

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Tesis para optar por el grado académico de:

Doctor en Ciencias Agrarias

*Pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma:
caracterización y recuperación.*

Víctor Humberto Caruso

Director: Ph. D. Jorge Gieco

Codirector: Dr. José Luis Arzeno

Esperanza, Argentina 2022

Dedicado a:

Mis padres: Coquito y Grazia

Mi esposa e hijos: Daniela, María Lujan, Joaquín y Victoria

Mis hermanos: Gabriel y Miky.

Listado de abreviaturas

msnm	metro sobre el nivel del mar
MPa	Mega Pascal
NO	Noroeste
SE	Sureste
Pcia	Provincia
S	Sur
O	Oeste
Lm	Asociación de suelo La Merced
Cs	Asociación de suelo Cerrillos
Su	Asociación de suelo Sumalao
IVN	Índice verde de vegetación normalizado
IRC	Reflectividad en el infrarrojo cercano
R	Reflectividad en el rojo
SIG	Sistema de Información Geográfica
WGS 84	Sistema de referencia de coordenadas World Geodetic System 1984
QGIS	Programa informático Quantum GIS
A	Arenoso
AF	Areno franco
FA	Franco arenoso
F	Franco
FL	Franco limoso
FaA	Franco arcillo arenoso
L	Limoso
a	Arcilloso
Fa	Franco arcilloso
FaL	Franco arcillo limoso
aL	Arcillo limoso
aA	Arcillo arenoso
AIC	Akaike's Information Criterion
BIC	Schwarz's Bayesian Information Criterion
dap	densidad aparente
EAS	Estabilidad de los agregados del suelo
MO	Materia orgánica
CE	Conductividad eléctrica
IMO	Índice de materia orgánica
ACP	Análisis de componentes principales
CP	Componentes principales
EEA INTA	Estación Experimental Agropecuaria del INTA
UE	Unidad experimental
R	Software estadístico R
IC	Índice de compactación
SUE	Saca muestra de uso extendido

Contenidos

Capítulo 1	Introducción y organización de la tesis.
Capítulo 2	Pasturas de alfalfa en el área de estudio del Valle de Lerma.
Capítulo 3	Demografía e indicadores de calidad de suelo en pastura de alfalfa durante el primer año de uso en el Valle de Lerma
Capítulo 4	Densidad de plantas de alfalfa en relación a la variedad y la densidad de siembra en el Valle de Lerma.
Capítulo 5	Recuperación de pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma con subsolado más encalado
Capítulo 6	Discusión y conclusiones.

Índice de contenidos

Capítulo 1: Introducción y Organización de la tesis.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	5
Capítulo 2: Pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma, Provincia de Salta...	7
2.1. REGIONES AGROECONÓMICAS HOMOGÉNEAS DE LA PROVINCIA DE SALTA.....	8
2.2. EL VALLE DE LERMA.....	8
2.2.1. <i>Clima del Valle de Lerma</i>	9
2.2.2. <i>Fisiografía del Valle de Lerma</i>	16
2.2.3. <i>Sistemas productivos del Valle de Lerma</i>	17
2.3. ÁREA DE ESTUDIO.....	18
2.4. <i>CUANTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS PASTURAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO</i>	20
2.5. RESUMEN.....	33

Capítulo 3: Demografía e indicadores de calidad de suelo en pastura de alfalfa durante el primer año de uso en el Valle de Lerma.....	35
3.1. INTRODUCCIÓN.....	36
3.1.1. Indicadores de calidad de suelo.....	37
3.1.2. Sistema pastoril.....	39
3.1.3. Problemática de las pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma.....	41
3.2. OBJETIVO E HIPOTESIS.....	47
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.3.1. Ubicación y características de los sitios evaluados.....	48
3.3.2. Características de los suelos analizados.....	49
3.3.3. Manejo del cultivo de alfalfa.....	51
3.3.4. Metodología de muestreo.....	51
3.3.5. Variables analizadas.....	52
3.3.5.1. Variables de suelo.....	52
3.3.5.1.1. Textura.....	52
3.3.5.1.2. Densidad aparente.....	53
3.3.5.1.3. Estabilidad de los agregados.....	54
3.3.5.1.4. Materia orgánica.....	56
3.3.5.1.5. Fósforo.....	56
3.3.5.1.6. pH.....	57
3.3.5.1.7. Conductividad eléctrica.....	57
3.3.5.2. Variables del cultivo.....	58
3.3.5.2.1. Densidad de plantas.....	58
3.3.6. Análisis estadístico.....	58
3.3.7. Análisis multivariado.....	59
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
3.4.1. Agrupamiento de los sitios evaluados.....	60
3.4.2. Demografía y compactación del suelo en pasturas de alfalfa del Valle de Lerma.....	62
3.4.2.1. Análisis de los cambios en la densidad de plantas.....	63
3.4.2.2. Cambios en la densidad del suelo.....	65
3.4.3. Análisis de indicadores de calidad de suelo adicionales.....	68
3.4.3.1. Estabilidad de los agregados del suelo.....	68

