar Aries se observa una menor absorción de Al aéreo, entre los tratamientos 0 y 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Además se observan diferencias estadísticamente significativas de absorción de Al, solo entre el tratamiento 0  $\mu\text{Mol Al/L}$  y el tratamiento 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ , estando los demás tratamientos en un nivel intermedio entre ambos. Esto se debe a que el cultivar Aries, presentó la menor concentración de Al aéreo (Cuadro 22) y una producción de MS aérea constante entre los tratamientos 140 y 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$  (Cuadro 10).

Los niveles de absorción de los cultivares Nui y Kingston son similares (alrededor de 0.38 mg/jarra de absorción en promedio). Ambos cultivares presentan un aumento constante de la concentración de Al a medida que aumenta el Al en solución (Cuadro 20), sin embargo el cultivar Nui presentó, en general, mayores producciones de MS que el cultivar Kingston (Cuadro 12). La mayor absorción de Al registrada se produce en el tratamiento 280  $\mu\text{Mol Al/L}$  en el cultivar Nui y en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$  en el cultivar Kingston.

4.3.3.2 Absorción de Al en la parte radical. El Cuadro 28 muestra la absorción de aluminio de la parte radical. El comportamiento observado en los cultivares en relación a la absorción de Al radical, es similar al observado en concentración de Al radical (Cuadro 20), en la que luego de un incremento en la

absorción de Al entre los tratamientos 0 y 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ , significativa para todos los cultivares, se observa una posterior disminución no significativa entre los tratamientos 70 y 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ .

En el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$  se produce un aumento significativo de la absorción de Al radical para los cultivares Aries, Kingston, Quartet y Yatsyn 1. Este aumento en la absorción no se demuestra estadísticamente para Nui y Pastoral.

**CUADRO 28. Absorción promedio de aluminio en la parte radical (mg/jarra) en los seis cultivares *Lolium perenne* L.**

		Absorción de Al promedio ( $\pm$ d.e.) parte radical (mg/jarra)		
Tratamientos		Aries	Kingston	Nui
0	$\mu\text{mol /L}$	0.178 $\pm$ 0.081 a	0.230 $\pm$ 0.084 a	0.181 $\pm$ 0.029 a
70	$\mu\text{mol /L}$	3.888 $\pm$ 0.931 b c	2.688 $\pm$ 1.297 b c	2.863 $\pm$ 1.576 b
140	$\mu\text{mol /L}$	2.391 $\pm$ 0.642 b c	1.423 $\pm$ 0.682 a b	2.226 $\pm$ 0.933 a b
280	$\mu\text{mol /L}$	1.773 $\pm$ 0.765 b	1.592 $\pm$ 0.577 a b	1.475 $\pm$ 0.377 a b
560	$\mu\text{mol /L}$	4.286 $\pm$ 0.651 c	3.561 $\pm$ 1.065 c	3.370 $\pm$ 1.672 b
1120	$\mu\text{mol /L}$	3.247 $\pm$ 1.954 b c	2.512 $\pm$ 0.647 b c	3.790 $\pm$ 2.176 b
		Pastoral	Quartet	Yatsyn 1
0	$\mu\text{mol /L}$	0.200 $\pm$ 0.087 a	0.171 $\pm$ 0.010 a	0.172 $\pm$ 0.025 a
70	$\mu\text{mol /L}$	1.602 $\pm$ 1.059 b	1.719 $\pm$ 0.011 b c	2.885 $\pm$ 1.216 b c
140	$\mu\text{mol /L}$	1.719 $\pm$ 0.455 b	1.450 $\pm$ 0.727 b c	1.663 $\pm$ 0.493 b
280	$\mu\text{mol /L}$	1.327 $\pm$ 0.186 b	1.090 $\pm$ 0.270 b	1.542 $\pm$ 0.194 b
560	$\mu\text{mol /L}$	2.909 $\pm$ 1.047 b	2.971 $\pm$ 1.334 c	4.666 $\pm$ 2.748 c
1120	$\mu\text{mol /L}$	2.560 $\pm$ 1.722 b	3.045 $\pm$ 2.022 c	3.239 $\pm$ 0.982 c

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ( $p < 0.05$ , TUKEY).

El cultivar Aries obtiene los mayores niveles de absorción en los tratamientos 70  $\mu\text{Mol Al/L}$  y 560  $\mu\text{Mol Al/L}$  (alrededor de 4 mg/jarra). Entre ambos tratamientos hay una disminución de la absorción de Al radical, llegando a un mínimo de 1.7 mg/jarra en el tratamiento 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Este comportamiento es similar al observado en su concentración de Al radical (Cuadro 23), ya que en los tratamientos 70 y 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ , Aries presentan las mayores concentraciones de Al y en el tratamiento 280  $\mu\text{Mol Al/L}$  la menor

concentración de Al (de los tratamientos que incluyen Al en la solución). La similitud se debe a que la producción de MS del cultivar Aries fue relativamente constante, sin presentar diferencias significativas en su producción de MS radical entre los tratamientos (Cuadro 13).

El comportamiento de absorción radical de Al entre tratamientos observada en el cultivar Aries, es similar al encontrado en los cultivares Nui y Yatsyn 1. Esto se debe a que la producción de MS radical de los cultivares Nui y Yatsyn 1 presentan disminuciones no significativas, al igual que Aries, por lo que se observa gran similitud entre el comportamiento de absorción y concentración de Al radical (Cuadros 13 y 28).

En el cultivar Kingston, luego de un aumento de la absorción de Al radical en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ , presenta una disminución de la absorción, siendo su punto más bajo de absorción de Al radical 1.42 mg/jarra en el tratamiento 140  $\mu\text{Mol Al/L}$ , debido a una importante disminución de la producción de MS radical observada en este tratamiento (Cuadro 13). Posteriormente la absorción de Al radical aumenta significativamente en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ , al igual que los demás cultivares.

El cultivar Pastoral, presenta un aumento significativo de la absorción radical en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ , la absorción de Al radical se mantiene constante entre los tratamientos 70 y 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ . El cultivar Quartet aumenta su absorción radical de Al, entre los tratamientos 0 y 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ , en el tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ , se produce un segundo aumento significativo de la absorción de Al, igual al observado en los cultivares Aries, Kingston, y Yatsyn1.

La absorción de Al es un parámetro integrado por producción de MS y concentración de Al. Aun cuando dos cultivares puedan tener niveles de

absorción similares, estos pueden estar dominados por concentración de Al o por producción de MS, como se observó en absorción de Al aéreo de los cultivares Yatsyn 1 y Quartet. La absorción radical, claramente está dominada por la concentración de Al radical, debido a la gran similitud de los cultivares en la producción de MS radical (Cuadro 15). Esto produjo que el comportamiento de concentración de Al radical (Cuadro 23), sea muy parecido al de absorción de Al radical (Cuadro 28).

#### **4.4 Adaptación de los cultivares a la presencia de aluminio tóxico en solución.**

Los resultados de producción de materia seca aérea, materia seca radical, concentración de Al aéreo y concentración de Al radical, presentados anteriormente, se analizarán en conjunto para describir el comportamiento biológico de los cultivares estudiados y determinar si estos presentan diferentes niveles de adaptación a la presencia de aluminio tóxico en solución.

Existieron dos puntos de incremento en la concentración de Al radical en todos los cultivares evaluados (tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$  y tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ , Cuadros 23 y 24), sin embargo la producción de materia seca de ellos varió de acuerdo con el cultivar. Los cultivares Aries, Nui y Yatsyn 1, mantuvieron la producción de MS radical en todos los tratamientos de Al aplicados, en tanto que los cultivares Quartet, Pastoral y Kingston, disminuyeron su productividad. Este diferente comportamiento frente a similares concentraciones de Al radical sería indicativo de una primera diferenciación en resistencia al Al tóxico en solución. Así, se presentaron diferencias dentro de los cultivares en productividad de MS radical a la misma dosis de Al aplicado. El cultivar Kingston disminuyó significativamente su producción de MS radical en 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ , el cultivar Pastoral en 560  $\mu\text{Mol Al/L}$  y el cultivar Quartet en 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Esto sugiere que los cultivares Yatsyn1, Aries y Nui son más

resistentes al efecto del Al tóxico en solución que los cultivares Kingston, Pastoral y Quartet y los cultivares tetraploides Quartet y Pastoral serían más sensibles que el cultivar Kingston.

Por su parte, la producción de MS aérea disminuyó significativamente para todos los cultivares, a medida que aumentó la concentración de Al aéreo. El cultivar Yatsyn 1, se diferenció de todos los otros cultivares, ya que presentó una mayor producción de MS aérea en todos los tratamientos y se observaron potenciales efectos benéficos en la producción, con bajas dosis de Al aplicado que no fueron estadísticamente significativos. Además, la disminución de MS aérea entre los tratamientos, solo fue significativa en el tratamiento que contenía la mayor dosis de Al adicionado ( $1120 \mu\text{Mol Al/L}$ ), en el cual, además, la concentración de Al aéreo superó los  $100 \text{ mg/kg}$ . En un segundo grupo se presenta el cultivar Aries, el cual luego de mantener inicialmente la productividad, presentó una disminución significativa de la producción de MS aérea en el tratamiento  $140 \mu\text{Mol Al/L}$ , posteriormente la productividad no disminuyó de manera significativa y al igual que en el cultivar Yatsyn 1, la concentración de Al aéreo superó los  $100 \text{ mg/kg}$ , solo en el último tratamiento, con la dosis más alta de aluminio aplicado. El cultivar Nui, en cambio, aun cuando no afectó inicialmente (en la dosis de  $70 \mu\text{Mol Al/L}$ ) su producción de MS aérea, presentó dos puntos de disminución en productividad ( $140$  y  $1120 \mu\text{Mol Al/L}$ ) y a diferencia de los cultivares Yatsyn 1 y Aries, la concentración de Al aéreo supera los  $100 \text{ mg/kg}$  en tratamiento con menores dosis de Al aplicado ( $140 \mu\text{Mol Al/L}$ ). Posteriormente, los cultivares Kingston, Pastoral y Quartet, parecen más afectados por la adición de Al. Ellos, también, presentaron dos puntos de disminución significativa de la productividad, pero en tratamientos con menores adiciones de Al. Los cultivares Kingston y Quartet, en los tratamientos  $140 \mu\text{Mol Al/L}$  y  $280 \mu\text{Mol Al/L}$  y el cultivar Pastoral, en los tratamientos  $70$  y  $280 \mu\text{Mol Al/L}$ . Además, la concentración de Al aéreo del

cultivar Kingston, supera los 100 mg/kg, en tratamiento con mayores dosis de Al aplicado (140  $\mu\text{Mol Al/L}$ ) que los cultivares Pastoral y Quartet (70  $\mu\text{Mol Al/L}$ ). Un efecto particular se observó en el cultivar Nui, el cual presentó una mayor producción de MS aérea que los cultivares Kingston, Pastoral y Quartet, a pesar de tener concentración de Al aéreo sobre 100 mg/kg, en el tratamiento 140  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Este efecto, podría deberse a una mayor resistencia de sus tejidos al efecto tóxico del Al en la parte aérea del cultivar, permitiéndole concentrar mayor Al en los tejidos sin disminuir su productividad, lo cual puede ser indicativo de un mecanismo de tolerancia interna

Lo anterior, sumado al comportamiento productivo en la parte radical, indicaría que el orden de resistencia al aluminio tóxico, estaría encabezado por el cultivar Yatsyn 1, separándose ampliamente de los demás cultivares. En un segundo grupo de menor resistencia, se encontrarían los cultivares Aries, Nui, Kingston y Quartet por su disminución inicial de productividad en 140  $\mu\text{Mol Al/L}$ , y en el mismo orden decreciente, debido a la segunda disminución de la productividad presentada por los cultivares Nui (en 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ ), Kingston y Quartet (en 280  $\mu\text{Mol Al/L}$ ) y el aumento de la concentración de Al aéreo, por sobre los 100 mg/kg, en los tratamientos respectivos. Finalmente en un tercer grupo estaría el cultivar Pastoral, ya que su disminución inicial de productividad y aumento de la concentración de Al (sobre los 100 mg/kg) se presentó en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Este ordenamiento de resistencia al Al tóxico, concuerda con la producción de MS total de los cultivares diploides (Cuadro 18), pero no sucede lo mismo con los cultivares tetraploides (Pastoral y Quartet). Esto se debería a que el cultivar Pastoral aparentemente se afecta antes que el cultivar Quartet en su producción de MS aérea. Sin embargo, el cultivar Pastoral tiene una mayor productividad de materia seca aérea y total que el cultivar Quartet en todos los niveles de Al aplicado (Cuadro 18). Esta

aparente contradicción se produce porque el cultivar Pastoral tiene una mayor productividad que el cultivar Quartet.

Ambos cultivares tetraploides superan los 100 mg/kg de Al aéreo en el tratamiento 70  $\mu\text{Mol Al/L}$ , mostrando su mayor sensibilidad a Al que los cultivares diploides. Al compararlos entre ellos, el cultivar Pastoral mantiene la concentración de Al aéreo (alrededor de 100 mg/kg) hasta el tratamiento 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$ , en tanto que el cultivar Quartet, incrementa la concentración de Al aéreo, superando los 202 mg/kg en el último tratamiento de Al aplicado.

El comportamiento observado en la concentración y absorción de Al radical de los cultivares sugiere que a bajos niveles de Al en solución, la planta no limita el aumento de concentración de Al en sus tejidos y no limita la productividad de MS. Al aumentar la concentración de Al en solución, la planta disminuye la producción de MS y por ende la absorción, disminuyendo la concentración de Al. Esto ha sido señalado por MARSCHNER (1995), como un mecanismo de tolerancia por exclusión del estrés de Al. Con mayores dosis de Al en solución, la planta sigue disminuyendo la productividad de MS y al mismo tiempo incrementa la concentración de Al en sus tejidos, por lo que el mecanismo de exclusión sería excedido (tratamiento 560  $\mu\text{Mol Al/L}$ ), debido a la mayor concentración presente en la solución nutritiva.