3.4.3.2. Materia orgánica.....	69
3.4.3.3. Fósforo.....	69
3.4.3.4. pH.....	70
3.4.3.5. Conductividad eléctrica.....	71
3.4.3.6. Índice de materia orgánica.....	71
3.4.4. Análisis multivariado.....	71
3.5. CONCLUSIONES.....	76
Capítulo 4. Población de alfalfa en relación a la variedad y la densidad de siembra en el Valle de Lerma.....	77
4.1. INTRODUCCIÓN.....	78
4.1.1. Recuperación de pasturas de alfalfa.....	79
4.2. OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	80
4.3. EXPERIMENTO I.....	81
4.3.1. Materiales y métodos.....	81
4.3.1.1. Ubicación geográfica.....	81
4.3.1.2. Datos climáticos.....	81
4.3.1.3. Características del suelo.....	82
4.3.1.4. Pastura evaluada.....	83
4.3.1.5. Unidad experimental.....	83
4.3.1.6. Variables analizadas.....	84
4.3.1.6.1. Densidad de plantas.....	84
4.3.1.6.2. Densidad aparente 0-10 cm.....	84
4.3.1.7. Análisis estadístico.....	84
4.3.1.8. Análisis de regresión.....	85
4.3.1.9. Análisis de laboratorio.....	86
4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	86
4.4.1. Cambios en la densidad de plantas de alfalfa.....	86
4.4.2. Densidad aparente del suelo.....	89
4.4.3. Estabilidad de los agregados del suelo.....	91
4.4.4. Materia orgánica.....	92
4.4.5. Regresión lineal.....	92
4.5. CONCLUSIONES DEL EXPERIMENTO I.....	93
4.6. EXPERIMENTO II.....	93

4.6.1. Materiales y métodos.....	93
4.6.1.1. Ubicación del ensayo.....	93
4.6.1.2. Características del suelo.....	94
4.6.1.3. Pastura a evaluar.....	94
4.6.1.4. Diseño del experimento.....	96
4.6.1.5. Variables evaluadas.....	96
4.6.1.6. Análisis estadísticos.....	96
4.6.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	97
4.6.2.1. Cambios en la densidad de plantas de alfalfa.....	97
4.6.2.2. Estabilidad de los agregados del suelo.....	99
4.6.2.3. Densidad aparente del suelo.....	101
4.6.3. Conclusiones del experimento II.....	102
4.7. Conclusiones.....	103
Capítulo 5. Recuperación de pasturas de alfalfa con subsolado más adición de yeso en el Valle de Lerma.....	104
5.1. INTRODUCCIÓN.....	105
5.2. RECUPERACIÓN DE PASTURAS.....	108
5.3. CONTROL DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO.....	116
5.4. PLANTEO DE OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	118
5.5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	118
5.5.1. Ubicación del ensayo.....	118
5.5.1.1. Datos climáticos registrados durante la evaluación.....	119
5.5.2. Pastura evaluada.....	120
5.5.3. Descripción del implemento utilizado.....	120
5.5.4. Yeso agrícola peleteado.....	122
5.5.5. Diseño del experimento.....	123
5.5.6. Variables analizadas.....	124
5.5.6.1. Densidad de plantas.....	124
5.5.6.2. Producción de materia seca.....	124
5.5.6.3. Densidad aparente del suelo.....	125
5.5.6.4. Estabilidad de los agregados del suelo.....	126
5.5.6.5. Materia orgánica del suelo.....	126
5.5.6.6. pH del suelo.....	127