De los datos de concentración de Al obtenidos a partir de los cultivares de ballica evaluados, se puede señalar que, en general, las concentraciones de aluminio de la parte aérea de los cultivares fueron menores que las de la parte radical. Esto ha sido señalado por FOY *et al.* (1978), como una característica de plantas tolerantes al aluminio, en las que se observan niveles más bajos de aluminio en la parte aérea y entrapan el exceso de aluminio en las raíces. Los cultivares Aries y Yatsyn 1 muestran concentraciones de Al aéreo inferiores a las encontradas en los cultivares Nui, Kingston, Pastoral y Quartet. Lo

anterior sugiere que los cultivares Aries y Yatsyn 1, serían más eficientes en impedir la translocación de Al desde las raíces hacia la parte aérea. Sin embargo, la alta absorción aérea de Al del cultivar Yatsyn 1, a diferencia del cultivar Aries, indicaría que las bajas concentraciones de Al se deberían a una dilución de la concentración, por la mayor productividad en la parte aérea del cultivar.

**4.4.1 Clasificación de los cultivares según su resistencia o sensibilidad relativa al Al.** En el punto 2.8.2 del presente trabajo de tesis, se han presentado aspectos generales de experimentos realizados en tolerancia al aluminio en especies forrajeras, existentes en la literatura nacional e internacional. En él se ha podido determinar que los diferentes autores han empleado criterios de clasificación distintos con respecto a la resistencia o sensibilidad relativa al Al de las diferentes especies estudiadas.

En el Cuadro 29 se presenta, en base a los resultados de producción de MS total, un criterio de clasificación utilizado en los estudios de WHEELER *et al.* (1992 b) y WHEELER y DODD (1995), basada en la actividad del aluminio ( $\mu\text{M Al}^{3+}$ ) requerida para reducir los rendimientos en 50% ( $\text{Al}_{\text{RY50}}$ ). Los rangos de Al son diferentes, debido a que los niveles de Al de la solución nutritiva utilizados en este trabajo son mayores a los utilizados por WHEELER *et al.* (1992 b) y WHEELER y DODD (1995). Además, de los cálculos de reducción de rendimiento al 50% se realizaron cálculos de reducción del rendimiento al 75%, ambos utilizando los datos obtenidos en la ecuación cuadrática inversa ajustada para la producción de MS total (ver Anexos 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46).



**CUADRO 29. Actividad del aluminio ( $\mu\text{Mol Al/L}$ ) requerida para reducir los rendimientos de MS total en 75 y 50%, para los cultivares evaluados.**

Cultivares	Concentración de Al ( $\mu\text{Mol Al/L}$ ) para reducir MS total al		Producción de MS total	
	75 % ( $\mu\text{Mol Al/L}$ )	50% ( $\mu\text{Mol Al/L}$ )		
Yatsyn 1	201.1	1133.2	$7.395 \pm 2.43$	a
Aries	137.8	376.1	$6.164 \pm 2.46$	a b
Kingston	107.2	289.6	$5.908 \pm 2.60$	b
Nui	75.4	288.0	$6.026 \pm 2.26$	a b
Quartet	75.7	165.3	$5.390 \pm 2.90$	b
Pastoral	62.9	143.5	$5.723 \pm 3.05$	b

El Cuadro 29 muestra que los cultivares que reducen su producción de MS en un 75 % con menores concentraciones de Al en solución, son los cultivares Nui, Quartet, y Pastoral, que necesitan menos de 76  $\mu\text{Mol Al/L}$ , por lo que serían cultivares sensibles al Al tóxico. Los cultivares Aries y Kingston reducen su producción de MS total al 75 % con más de 100  $\mu\text{Mol Al/L}$  y el cultivar Yatsyn 1, con 201  $\mu\text{Mol Al/L}$  siendo Yatsyn 1 y Aries más resistentes que Kingston.

La reducción del rendimiento al 50%, presenta resultados similares, sin embargo, las concentraciones son diferentes. El cultivar Yatsyn 1 necesita una concentración de Al en solución superior a 1100  $\mu\text{Mol Al/L}$ , para reducir su producción de MS total al 50%. El cultivar Aries reduce su producción total de MS con 376  $\mu\text{Mol Al/L}$ . Los cultivares Yatsyn 1 y Aries serían más resistentes al efecto tóxico del Al, según este criterio. El cultivar Nui reduce su producción de MS total al 50% con 288  $\mu\text{Mol Al/L}$ , similar al necesario para el cultivar Kingston (289.6 $\mu\text{Mol Al/L}$ ). Ambos se encontrarían en un nivel intermedio de resistencia relativa al Al. En cambio, los cultivares tetraploides Quartet y Pastoral, reducen su producción de MS total al 50% con concentraciones de Al en solución del orden de los 143 a 165  $\mu\text{Mol Al/L}$ , siendo cultivares sensibles al efecto del Al tóxico.

La diferencia más notoria entre las concentraciones necesarias para reducir la producción de MS en 75 y 50%, se presentan para el cultivar Nui, ya que inicialmente estaría dentro de los cultivares más sensibles (75% MS), junto a los cultivares tetraploides, sin embargo, la concentración necesaria para reducir su producción al 50%, es el doble de la concentración que reduce la producción de MS al 50% de los cultivares Pastoral y Quartet.

Además, es importante destacar, que al utilizar el criterio de clasificación propuesto por WHEELER *et al.* (1992 b) y WHEELER y DODD (1995), es posible estudiar la reducción de MS de los cultivares individualmente, sin comparar las diferencias de producción de MS totales entre ellos. Al observar el Cuadro 29 se podría deducir que el orden de tolerancia al Al tóxico sería Yatsyn 1 > Aries > Kingston > Nui > Quartet > Pastoral. Sin embargo, al observar la producción de MS total como promedio de todos los tratamientos y la comparación múltiple de promedios, destaca que el cultivar Nui está en un nivel intermedio de producción junto con el cultivar Aries y que produce mayor cantidad de MS que el cultivar Kingston. El cultivar Quartet que según el criterio utilizado por WHEELER *et al.* (1992 b) y WHEELER y DODD (1995), sería más resistente que el cultivar Pastoral, produce menos MS total que éste, aun cuando las diferencias de MS no son significativas.

Los resultados expuestos anteriormente, sugieren que no es suficiente basarse en un solo criterio de clasificación de tolerancia al Al, ya que se puede incurrir en errores al momento de elegir un cultivar determinado, para ser utilizado en condiciones de suelos ácidos.

## 5 CONCLUSIONES

De los resultados expuestos y analizados anteriormente, se concluye:

- Los cultivares de *Lolium perenne* L. evaluados: Aries, Kingston, Nui, Pastoral, Quartet y Yatsyn 1, presentan diferentes sensibilidades a la toxicidad de Al en solución.
- La productividad de las raíces se afecta con mayores concentraciones de Al en solución que la productividad de la parte aérea para todos los cultivares evaluados. En este estudio, los cultivares Aries, Nui y Yatsyn 1, no disminuyeron significativamente su producción de MS radical, disminuyendo su producción aérea en distintos niveles de Al en solución. Los cultivares Kingston y los tetraploides Pastoral y Quartet disminuyen su productividad radical dentro del rango de Al en solución estudiado y la disminución de MS aérea se produce en niveles más bajos de Al en solución.
- Existen diferencias en el comportamiento de adaptación al Aluminio en solución entre los cultivares evaluados. Los cultivares Aries y Yatsyn 1, mostraron una mayor producción de MS aérea, radical y total, además presentan menores concentraciones de Al aéreo, que los cultivares Nui, Kingston, Pastoral y Quartet, sugiriendo que son más eficientes en disminuir la translocación del Al hacia la parte aérea o que las bajas concentraciones de Al se deben a una dilución de la concentración, por la mayor productividad en la parte aérea. El cultivar Nui aun cuando presentó altos niveles de concentración de Al aéreo, mostró un mayor desarrollo de MS aérea y total que los cultivares Kingston, Pastoral y Quartet.

- Los cultivares tetraploides Pastoral y Quartet, fueron más productivos en el tratamiento sin Al adicionado, observándose mayores producciones de MS total que los cultivares diploides. Sin embargo, su producción de MS se afectó en mayor grado, al ser sometidos a condiciones de toxicidad por Al, sugiriendo que en suelos ácidos serían menos productivos que los cultivares diploides.
- Todos los cultivares presentan mecanismos de exclusión del Al y un comportamiento general de la especie con respecto a la toxicidad de Al. En niveles bajos de Al en solución, la planta no limita el aumento de concentración de Al en sus tejidos ni la productividad. Posteriormente, al aumentar la concentración de Al en solución la planta disminuye su productividad en conjunto a una disminución en la concentración de Al. Si el nivel de Al se sigue aumentando, la planta vuelve a disminuir la productividad e incrementa la concentración de Al en sus tejidos.
- En el cultivar Nui, la reducción del rendimiento al 75 % lo calificaría como un cultivar sensible, junto a los cultivares tetraploides. Sin embargo, la concentración de aluminio en solución que redujo su producción al 50%, fue el doble de la concentración de aluminio en solución que redujo la producción de MS al 50% de los cultivares Pastoral y Quartet. Además, este criterio permite estudiar la reducción de MS de los cultivares individualmente, sin comparar las diferencias de producción de MS total entre ellos, pudiendo incurrir en errores al momento de elegir un cultivar en particular, para ser utilizado en condiciones de suelos ácidos.

## 6 RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento de seis cultivares de ballica inglesa (*Lolium perenne* L.), cuatro cultivares diploides (Aries, Kingston, Nui y Yatsyn 1) y dos cultivares tetraploides (Pastoral, Quartet), ante niveles crecientes de aluminio en solución aplicado a jarras tipo Leonard utilizando cuarzo como sustrato. El experimento se realizó entre los meses de Marzo y Junio del 2001 en una cámara de crecimiento del Instituto de Producción Animal de la Universidad Austral de Chile, bajo condiciones ambientales controladas de temperatura ( $22^{\circ} \pm 4^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa y de fotoperíodo (16 h luz; 8 h oscuridad). Se transplantaron siete plántulas por cultivar a cada jarra. Se utilizaron seis tratamientos con cinco repeticiones, en un diseño completamente al azar. La solución nutritiva utilizada (125 mL/jarra) fue renovada diariamente y presentó un pH constante de 4,2. Las concentraciones de aluminio en solución fueron: 70; 140, 280; 560 y 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$  (aportados como sulfato de aluminio) además de un control, sin aplicación aluminio. Las especies fueron cosechadas a los 98 días luego del transplante. Se evaluó separadamente la parte aérea y radical para la materia seca producida. Posteriormente el material vegetal fue calcinado y a través de espectrofotometría de absorción atómica se determinaron las concentraciones de Al (mg/kg MS) en el material vegetal. Los resultados obtenidos fueron estadísticamente analizados a través de análisis de la varianza y se aplicó el test de Tukey para evaluar la diferencia entre medias. Además, se describió el comportamiento de los cultivares de ballica evaluados a través de análisis de regresión no lineal.

Los resultados mostraron que los cultivares de *Lolium perenne* L. evaluados: Aries, Kingston, Nui, Pastoral, Quartet y Yatsyn 1, presentaron diferentes sensibilidades a la toxicidad de Al en solución. La productividad de las raíces

disminuyó con mayores concentraciones de Al en solución, caso contrario sucede con la productividad de la parte aérea en todos los cultivares. En este estudio, los cultivares Aries, Nui y Yatsyn 1, no disminuyeron significativamente su producción de MS radical, disminuyendo su producción aérea en distintos niveles de Al en solución. Los cultivares Kingston y los tetraploides Pastoral y Quartet disminuyeron su productividad radical dentro del rango de Al en solución estudiado y la disminución de MS aérea se produjo en niveles más bajos de Al en solución.

Los cultivares Aries y Yatsyn 1, mostraron una mayor producción de MS aérea radical y total, además se observó que presentaron menores concentraciones de Al aéreo, que los cultivares Nui, Kingston, Pastoral y Quartet, sugiriendo que son más eficientes en disminuir la translocación del Al hacia la parte aérea o que las bajas concentraciones de Al se debieron a una dilución de la concentración, por la mayor productividad en la parte aérea. El cultivar Nui aun cuando presentó altos niveles de concentración de Al aéreo, mostró un mayor desarrollo de MS aérea y total que los cultivares Kingston, Pastoral y Quartet. Por su parte, los cultivares tetraploides Pastoral y Quartet, fueron altamente productivos en el tratamiento sin Al adicionado, observándose mayores producciones de MS total que los cultivares diploides. Sin embargo, su producción de MS se afectó en mayor grado, al ser sometidos a condiciones de toxicidad por Al, sugiriendo que en suelos ácidos son menos productivos que los cultivares diploides.

Todos los cultivares presentaron, en mayor o menor grado, mecanismos de exclusión del Al, relacionados con el nivel de Al en solución. A bajos niveles de Al en solución, la planta no limita el aumento de concentración de Al en sus tejidos y no limita la productividad de MS. Al aumentar la concentración de Al en solución la planta disminuye la producción de MS y por ende la absorción disminuyendo la concentración de Al. Con mayores dosis de Al en solución, la

planta sigue disminuyendo la productividad de MS y al mismo tiempo incrementa la concentración de Al en sus tejidos. Este comportamiento podría inferirse como una característica de la especie.

Al aplicar un criterio de clasificación utilizado por los autores WHEELER *et al* (1992 b) y WHEELER y DODD (1995), basada en la actividad del aluminio ( $\mu\text{M Al}^{3+}$ ) requerida para reducir los rendimientos en 75 y 50% ( $\text{Al}_{\text{RY50}}$ ), se observó que este criterio permite estudiar la reducción de MS de los cultivares individualmente, sin comparar las diferencias de producción de MS total entre ellos, pudiendo incurrir en errores al momento de elegir un cultivar en particular, para ser utilizado en condiciones de suelos ácidos.

## SUMMARY

The objective of this study was to evaluate the performance of six cultivars of perennial ryegrass (*Lolium perenne*), four diploid cultivars (Aries, Kingston, Nui y Yatsyn 1) and two tetraploid cultivars (Pastoral, Quartet) under increasing levels of aluminium in solution supplied to Leonard jars using quartz as substrate. The experiment was carried out between march and june of 2001 in a growing chamber at the Animal Production Institute of the University Austral of Chile, under controlled environmental conditions of temperature ( $22^{\circ} \pm 4^{\circ}\text{C}$ ), humidity and photoperiod (16 h light; 8 h dark).

Seven seedlings of each cultivar were transplanted into each jar. Six treatments with five replicates were used in a complete randomized design. The nutritive solution used (125 mL/jar) was renewed daily and had a constant pH of 4,2. The aluminium concentration in the solution were 70; 140; 280; 560; and 1120  $\mu\text{Mol Al/L}$  (supplied as aluminium sulphate), plus a control treatment without aluminium supply. The plants were harvested at 98 days after transplanting. Aerial and radicular dry matter were separately evaluated. The plant material was ashed and the concentration of aluminium was determined using atomic absorption spectrophotometry (mg/kg DM). The results were statistically analysed using analysis of variance and Tukey test for means comparison. The behaviour of ryegrass cultivars Al concentration with Al supplied was also described using a non lineal regression analysis.

The results showed that the *Lolium perenne* cultivars Aries, Kingston, Nui, Pastoral, Quartet y Yatsyn 1 had different sensibilities to the aluminium in solution toxicity. The root growth decreased more marked with higher concentrations of aluminium in solution than the aerial part of the plant in all cultivars evaluated. The cultivars Aries, Nui and Yasyn 1 did not decrease



significantly its root DM production, but decreasing their aerial DM production at the different levels of aluminium in solution. Also, the different levels of aluminium in solution decreased root DM production of cultivars Kingston and the tetraploid Pastoral and Quartet. The aerial DM yield decreased with lower levels of aluminium in solution. Than root DM yield.

Cultivars Aries and Yatsyn 1 showed a higher root and aerial DM production and lower concentrations of aerial aluminium than the cultivars Nui, Kingston, Pastoral and Quartet, suggesting that they are more efficient for decreasing the aluminium translocation to the aerial part or probably due to a dilution of aluminium concentration as a consequence of a bigger aerial DM productivity. Cultivar Nui also showed high levels of aluminium concentration in the aerial part and a greater aerial and total DM production than Kingston, Pastoral and Quartet. Tetraploid cultivars Pastoral and Quartet, were highly productive in the treatment without aluminium, showing higher more DM production than the diploid cultivars. Nevertheless, their DM production was more affected when they were grown in solution with aluminium, suggesting that tetraploid cultivars would be less productive in acid soil conditions.

All cultivars showed in different degrees mechanisms of aluminium exclusion, depending on the level of aluminium in solution. With low levels of aluminium in solution, the plant does not limit the increase of the concentration of aluminium in its tissues and does not limit its DM productivity. With an increase of aluminium in solution the plant decrease the DM production followed by a decrease on Al uptake wich decrease the aluminium concentration in tissues. With high levels of aluminium in solution the plant continue decreasing DM production and at the same time increase the aluminium concentration in its tissues. This behaviour may be a characteristic of the *Lolium perenne* species.

When the classification criteria used by WHEELER *et al.* (1992 b) and WHEELER and DODD (1995), based on the aluminium activity ( $\mu\text{M Al}^{3+}$ )

required for decreasing yield in 75 and 50% ( $Al_{RY50}$ ) was applied, it was observed that the criteria allowed to study the reduction on DM production of cultivars individually, without comparing DM production among them. This may produce bias when choosing a particular cultivar for acid soil conditions.

## 7 BIBLIOGRAFIA

AGRICOLA NACIONAL S.A. COMERCIAL E INDUSTRIAL (ANASAC). 1997.  
Catalogo de forrajeras. Programa de forrajeras de Anasac. (Chile). 183 p.

---

\_\_\_\_\_ . 2001 a.  
Catalogo electrónico de productos y servicios.. Ballica perenne aries.  
<<http://www.anasac.cl/framearea.asp?t=apar&cod=50&codsec=0&codsubsec=0&app=14&cas=s>> (29 nov. 2001).

---

\_\_\_\_\_ . 2001 b.  
Catalogo electrónico de productos y servicios. Ballica perenne Quartet.  
<<http://www.anasac.cl/framearea.asp?t=apar&cod=50&codsec=0&codsubsec=0&app=14&cas=s>> (29 nov. 2001).

ALFARO, M. 1997. Acidificación de suelos: Efectos sobre la pradera y la producción animal. Tierra Adentro (Chile) 5: 36-38.

ALVA, A.K., EDWARDS, D.G., ASHER, C.J. y BLAMEY, F.P. 1986. Effects of phosphorus/aluminium molar ratio and calcium concentration on plant response to aluminium toxicity. Soil Science Society of American Journal (EEUU) 50:133-137.

BALOCCHI, O. 2000. Forrajeras. Apuntes de clase. Facultad de Ciencias Agrarias. Instituto de Producción Animal. Universidad Austral de Chile. (Chile) 289 p.

- BLACK, C. 1975. Relaciones suelo planta. Montevideo, Uruguay. Hemisferio Sur. 444 p.
- BOHN, H., McNEAL, B. y O'CONNOR, G. 1993. Química de suelos. 3<sup>a</sup> ed. Limusa. México D.F., México. 370 p.
- BORIE, F., GALLARDO, F., MORA, M. y GARCIA, J.C. 1999. Sensibilidad y tolerancia a la acidez de los cultivos en condiciones de campo. Frontera Agrícola (Chile). 5 (1-2):19-28
- BRADY, N. y WEIL, R. 2000. Elements of the nature and properties of soils. Prentice Hall. New jersey. EEUU. 559 p.
- BRADY, N. y WEIL, R. 1999. The nature and properties of soils. 12<sup>th</sup>. New Jersey, (EEUU). Prentice Hall. 881 p.
- CISTERNAS, E. 1996. Gorgojo argentino de las ballicas: antecedentes biológicos, daños e incidencia en praderas. Producción Animal 1996. Luis Latrille (ed). Instituto de Producción Animal. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile: 93-106.
- DE LA FUENTE, J.M. y HERRERA, L. 1999. Advances in the understanding of aluminum toxicity and the development of aluminum-tolerant transgenic plants. Advances in Agronomy (EEUU) 66: 103-120.
- DELHAIZE, E. y RYAN, P. 1995. Aluminum toxicity and tolerance in plants. Plant Physiology 107:315-321.
- DOMINGUEZ, A. 1997. Tratado de fertilización. Madrid, España. Mundi-Prensa. 613 p.

- DEMANET, R. 1994. Variedades de ballica perenne. Frontera Agrícola (Chile). 2(1): 38-43.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L. y WHITE, M.C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. Annual Review of Plant Physiology (EEUU) 29: 511 - 566.
- GALLARDO, F; RIQUELME, C. y BOIRE, F. 1994. Tolerancia al aluminio de variedades de tres especies forrajeras cultivadas en solución nutritiva. XIX Reunión Sochipa (19-21 octubre). Coquimbo, Chile. 1-2.
- GALLARDO, F. y BORIE, F. 1999. Sensibilidad y tolerancia de especies y cultivares a condiciones de acidez. Test rapidos de diagnostico. Frontera Agrícola (Chile). 5(1 y 2):3-28.
- HONORATO, R. 1993. Manual de Edafología. Universidad Católica de Chile. Santiago Chile. 196 p.
- HUE, N.V., CRADDOCK, G.R. y ADAMS, F. 1986. Effects of organic acids on Aluminium toxicity in subsoils. Soil Science Society of American Journal (EEUU) 50: 28 - 34.
- ISLA, F. 2001. Evaluación de nueve cultivares de *Lolium perenne* L. bajo pastoreo con vacas lecheras. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 94 p.
- LÓPEZ, H. 1996. Especies forrajeras mejoradas. Ruiz, I (ed.).Praderas para Chile. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. pp: 41-108.

- MARSCHNER, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2<sup>th</sup> ed. San Diego, USA. Academic Press. 889 p.
- MENGEL, K y KIRKBY, E. 1982. Principles of plant nutrition. 3<sup>th</sup> ed. International Potash institute. Worblaufen - Bem, Switzerland. 655 p.
- MORTVEDT, J., GIORDANO, P. y LINDSAY, W. 1972. Micronutrients in agriculture. 2<sup>th</sup> ed. Madison, (EEUU). Committee. 666 p.
- MORA, M., SCHNETTLER, B. y DEMANET, R. 1997. Efecto de la aplicación de yeso en suelos ácidos sobre la calidad y rendimiento de *Lolium perenne*. XXII Reunión Anual Sociedad Chilena de Producción Animal. Valdivia, Chile. 15-16.
- PONCE, J. 1999. Evaluación del comportamiento de cinco especies pratenses ante distintos niveles de aluminio en solución. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 110 p.
- RADIC, S. 2001. Estudio de tolerancia a la toxicidad por aluminio de cuatro ecotipos de bromo (*Bromus valdivianus* Phil). Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 112 p.
- RENGEL, Z. y ROBINSON, D.L. 1989. Aluminium effects on growth and macronutrient uptake by annual ryegrass. *Agronomy Journal* (EEUU) 81:208-215.
- ROY, A.K., SHARMA, A. y TALUKDER, G. 1988. Some aspects of aluminium toxicity in plants. *The Botanical Review* (EEUU) 54(2): 145 - 178.

- RUZ, E. y CAMPILLO, R. 1996. Fertilización de praderas. Ruiz, I (ed.). Praderas para Chile. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. pp: 219-238.
- SALISBURY, F. y ROSS, C. 1994. Fisiología vegetal. 4ª ed. Iberoamérica. Mexico D.F. 759 p.
- PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE (PUC). 1975. Manual de análisis de suelos. Santiago. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 77 p.
- SEMILLAS GENERACIÓN 2000. 1999. Cartilla divulgativa. Semillas forrajeras. Ballicas perennes. Chile. 4 p.
- SEMILLAS GENERACIÓN 2000. 2001. Semillas Forrajeras. Ballicas perennes. <<http://www.sg-2000.com/>> (29 nov. 2001)
- SIERRA. 1992. Fertilidad del suelo y praderas permanentes. INIA Remehue (ed.). Seminario. Manejo de praderas permanentes. Serie Remehue. (Chile). 31: 57-86.
- \_\_\_\_\_. 1994. Fertilización y enmiendas en praderas permanentes (mantención). INIA Remehue (ed.). Seminario. Corrección de la fertilidad y uso de enmiendas en praderas y cultivos forrajeros. Serie Remehue. (Chile). 53: 57-68.
- SUAREZ, D. 1996. Acidificación de suelos y uso de fertilizantes nitrogenados. Producción Animal 1996. Luis Latrille (ed). Instituto de Producción Animal. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile: 145-161.

- TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, I.D. y HAVLIN, J.L. 1993. Soil Fertility and Fertilizers. 5<sup>th</sup> ed. MacMillan. (EEUU). 634 p.
- TORRES, A. 1996. Los endófitos (*Acremonium sp*) y su incidencia en la ganadería de la zona sur. Producción Animal 1996. Luis Latrille (ed). Instituto de Producción Animal. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile: 51-64 p.
- VENEGAS, C. 1993. Tolerancia de los cultivos a la acidez de los suelos. Frontera Agrícola (Chile). 1(1): 23-27.
- WHEELER, D. y DODD B. 1995. Effect of aluminium on yield and plant chemical concentrations of some temperate legumes. Plant and Soil (Holanda).173:133-145.
- WHEELER, D., EDMEADES, D., SMITH, D. y WEDDERBURN, M. 1992a. Screening perennial rye-grass from New Zeland for aluminium tolerance. Plant and Soil (Holanda).146:9-19.
- WHEELER, D., EDMEADES, D., CHRISTIE,R. y GARDNER, R. 1992b. Effect of aluminium on the growth of 34 plant species: A summary of results obtained in low ionic strength solution culture. Plant and Soil (Holanda).146:61-66.



## **ANEXOS**

**ANEXO 1. Determinación de contaminación con Al del sustrato.**

Repetición	Al intercambiable (mg/Kg)
1	1.53
2	1.44
3	1.26
4	1.17
Media	1.35 ± 0.16

**ANEXO 2. Determinación de contaminación con Al del agua destilada.**

Repetición	Lectura Al (µg/mL)
1	0.003
2	0.003
Blanco	0
Media	0.003

**ANEXO 3. Determinación de contaminación con Al de la solución nutritiva (tratamiento 0 µ Mol Al/L).**

Repetición	Lectura Al (µg/mL)
1	0.006
2	0.006
Blanco	0
Media	0.006

**ANEXO 4. Determinación de contaminación con Al de la Mecha de conducción de la solución nutritiva.**

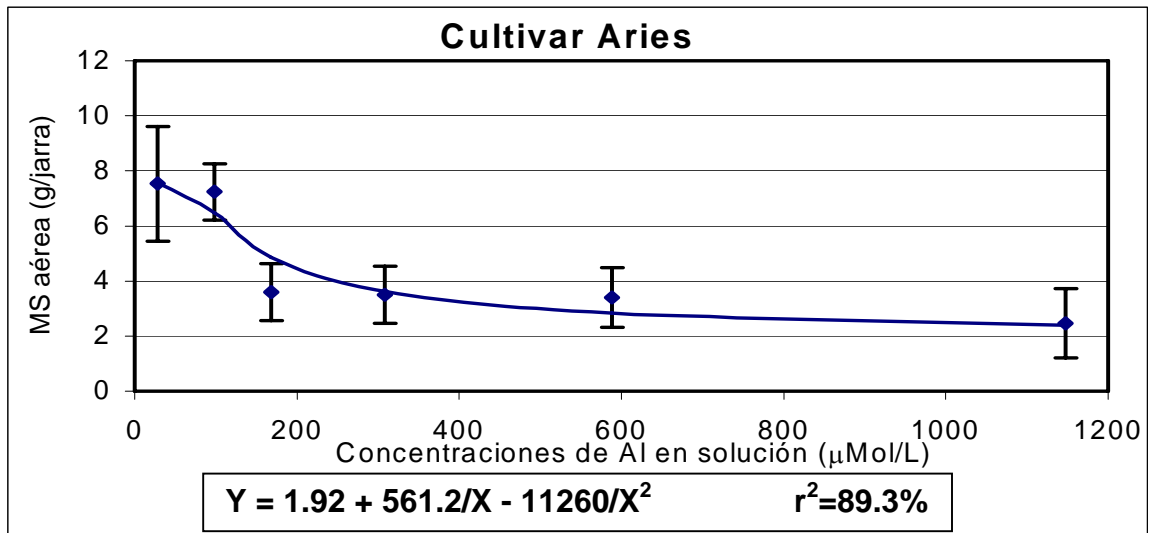
Repetición	Lectura Al ( $\mu\text{g/mL}$ )
1	0.62
2	0.69
Blanco	0.18
Media	0.475