5.5.6.7.	Conductividad eléctrica del suelo.....	127
5.5.6.8.	Resistencia mecánica del suelo.....	127
5.5.7.	Tamaño de partículas del suelo.....	128
5.5.8.	Análisis estadísticos.....	128
5.6.	RESULTADOS.....	129
5.6.1.	Análisis del tamaño de partículas.....	129
5.6.2.	Modelos estadísticos.....	130
5.6.3.	Cambios en la pastura.....	130
5.6.3.1.	Densidad de plantas.....	130
5.6.3.2.	Producción de materia seca.....	134
5.6.4.	Cambios en el suelo.....	139
5.6.4.1	Indicadores físicos.....	139
5.6.4.1.1.	Densidad aparente de 0 a 5 cm (dap 0-5).....	139
5.6.4.1.2.	Densidad aparente de 5 a 10 cm (dap 5-10).....	140
5.6.4.1.3.	Densidad aparente 10 a 30 cm (dap 10-30).....	142
5.6.4.1.4.	Densidad relativa.....	143
5.6.4.2.	Resistencia mecánica del suelo.....	145
5.6.4.3.	Estabilidad de los agregados del suelo.....	147
5.6.5.	Indicadores químicos del suelo.....	150
5.6.5.1.	Materia orgánica del suelo.....	150
5.6.5.2.	pH del suelo.....	153
5.6.5.3.	Conductividad eléctrica del suelo.....	153
5.7.	CONCLUSIONES.....	154
	Capítulo 6. Discusión general.....	156
	Capítulo 7. Bibliografía.....	162

Índice de cuadros

2.1.	Valores promedios de precipitación media (pp), temperatura promedio (T media), temperatura media máxima (T media max) y temperatura media mínima (T media min), de la localidad Cerrillos, (Valle de Lerma, Pcia. Salta).....	10
3.1.	Valores de precipitación media (pp), temperatura promedio (T media), temperatura media máxima (T media max) y temperatura media mínima (T media min), registrados entre mayo de 2015 y mayo de 2016 en la localidad Cerrillos (Valle de Lerma, Pcia. de Salta).....	49

3.2.	Clasificación textural y granulometría de los diferentes sitios evaluados. (Franco Arenosos (FA), Franco (F), Franco Limosos (FL) y Franco arcillo Limoso (FaL)).....	60
3.3.	Matrices de distancias Euclidea de los sitios donde se evaluaron los cambios en las pasturas y el suelo antes del primer pastoreo y al final del primer año de uso, bajo los efectos de la textura (Franco Arenoso (FA), Franco (F), Franco Limoso (FL) y Franco arcillo Limoso (FaL)).....	61
3.4.	Cambios en la densidad de plantas de alfalfa (n° plantas) y en la densidad aparente del suelo 0-5 cm (dap 0-5) y 5-10 cm (dap 5-10) antes del primer pastoreo (T1) y al final del primer año de uso (T2) en los sitios evaluados.....	62
3.5.	Cambios en la densidad de plantas (n° de plantas) antes del primer pastoreo (T1) y al final del primer año (T2) bajo el efecto de la textura del suelo.....	63
3.6.	Cambios en la densidad aparente 0-5 cm (dap 0-5) antes del primer pastoreo (T1) y al final del primer año (T2) bajo los efectos de la textura del suelo.....	66
3.7.	Cambios en la densidad aparente 5-10 cm (dap 5-10) antes del primer pastoreo (T1) y al final del primer año (T2) bajo los efectos de la textura del suelo.....	66
3.8.	Valores promedio de estabilidad de los agregados (EAS), materia orgánica 0-5 cm (MO 0-5), materia orgánica 0-10 (MO 0-10), fosforo (P), pH, conductividad eléctrica (CE), índice de materia orgánica 0-5 (IMO 0-5), índice de materia orgánica 0-10 (IMO 0-10), observados en los sitios evaluados.....	68
3.9.	Autovalores de los componentes principales (CP) del análisis multivariado entre las variables respuesta y los indicadores de suelo registrados en cada sitio analizado.....	72
3.10.	Correlación de las variables de componentes principales 1 y 2 (CP1 y CP2) del análisis multivariado entre las variables respuesta y los indicadores de suelo observados en cada sitio analizado. Con sombreado amarillo se destacan las variables con mayor influencia en cada componente principal.....	73
4.1.	Valores de precipitación media (pp), temperatura promedio (T media), temperatura media máxima (T media max) y temperatura media mínima (T media min), registrados entre julio de 2014 y julio de 2015 en la localidad Cerrillos (Valle de Lerma, Pcia. de Salta).....	82
4.2.	Evolución de la densidad de plantas de alfalfa (n° plantas) durante dos años (2014 y 2015) bajo el efecto de la variedad.....	87
4.3.	Valores de densidad aparente 0-10 cm (dap 0-10) durante el año 2015 bajo el efecto de la variedad.....	90