**ANEXO 5. Resultados del análisis de regresión de MS aérea (g/jarra) de los cultivares.**

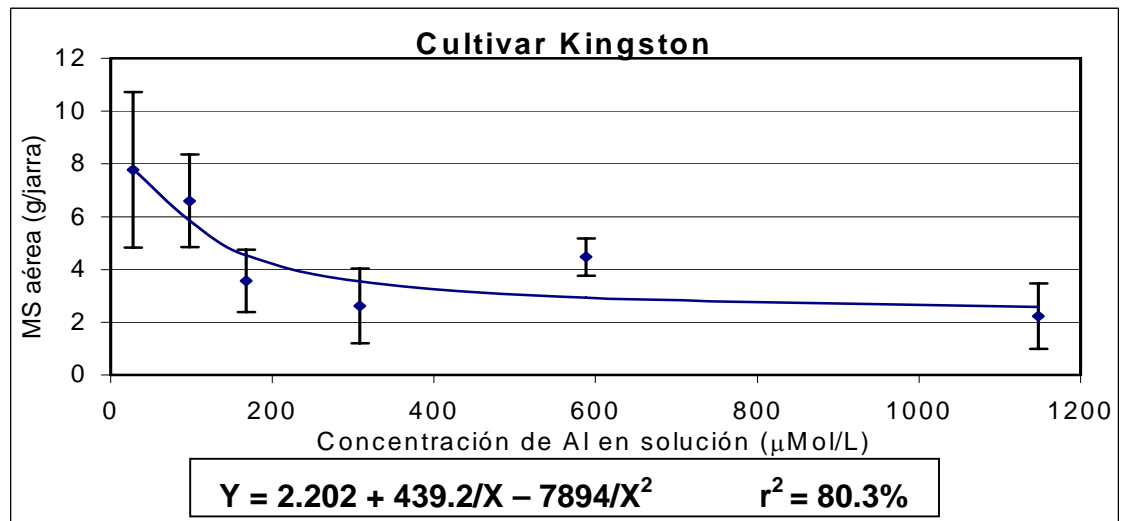
Modelo Cuadrático inverso  $Y=A+B/X+C/X^2$

MS aérea datos promedio	Aries	Kingston	Nui
Error estándar			
A	0.7311	1.011	0.6092
B	168.5	233.1	140.4
C	4360	6029	3633
Intervalos de Confianza 95%			
A	-0.4145 a 4.238	-1.015 a 5.419	0.7645 a 4.641
B	24.88 a 1098	-302.4 a 1181	-126.3 a 767.3
C	-25140 a 2611	-27080 a 11292	-15950 a 7165
Suma de cuadrados absoluta	2.538	4.853	1.762
MS aérea datos promedio	Pastoral	Quartet	Yatsyn 1
Error estándar			
A	0.2594	0.4102	0.9786
B	59.81	94.56	225.6
C	1547	2446	5836
Intervalos de Confianza 95%			
A	0.9411 a 2.592	-0.03626 a 2.574	-0.03213 a 6.196
B	209.1 a 589.8	159.9 a 761.7	-88.48 a 1347
C	-10360 a -515.7	-15230 a 341.9	-32180 a 4957
Suma de cuadrados absoluta	0.3196	0.7989	4.547

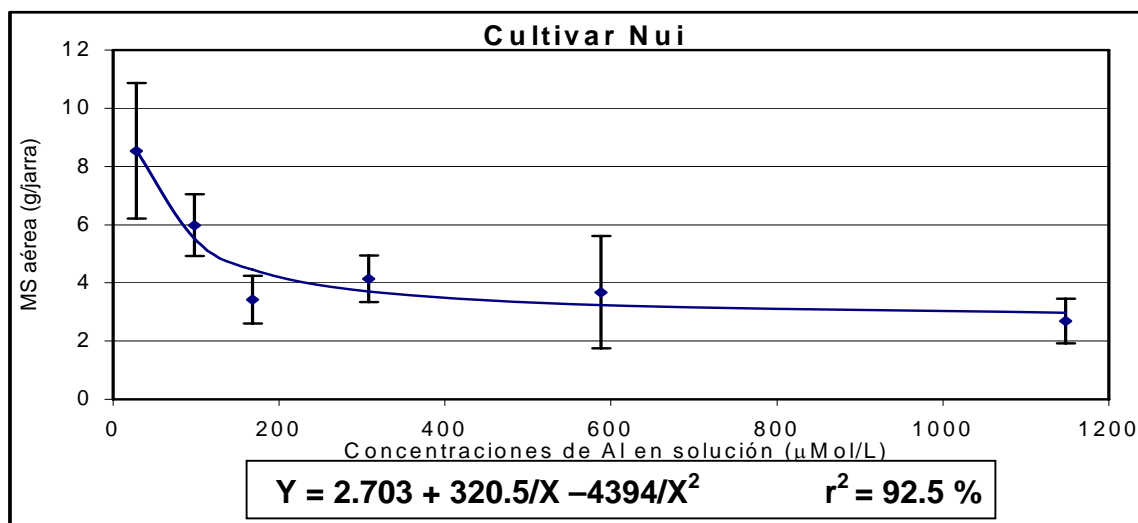
**ANEXO 6. Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries.**



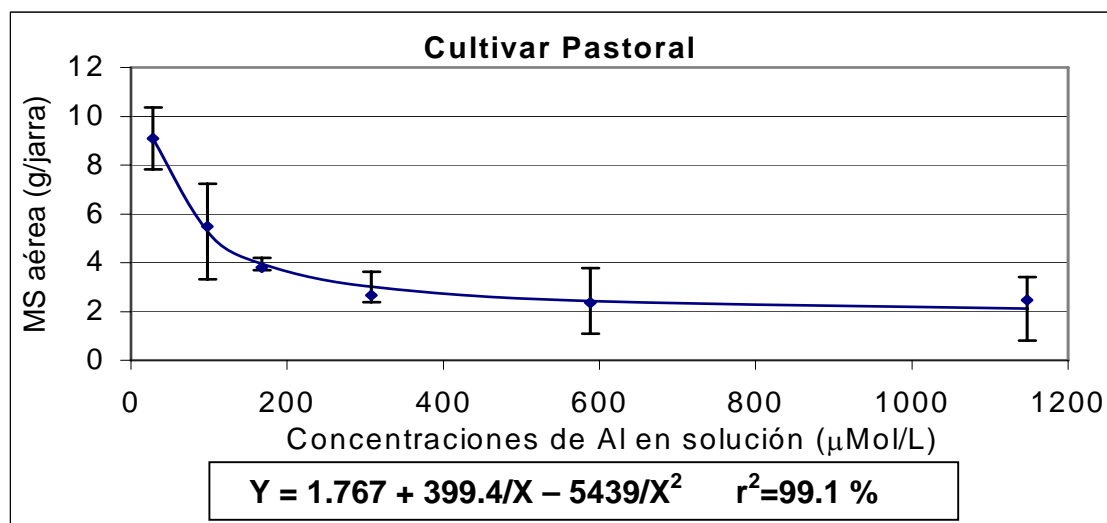
**ANEXO 7. Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Kingston.**



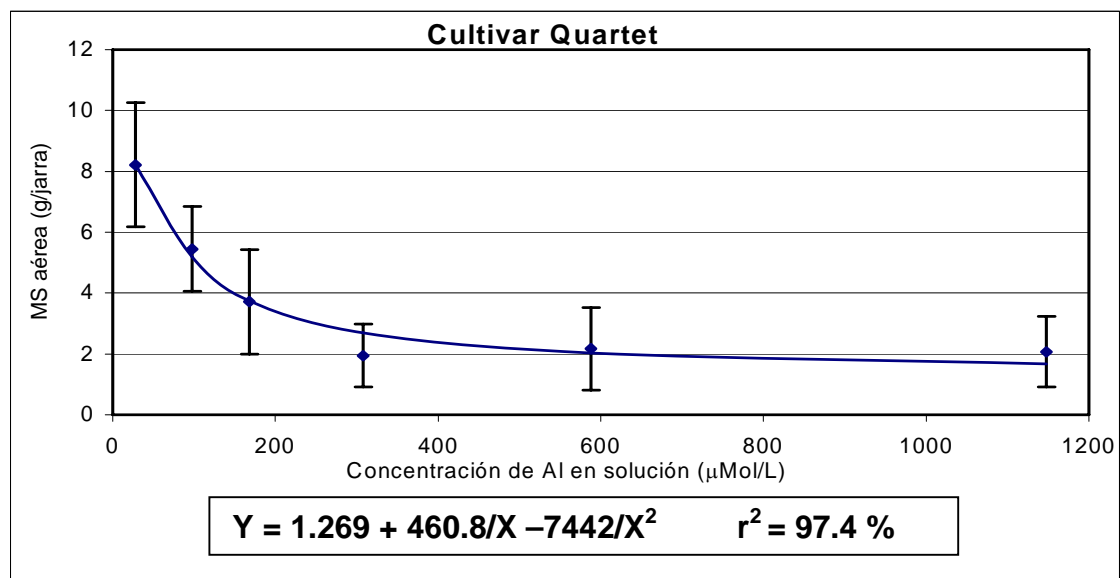
**ANEXO 8. Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Nui.**



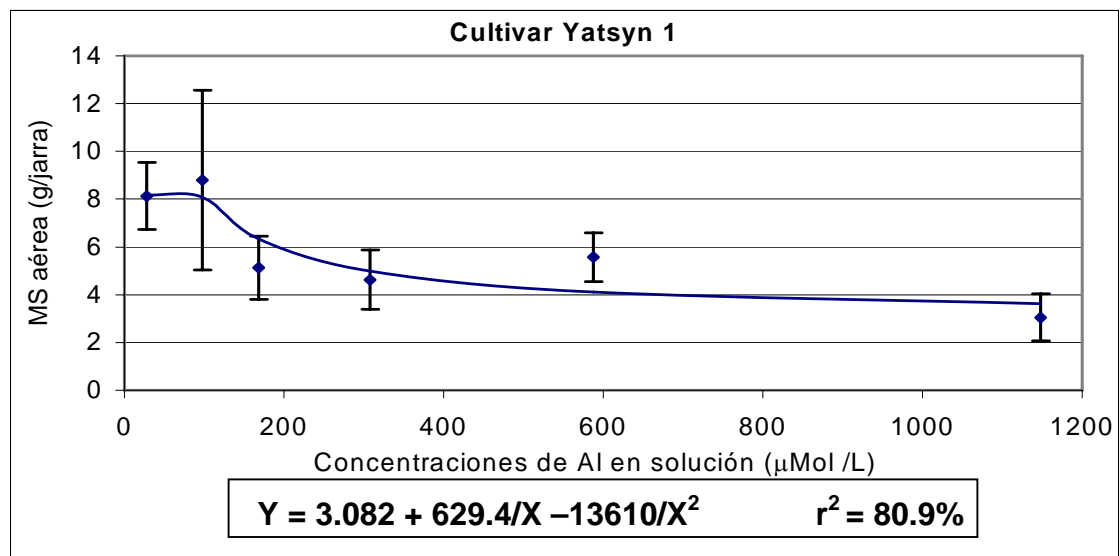
**ANEXO 9. Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Pastoral.**



**ANEXO 10. Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.)  
y curva de regresión para el cultivar Quartet.**



**ANEXO 11. Producción de MS aérea (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.)  
y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1.**

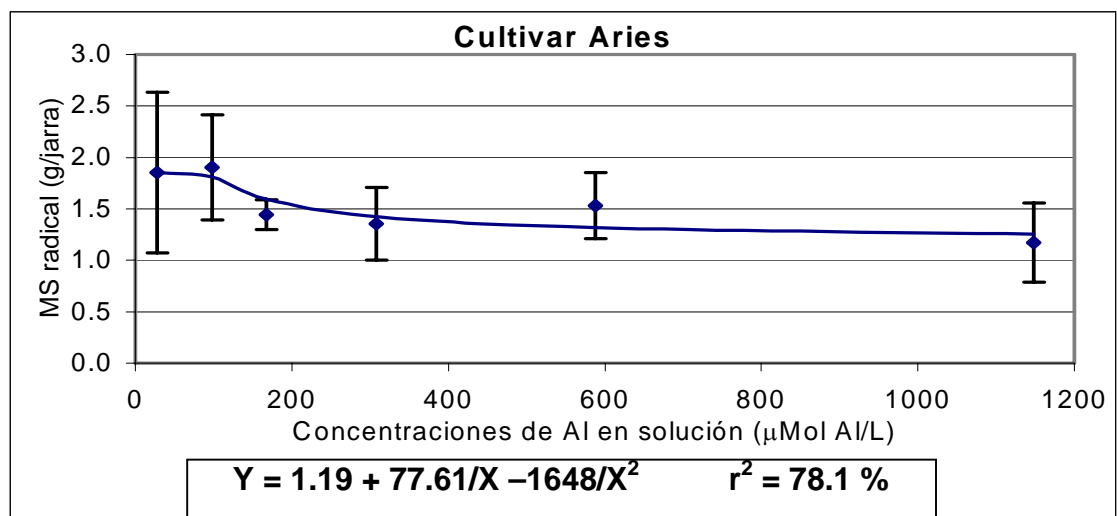


## ANEXO 12. Resultados del análisis de regresión de MS radical (g/jarra) de los cultivares.

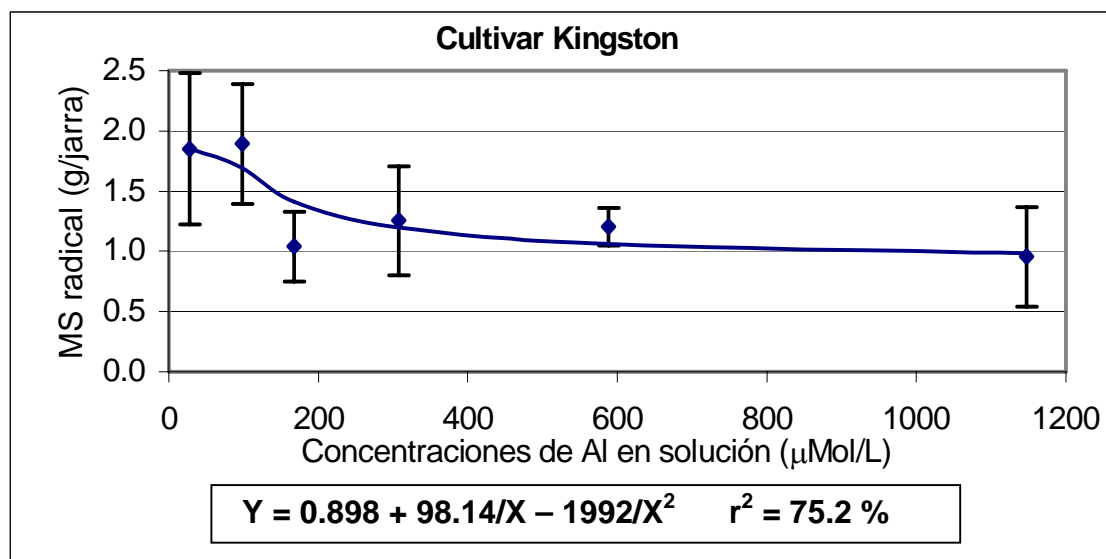
Modelo Cuadrático inverso  $Y=A+B/X+C/X^2$