4.4.	Valores de estabilidad de los agregados del suelo (EAS) durante el año 2015 bajo el efecto de la variedad.....	91
4.5.	Valores de materia orgánica (MO) durante el año 2015 bajo el efecto de la variedad.....	92
4.6.	Cambios en cantidad de plantas de alfalfa (n° plantas), antes del primer pastoreo (T1), antes del verano (T2) y al final del primer año de uso (T3) bajo los efectos de la densidad de siembra (6 kg ha ⁻¹ (D6), 12 kg ha ⁻¹ (D12), 18 kg ha ⁻¹ (D18)).....	97
4.7.	Cambios en la estabilidad de los agregados del suelo (EAS), antes del primer pastoreo (T1), antes del verano (T2) y al final del primer año de uso (T3) bajo los efectos de la densidad de siembra (6 kg ha ⁻¹ (D6), 12 kg ha ⁻¹ (D12), 18 kg ha ⁻¹ (D18)).....	99
4.8.	Cambios en la densidad aparente entre 0-5 cm (dap 0-5) y la densidad aparente entre 5-10 cm (dap 5-10), antes del primer pastoreo (T1), antes del verano (T2) y al final del primer año de uso (T3) bajo los efectos de la densidad de siembra (6 kg ha ⁻¹ (D6), 12 kg ha ⁻¹ (D12), 18 kg ha ⁻¹ (D18)).....	101
5.1.	Valores de precipitación media (pp), temperatura promedio (T media), temperatura media máxima (T media max) y temperatura media mínima (T media min), registrados entre julio de 2016 y julio de 2017 en la localidad Cerrillos (Valle de Lerma, Pcia. de Salta).....	120
5.2.	Diseño del experimento de subsolado con adición de yeso.....	123
5.3.	Composición granulométrica del suelo de las parcelas donde se evaluó el subsolado profundo con adición de yeso.....	130
5.4.	Pruebas de hipótesis de los contrastes para el análisis de los cambios en la densidad de plantas en 2016 y 2017 en cada combinación Laboreo*Dosis.....	131
5.5.	Prueba de comparación de medias de la densidad de plantas (n° de plantas) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha ⁻¹).....	132
5.6.	Producción de materia seca de alfalfa (Producción de MS) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha ⁻¹).....	135
5.7.	Contrastes de la diferencia de la producción de materia seca (MS) para el análisis de la interacción Laboreo*Dosis en el corte de julio 2016 bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha ⁻¹).....	136
5.8.	Prueba de comparación de medias para la producción de materia seca (Producción de MS) en siete cortes representativos durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y	137

	CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha ⁻¹).....	
5.9.	Prueba de comparación de medias de dap 0-5 durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).....	139
5.10.	Prueba de comparación de medias dap 5-10 para el efecto Laboreo durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).....	142
5.11.	Prueba t apareada para la densidad aparente 10-20 y 20-30 al final del experimento (2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha ⁻¹).....	143
5.12.	Densidad relativa 0 a 5 cm (DR 0-5) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).....	144
5.13.	Densidad relativa 5 a 10 cm (DR 5-10) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).....	145
5.14.	Prueba t apareada para la resistencia mecánica del suelo (RM) durante el final de la evaluación (2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).....	146
5.15.	Cambios en estabilidad de los agregados del suelo (EAS) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).....	148
5.16.	Cambios en la materia orgánica del suelo (MO) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).....	150
5.17.	Prueba de comparación de medias para el pH durante dos años (2016-2017).....	153
5.18.	Prueba de comparación de medias de la conductividad eléctrica (mmhos cm) durante dos años (2016-2017).....	154

Índice de figuras

2.1.	Regiones agroeconómicas homogéneas de la Provincia de Salta.....	9
2.2.	Departamentos del Valle de Lerma, Pcia. de Salta, sobre imagen satelital Sentinel S2A_20180715.....	11
2.3.	Localidades del Valle de Lerma, Pcia. de Salta, sobre imagen satelital Sentinel S2A_20180715.....	12
2.4.	Temperatura media del Valle de Lerma, Pcia. de Salta.....	14

2.5.	Distribución de la precipitación anual (mm) en el Valle de Lerma, Pcia. de Salta, sobre imagen satelital Sentinel S2A_20180715.....	15
2.6.	Balance hídrico de la localidad Cerrillos (Valle de Lerma, Pcia. de Salta).....	16
2.7.	Área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta, en base a las asociaciones de suelo La Merced (Lm), Cerrillos (Cs) y Sumalao (Su); y el límite de la ciudad de Salta.....	19
2.8.	IVN del 20180620 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20180620.....	24
2.9.	IVN del 20180715 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20180715.....	25
2.10.	IVN del 20180824 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20180824.....	25
2.11.	IVN del 20180923 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20180923.....	26
2.12.	IVN del 20181018 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20181018.....	26
2.13.	IVN del 20181102 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20181102.....	27
2.14.	IVN del 20190620 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20190620.....	27
2.15.	IVN del 20190720 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20190720.....	28
2.16.	IVN del 20190824 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20190824.....	28
2.17.	IVN del 20190918 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20190918.....	29
2.18.	IVN del 20191028 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20191028.....	29