MS radical datos promedio	Aries	Kingston	Nui
Error estándar			
A	0.137	0.2075	0.1394
B	31.59	47.84	32.13
C	817.2	1238	831.2
Intervalos de confianza 95%			
A	0.7538 a 1.626	0.2372 a 1.558	0.7588 a 1.646
B	-22.91 a 178.1	-54.08 a 250.4	-90.07 a 114.4
C	-4248 a 952.5	-5929 a 1946	-2780 a 2510
Suma de cuadrados absoluta	0.08917	0.2045	0.09225
MS radical datos promedio	Pastoral	Quartet	Yatsyn 1
Error estándar			
A	0.1108	0.1223	0.2119
B	25.54	28.19	48.86
C	660.7	729.2	1264
Intervalos de confianza 95%			
A	0.6603 a 1.365	0.6906 a 1.469	0.5747 a 1.924
B	-23.86 a 138.7	-29.11 a 150.3	-95.00 a 215.9
C	-2750 a 1454	-3153 a 1488	-5362 a 2682
Suma de cuadrados absoluta	0.05828	0.07099	0.2133

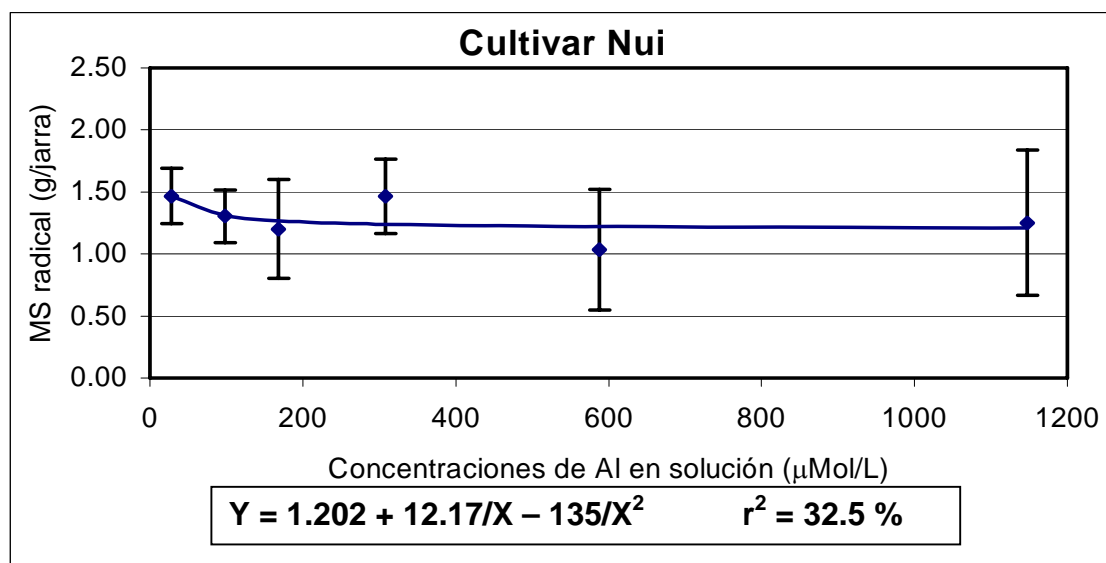
## ANEXO 13. Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries.



**ANEXO 14. Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.)  
y curva de regresión para el cultivar Kingston.**

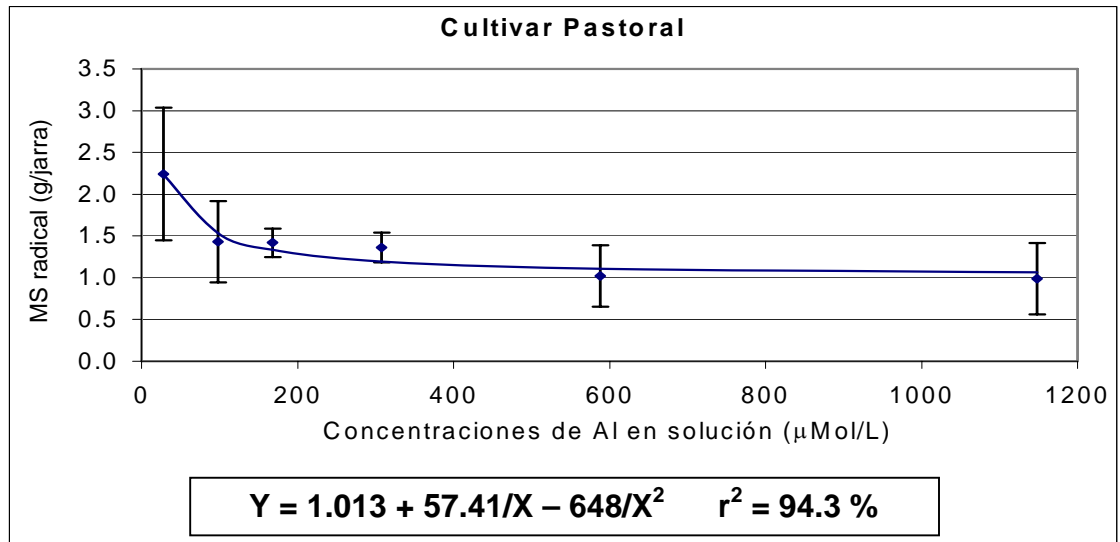


**ANEXO 15. Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.)  
y curva de regresión para el cultivar Nui.**

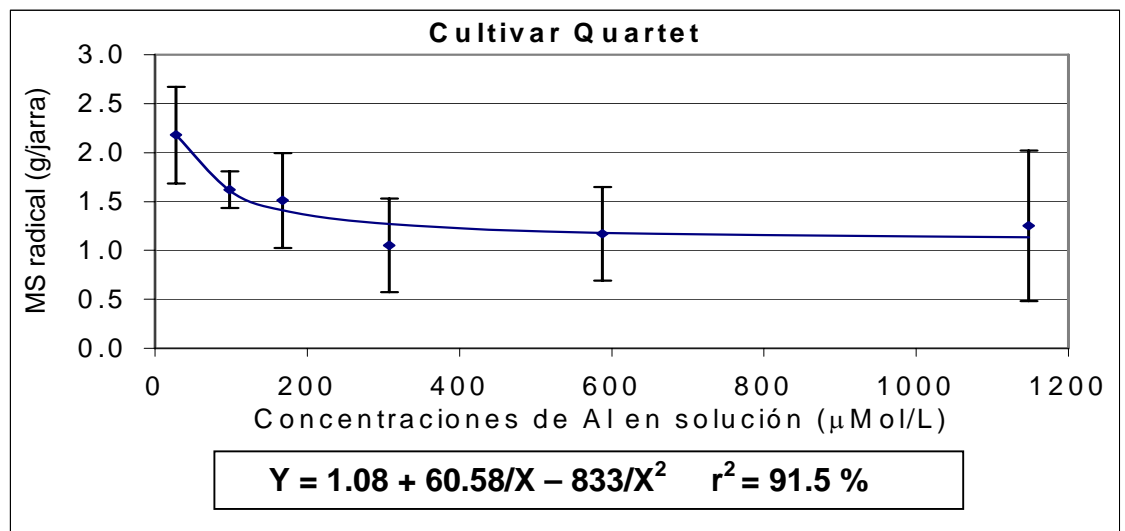




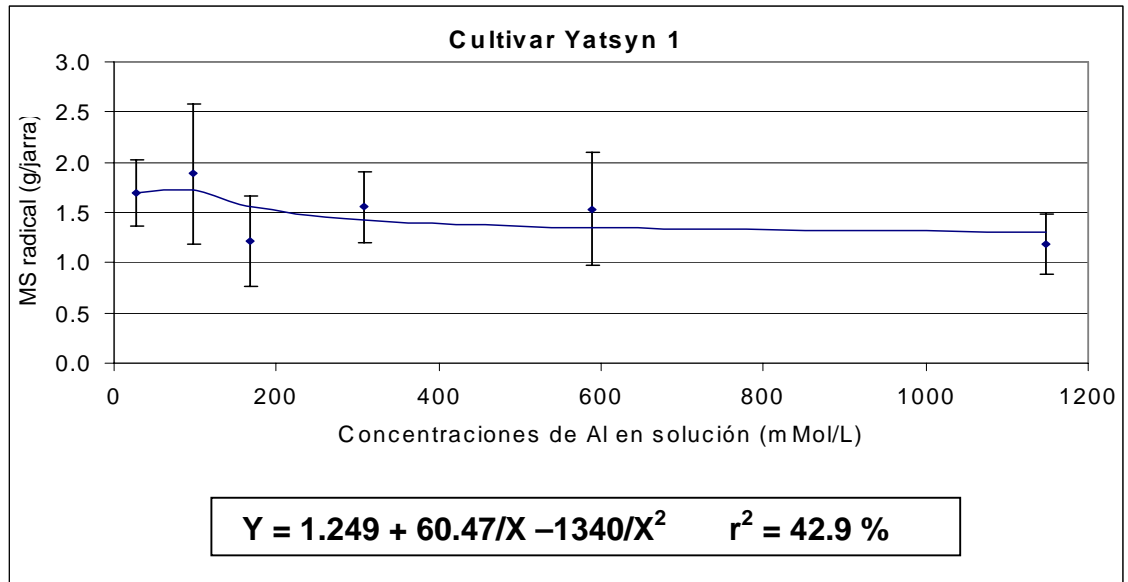
**ANEXO 16. Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.)  
y curva de regresión para el cultivar Pastoral.**



**ANEXO 17. Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.)  
y curva de regresión para el cultivar Quartet.**



**ANEXO 18. Producción de MS radical (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.)  
y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1.**

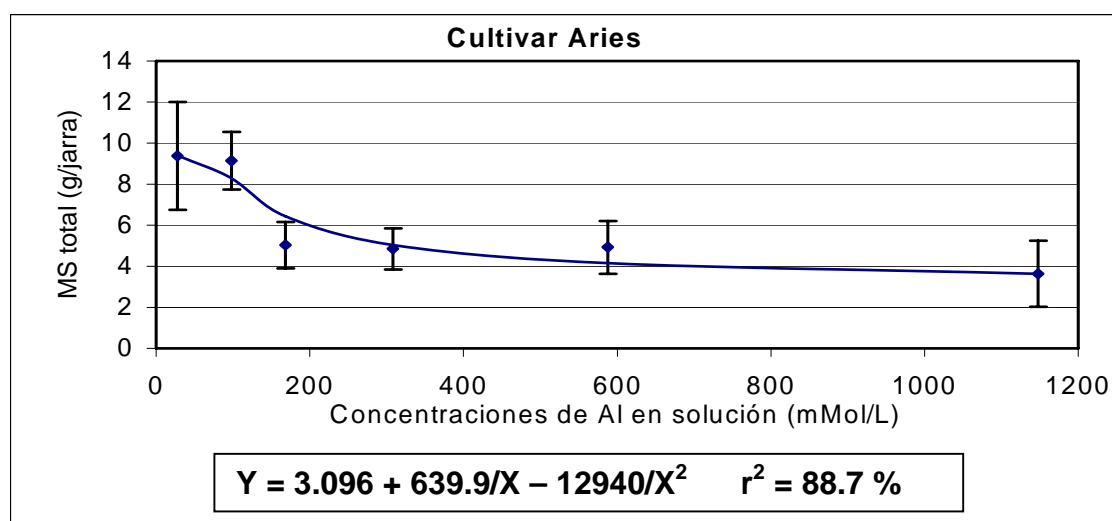


### ANEXO 19. Resultados del análisis de regresión de MS total (g/jarra) de los cultivares.

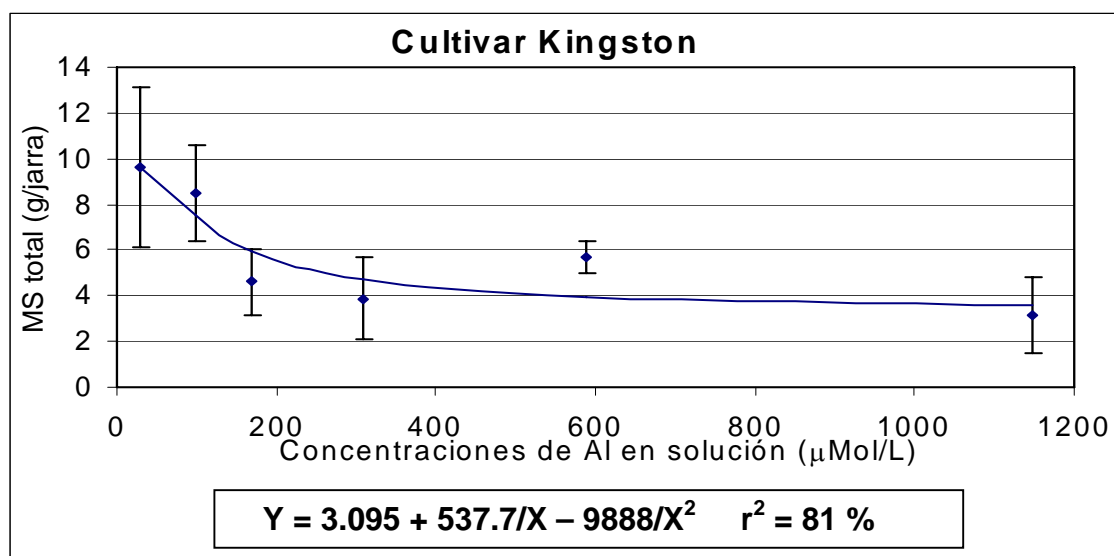
Modelo Cuadrático inverso  $Y=A+B/X+C/X^2$

MS total datos promedio	Aries	Kingston	Nui
Error estándar			
A	0.848	1.164	0.6489
B	195.5	268.3	149.6
C	5057	6942	3870
Intervalos de confianza 95%			
A	0.3979 a 5.794	-0.6091 a 6.799	1.841 a 5.971
B	17.90 a 1262	-316.2 a 1392	-143.3 a 808.7
C	-29030 a 3151	-31980 a 12202	-16840 a 7785
Suma de cuadrados absoluta	3.414	6.434	1.999
MS total datos promedio	Pastoral	Quartet	Yatsyn 1
Error estándar			
A	0.1804	0.5199	1.165
B	41.58	119.9	268.5
C	1076	3101	6947
Intervalos de confianza 95%			
A	2.205 a 3.353	0.6972 a 4.006	0.6224 a 8.035
B	324.7 a 589.3	139.8 a 902.6	-164.6 a 1544
C	-9513 a -2667	-18140 a 1593	-37060 a 7151
Suma de cuadrados absoluta	0.1545	1.284	6.443

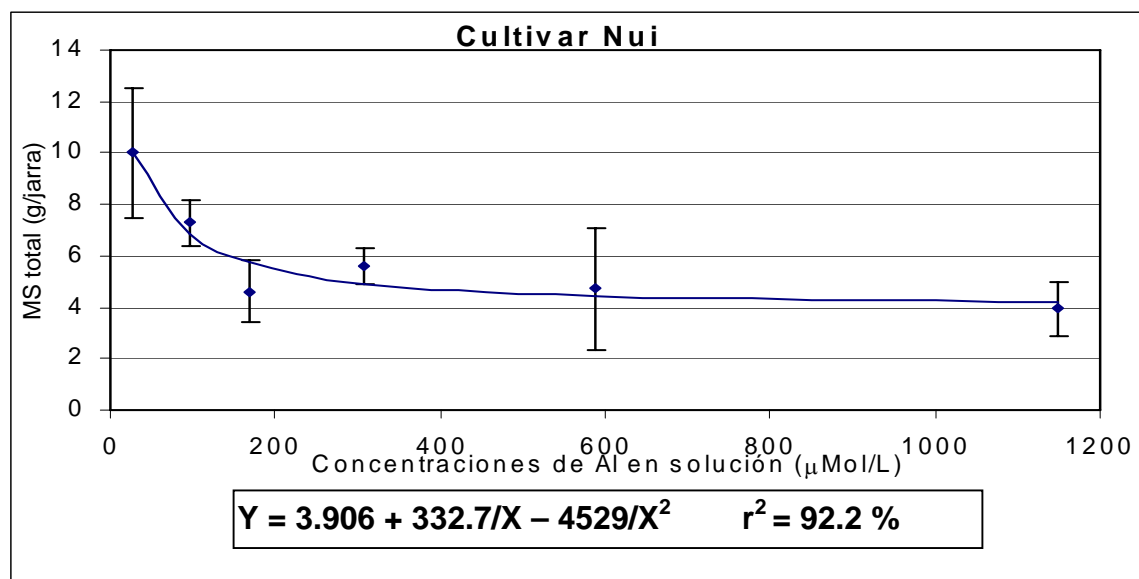
### ANEXO 20. Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries.



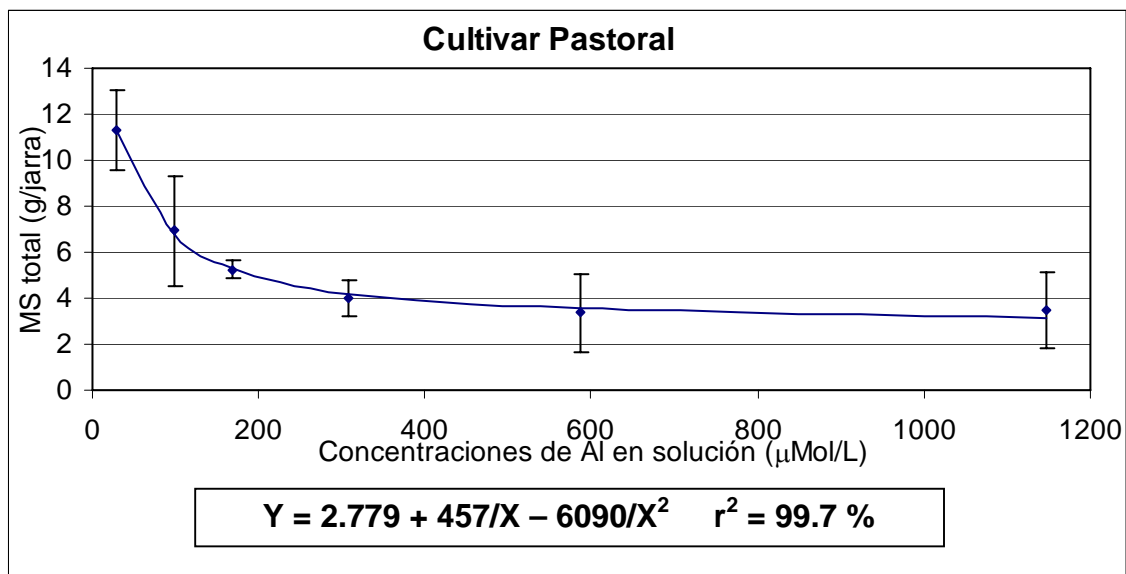
**ANEXO 21. Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Kingston.**



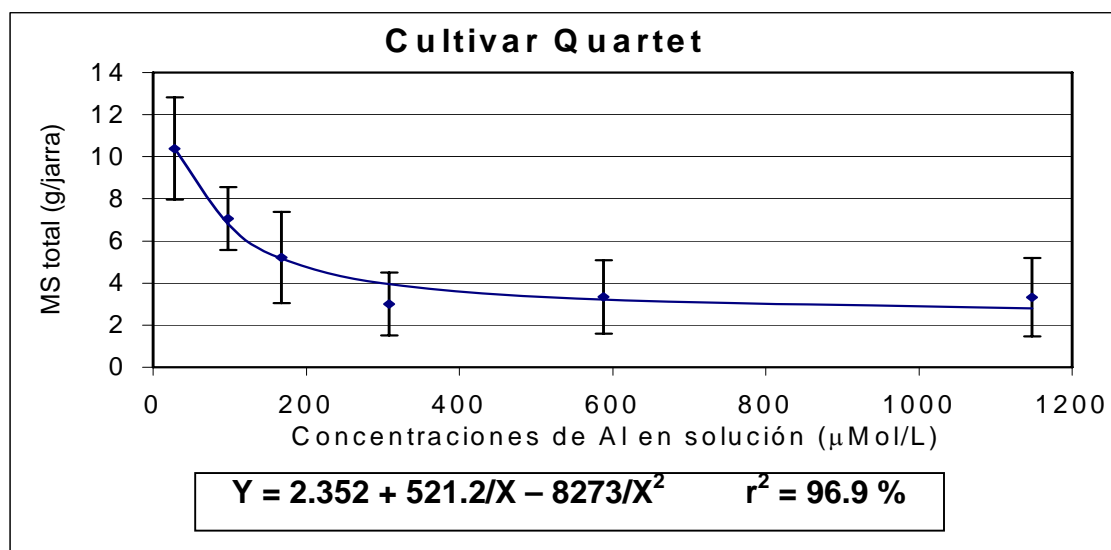
**ANEXO 22. Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Nui.**



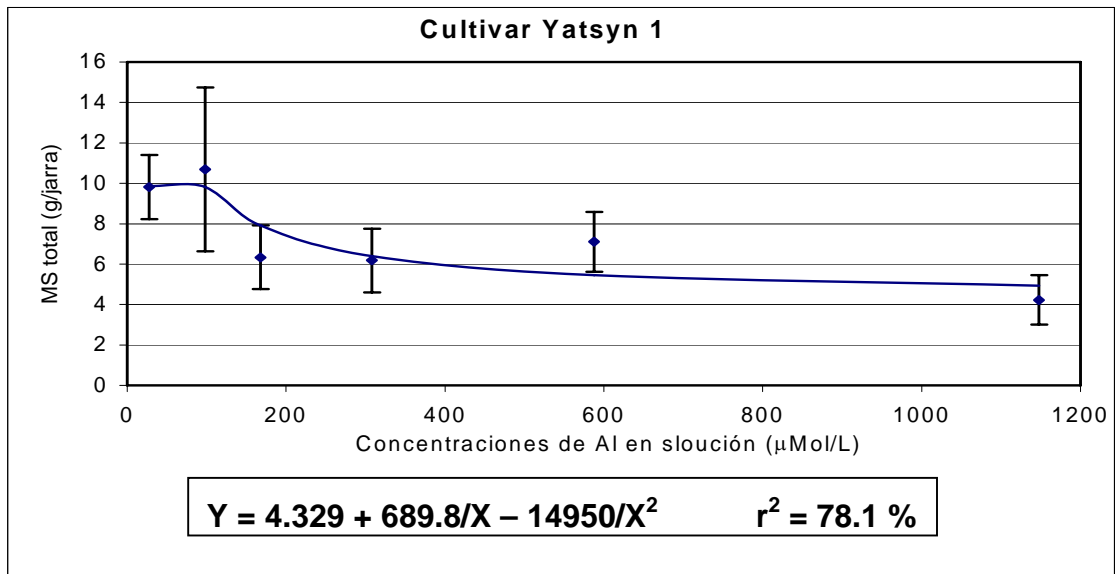
**ANEXO 23. Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Pastoral.**



**ANEXO 24. Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Quartet.**



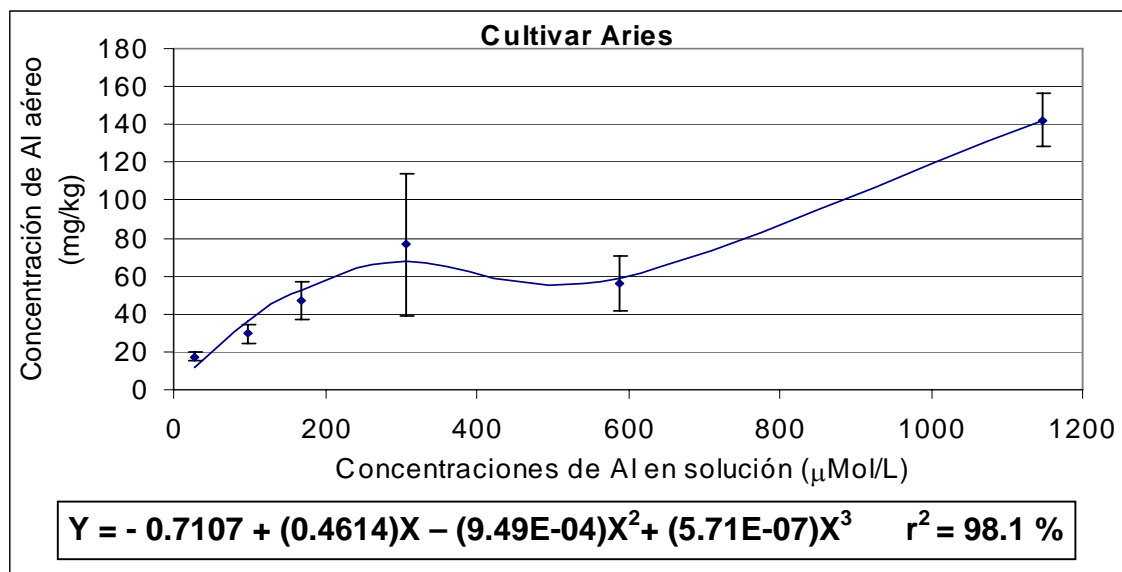
**ANEXO 25. Producción de MS total (g/jarra) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1.**



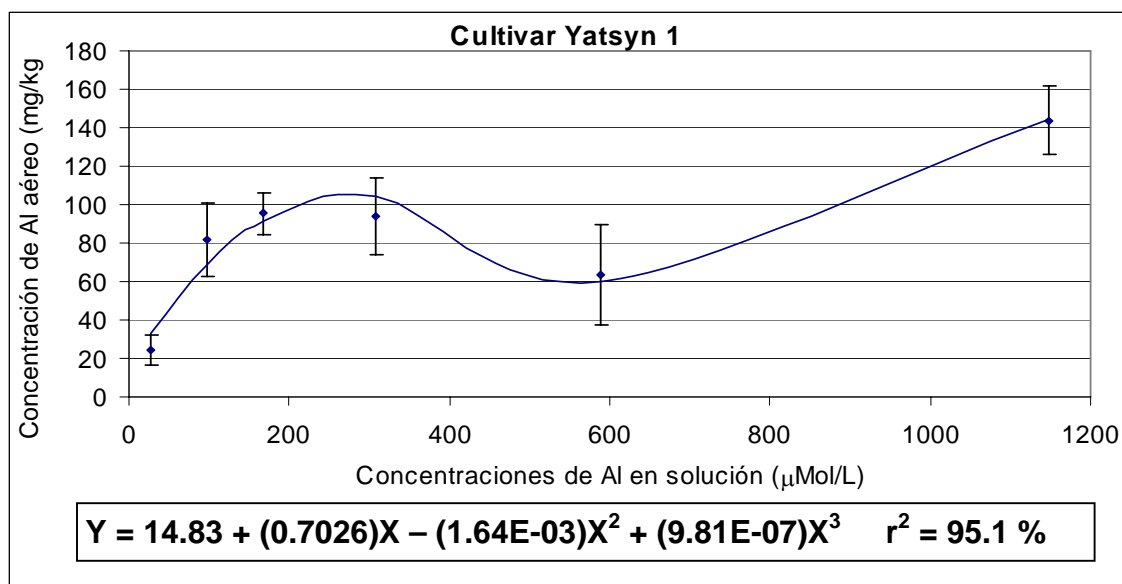
**ANEXO 26. Resultados del análisis de regresión de concentración de Al aéreo (mg/kg) de los cultivares.**

Modelo cúbico $Y = A + BX + CX^2 + DX^3$			
Concen. de Al aéreo	Aries	Yatsyn 1	Kingston
Error estándar			
A	11.2	15.66	17.49
B	0.1207	0.1688	0.1886
C	2.86E-04	4.01E-04	0.0004475
D	1.68E-07	2.35E-07	2.62E-07
Intervalos de confianza 95%			
A	-48.89 a 47.47	-52.57 a 82.23	-82.65 a 67.90
B	-0.05793 a 0.9807	-0.02388 a 1.429	0.1434 a 1.766
C	-0.002181 a 0.0002835	-0.003364 a 8.3780e- 005	-0.003643 a 0.0002077
D	-1.5070e-007 a 1.2920e-006	-2.8530e-008 a 1.9900e-006	-2.2780e-007 a 2.0270e-006
Suma de cuadrados absoluta	191.7	375.2	468
Modelo lineal inverso extendido $Y = A + BX + C/X$			
Concen. de Al aéreo	Nui	Pastoral	Quartet
Error estándar			
A	18.68	5.178	8.033
B	0.0269	0.007457	0.01157
C	853.4	236.5	367
Intervalos de confianza 95%			
A	60.63 a 179.5	91.03 a 124.0	157.2 a 208.4
B	-0.05891 a 0.1123	-0.02321 a 0.02424	-0.01412 a 0.05951
C	-5779 a -347.4	-2255 a -749.8	-5846 a -3510
Suma de cuadrados absoluta	1251	96.08	231.3

**ANEXO 27. Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries.**

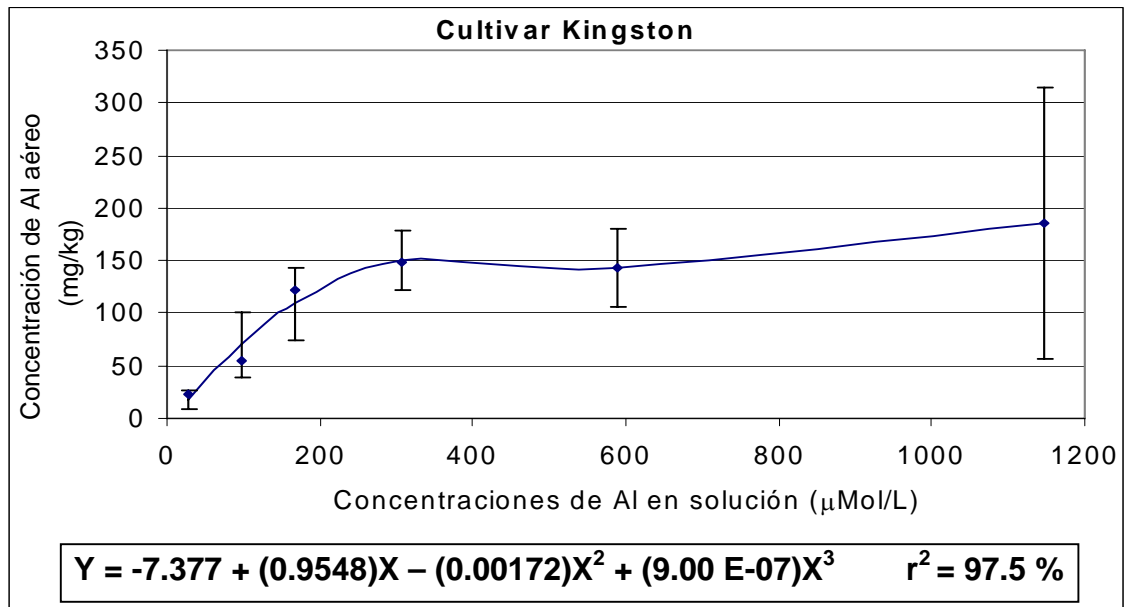


**ANEXO 28. Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1.**

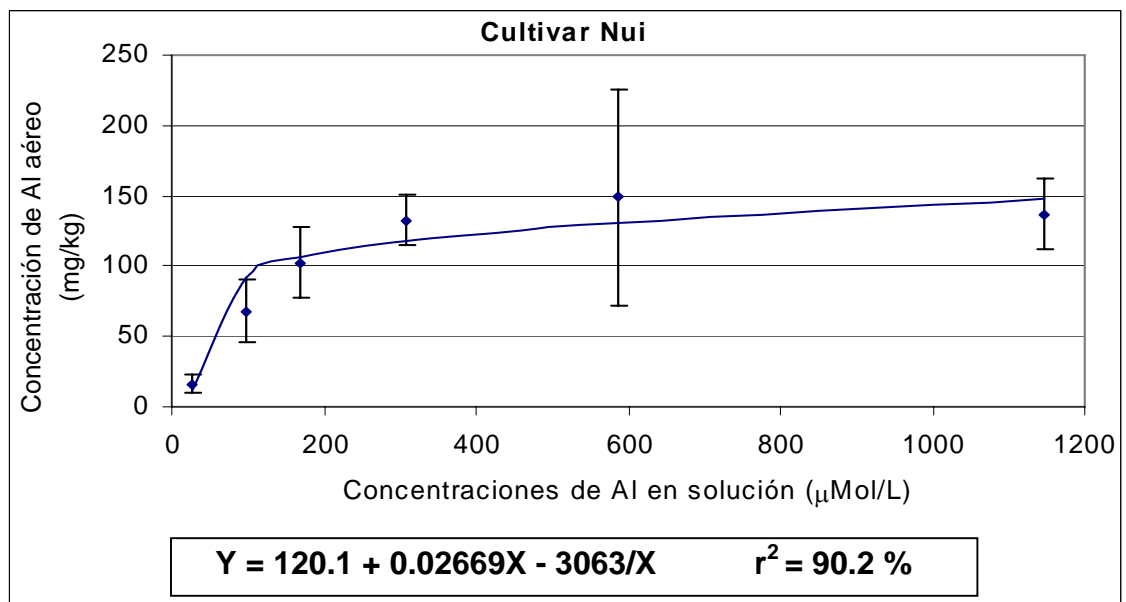




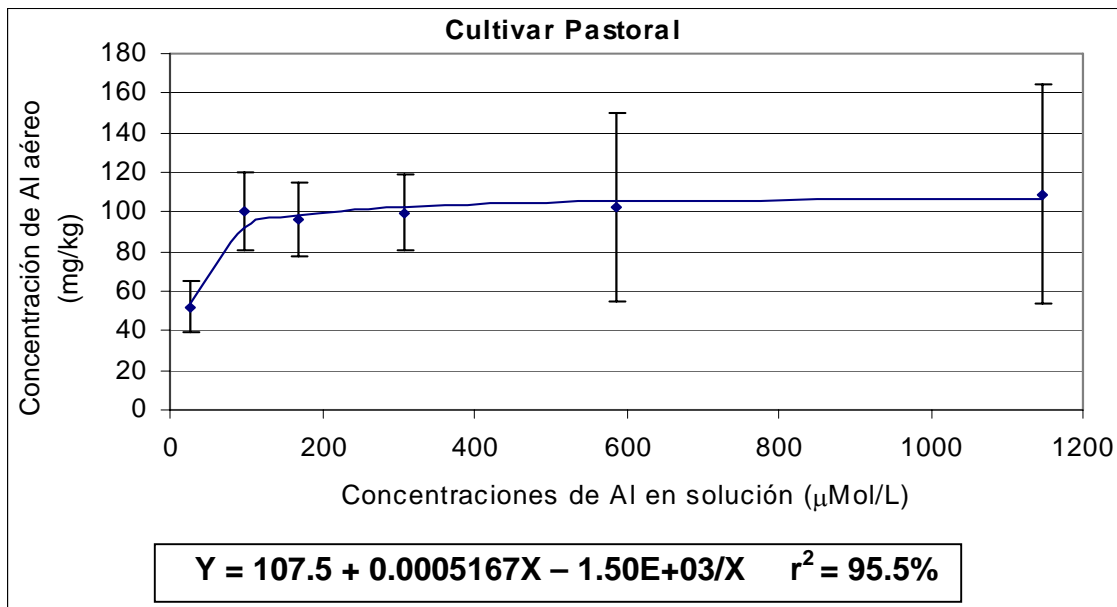
**ANEXO 29. Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Kingston.**



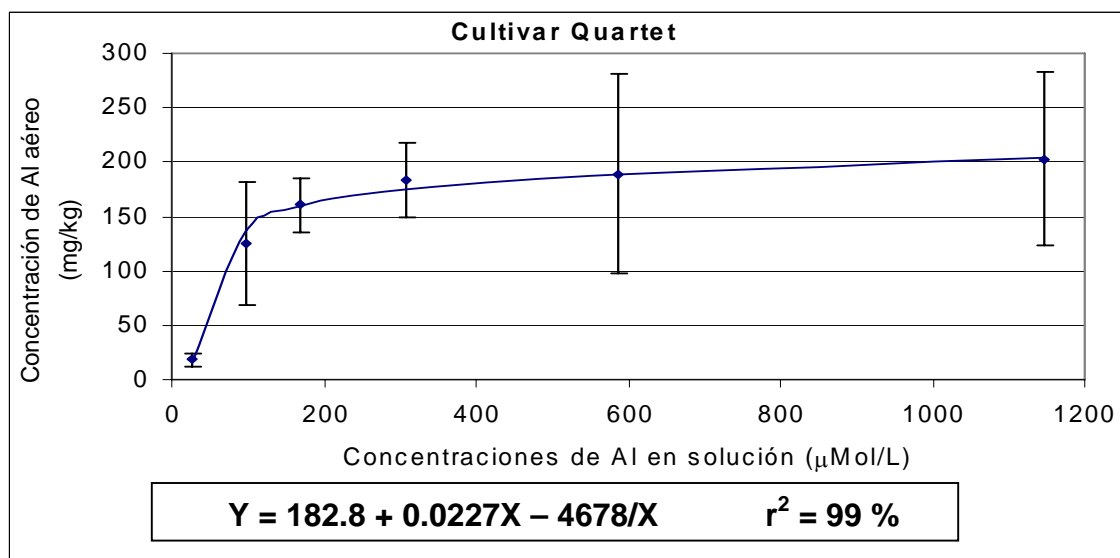
**ANEXO 30. Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Nui.**



**ANEXO 31. Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Pastoral.**



**ANEXO 32. Concentración de Al aéreo (mg/kg) promedio tratamiento (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Quartet.**

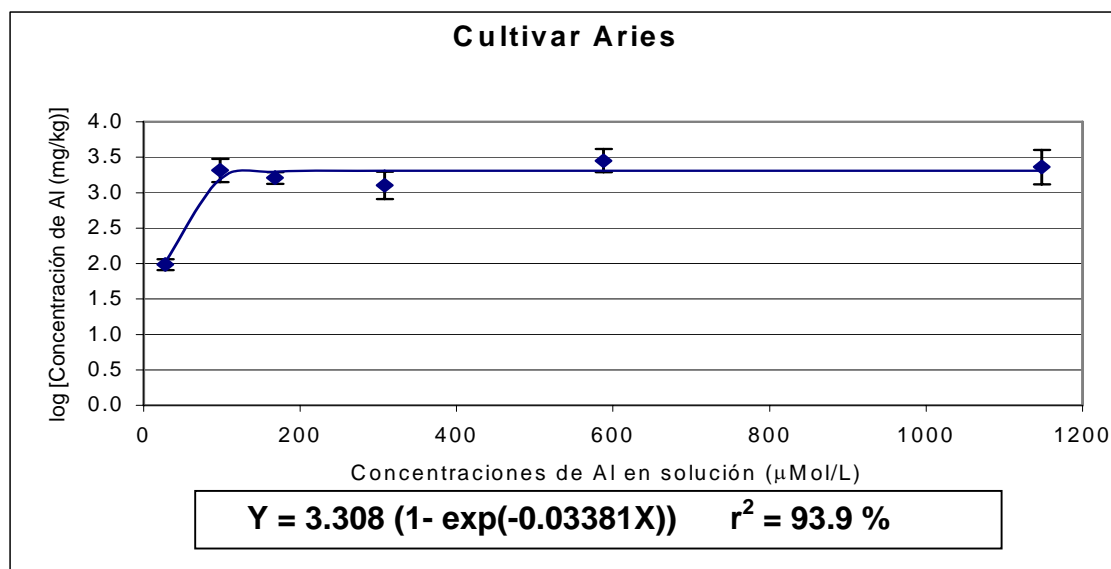


### ANEXO 33. Resultados del análisis de regresión de concentración de Al radical (mg/kg) de los cultivares.

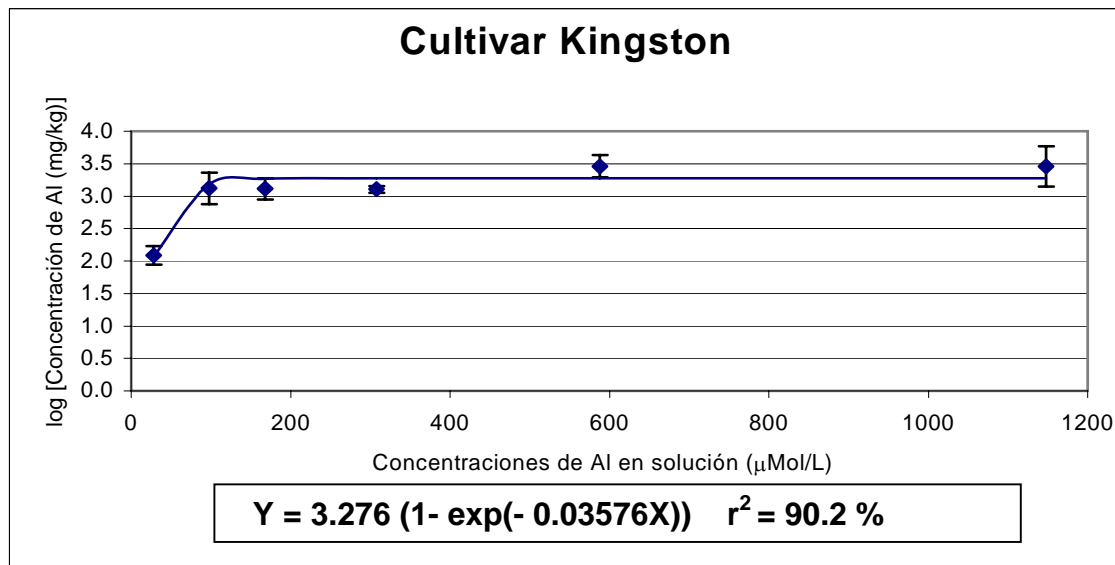
Modelo exponencial  $Y = Y_{\max} * (1 - \exp(-KX))$

Concen. Al radical	Aries	Kingston	Nui
Error estándar			
YMAX	0.04208	0.04987	0.05083
K	0.002556	0.003283	0.003334
Intervalos de confianza 95%			
YMAX	3.222 a 3.394	3.174 a 3.378	3.214 a 3.422
K	0.02858 a 0.03905	0.02904 a 0.04249	0.02919 a 0.04285
HalfLife	24.26 a 17.75	23.86 a 16.31	23.74 a 16.18
Suma de cuadrados absoluta	1.098	1.567	1.632
Concen. Al radical	Pastoral	Quartet	Yatsyn 1
Error estándar			
YMAX	0.05905	0.05081	0.04342
K	0.003414	0.002932	0.002717
Intervalos de confianza 95%			
YMAX	3.096 to 3.338	3.090 to 3.298	3.182 to 3.360
K	0.02480 to 0.03878	0.02555 to 0.03756	0.02875 to 0.03988
HalfLife	27.95 to 17.87	27.13 to 18.46	24.11 to 17.38
Suma de cuadrados absoluta	2.119	1.565	1.174

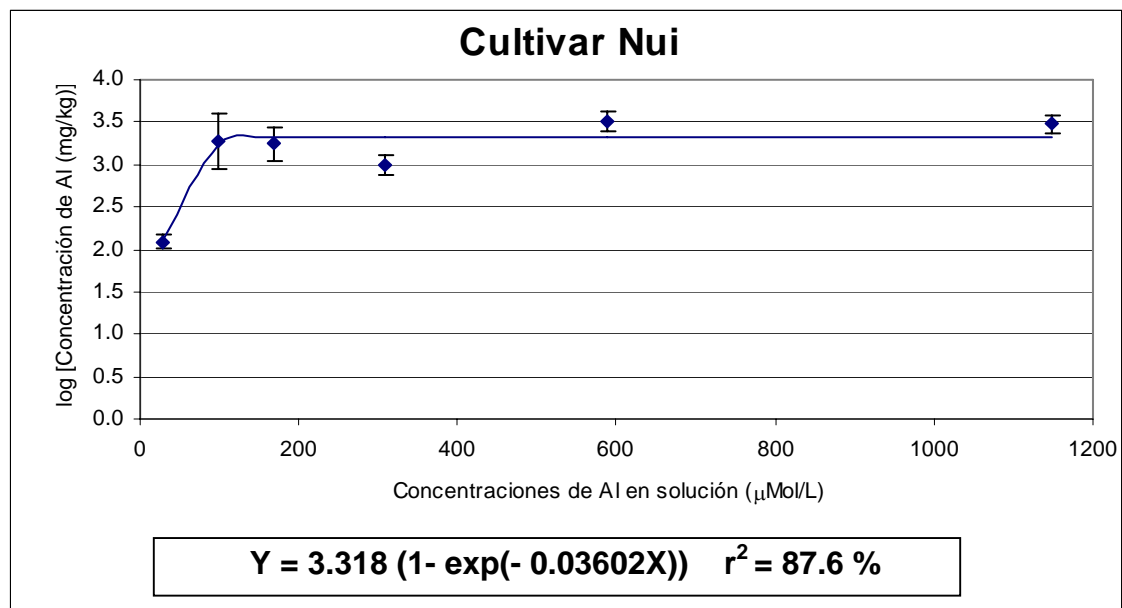
### ANEXO 34. log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Aries.



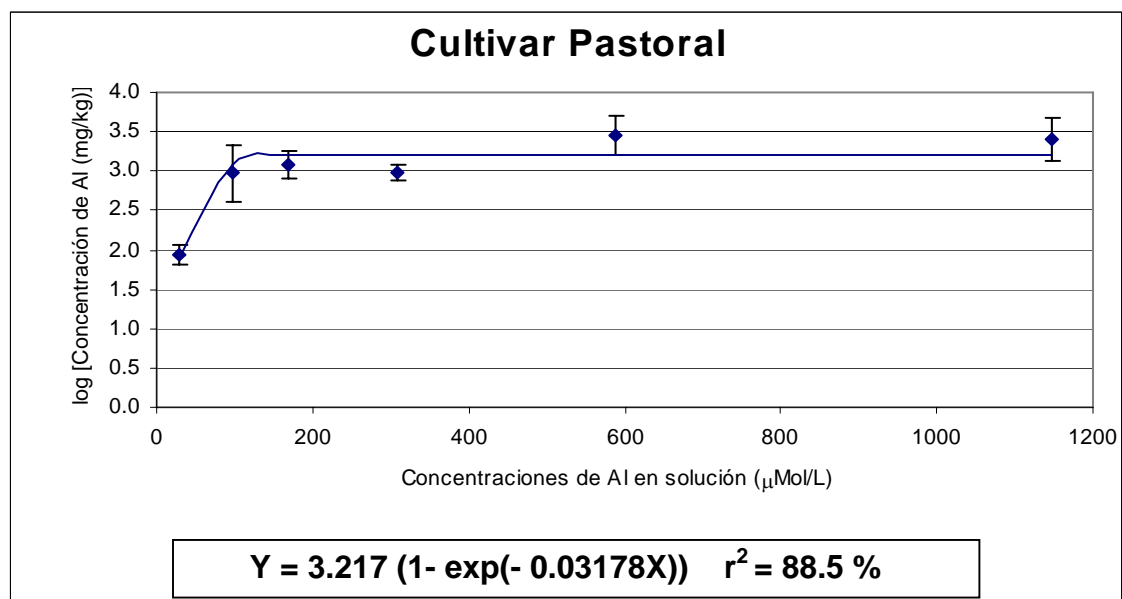
**ANEXO 35. log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Kingston.**



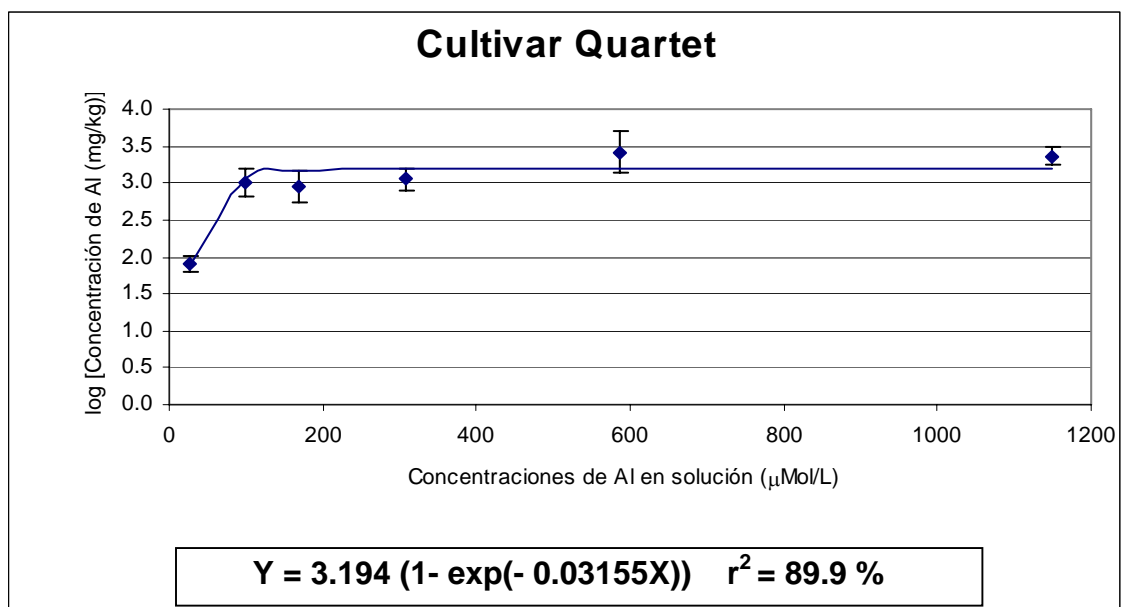
**ANEXO 36. log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Nui.**



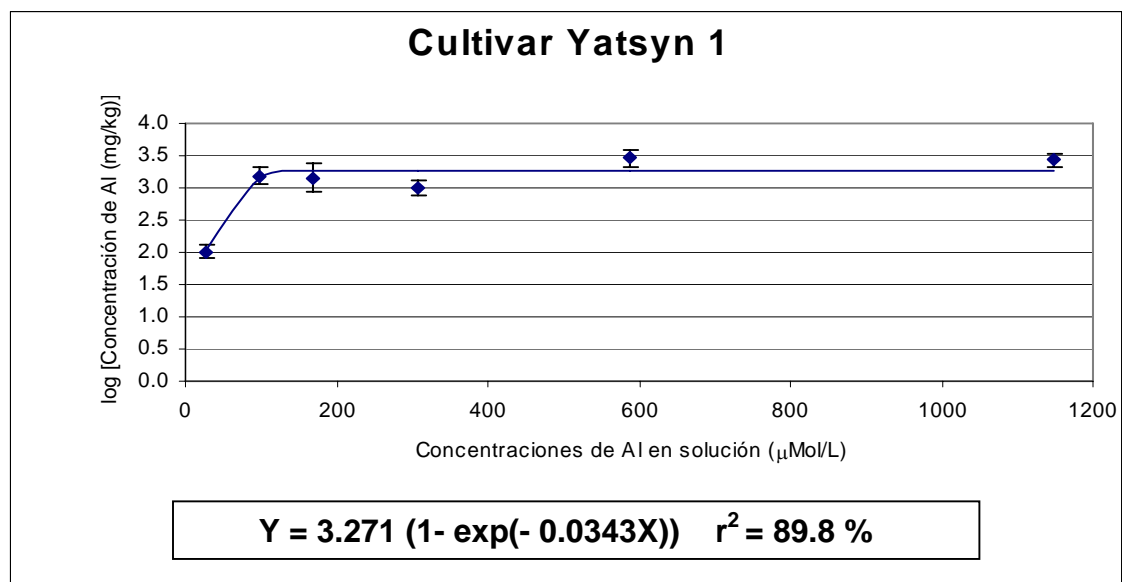
**ANEXO 37. log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Pastoral.**



**ANEXO 38. log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Quartet.**



**ANEXO 39. log [Concentración de Al radical (mg/kg) promedio tratamiento] (+d.e.) y curva de regresión para el cultivar Yatsyn 1.**



**ANEXO 40. Determinación de la actividad del Al necesaria para reducir la producción de MS total al 75 Y 50% (RY<sub>50</sub>), en base al modelo cuadrático inverso.**

$$RY_{75} = MS_{0 \mu\text{mol Al/L}} * 0.75$$

$$RY_{50} = MS_{0 \mu\text{mol Al/L}} * 0.50$$

**ANEXO 41. Reducción del rendimiento cultivar Aries.**

$$Y = 3.096 + 639.9/X - 12940/X^2$$

$$RY_{75} = 7.06 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y=7.06 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 137.78 \mu\text{Mol Al/L.}$$

$$RY_{50} = 4.71 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y=4.71 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 376.145 \mu\text{Mol Al/L.}$$

**ANEXO 42. Reducción del rendimiento cultivar Kingston.**

$$Y = 3.095 + 537.7/X - 9888/X^2$$

$$RY_{75} = 7.25 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 7.25 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 107.20 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$

$$RY_{50} = 6.61 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 6.61 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 289.61 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$

**ANEXO 43. Reducción del rendimiento cultivar Nui.**

$$Y = 3.906 + 332.7/X - 4529/X^2$$

$$RY_{75} = 7.51 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 7.51 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 75.73 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$

$$RY_{50} = 5.01 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 5.01 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 288.02 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$

**ANEXO 44. Reducción del rendimiento cultivar Pastoral.**

$$Y = 2.779 + 457/X - 6090/X^2$$

$$RY_{75} = 8.50 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 8.50 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 62.96 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$

$$RY_{50} = 5.66 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 5.66 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 143.52 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$

**ANEXO 45. Reducción del rendimiento cultivar Quartet.**

$$Y = 2.352 + 521.2/X - 8273/X^2$$

$$RY_{75} = 7.81 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 7.81 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 75.49 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$

$$RY_{50} = 5.20 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 5.20 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 165.25 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$

**ANEXO 46. Reducción del rendimiento cultivar Yatsyn 1.**

$$Y = 4.329 + 689.8/X - 14950/X^2$$

$$RY_{75} = 7.39 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 7.39 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 201.14 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$

$$RY_{50} = 4.92 \text{ g/jarra} \quad \text{Si } Y = 4.92 \text{ g/jarra} \Rightarrow X = 1133.21 \text{ } \mu\text{Mol Al/L.}$$