2.19	IVN del 20191127 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20191127.....	30
2.20	Potreros con alfalfa en el área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta, durante el año 2018, en base a las asociaciones de suelo La Merced (Lm), Cerrillos (Cs) y Sumalao (Su).....	31
2.21	Potreros con alfalfa en el área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta, durante el año 2019, en base a las asociaciones de suelo La Merced (Lm), Cerrillos (Cs) y Sumalao (Su).....	32
3.1.	Componentes e interacciones de un sistema de pastoreo.....	40
3.2.	Diagrama conceptual mostrando cambios en la pastura por la compactación del suelo.....	43
3.3.	Densidad de suelo (g cm^{-3}) que limita el crecimiento de las raíces según la textura del suelo.....	46
3.4.	Ubicación de los sitios donde se evaluaron los cambios en las pasturas y el suelo antes del primer pastoreo y al final del primer año de uso, sobre un mapa de las asociaciones de suelos y la red vial de la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta (área de estudio).....	48
3.5.	Cilindros para la determinación de densidad aparente del suelo.....	53
3.6.	Microtamices utilizados para la determinación de la estabilidad de los agregados del suelo.....	55
3.7.	Tamizado en húmedo usando microtamices, con movimientos oscilatorios durante la determinación de la estabilidad de los agregados del suelo.....	55
3.8.	Relación entre las variables respuesta, los indicadores de suelo y los sitios evaluados en un gráfico Biplot de acuerdo a los Componentes Principales 1 y 2 (CP 1 y CP 2).....	74
3.9.	Agrupamiento de los sitios donde se evaluaron los cambios en las pasturas y el suelo antes del primer pastoreo y al final del primer año de uso, en grafico dendrograma.....	75
4.1.	Lote donde se evaluó el efecto de la densidad de siembra sobre la cantidad de plantas de alfalfa en relación a cambios en el suelo. Al final del cultivo antecesor (tabaco) y previo al laboreo del suelo para la implantación de la pastura.....	94
4.2.	Estado del lote donde se evaluó el efecto de la densidad de siembra sobre la cantidad de plantas de alfalfa en relación a cambios en el suelo, previo a la siembra de la pastura.....	95
5.1.	Diagrama conceptual del efecto de la compactación sobre una pastura en sistemas pastoriles.....	109
5.2.	Umrales bióticos y abióticos para pasturas en pastoreo.....	111
5.3.	Detalle del subsolador profundo de arrastre.....	121

5.4.	Subsolador profundo de arrastre con dos brazos angulados.....	121
5.5.	Laboreo con subsolador profundo.....	122
5.6.	Cambios en la densidad de alfalfa (n° de plantas) para la interacción Dosis *Laboreo. Bock plot con error estándar para cada combinación de tratamientos en cada fecha.....	133
5.7.	Producción de materia seca (Producción de MS) para la interacción Laboreo*Tiempo durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha ⁻¹).....	138
5.8.	Resistencia mecánica del suelo durante el año 2017 bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).....	147

Resumen

El Valle de Lerma es una región intermontana, ubicado en la provincia de Salta, entre las sierras subandina y las laderas orientales de la puna. En su porción central, se desarrolla una importante actividad pecuaria, siendo la alfalfa, la principal pastura de estas explotaciones. El objetivo de esta tesis es describir las pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma y evaluar la eficacia de técnicas agronómicas para la recuperación de su población y rendimiento. El área de estudio se ubicó en los departamentos de Rosario de Lerma y Cerrillos, en el cono aluvial del río Toro, sobre las asociaciones de suelo La Merced y Cerrillos. A través del análisis de imágenes satelitales con el Índice Verde Normalizado (IVN), y de su corroboración en el terreno, se determinó que la superficie ocupada por pasturas de alfalfa fue de 2197 ha en 2018 y de 1953 ha en 2019. Se encontró relación entre el número de plantas y los siguientes indicadores de suelo: estabilidad de los agregados; densidad aparente del suelo; porcentaje de arcilla e índice de materia orgánica. Por esta razón, éstos podrían ser usados para caracterizar la calidad del suelo con pasturas de alfalfa. Se determinó al primer pastoreo, una población promedio de 105 plantas m⁻², y, una disminución significativa, superior al 65%, de la densidad de plantas de alfalfa al final del primer año de aprovechamiento, que la acercaría al umbral mínimo de 30 plantas m⁻². Esta cantidad al final del primer año de aprovechamiento podría limitar la producción de la pastura. Se comprobó que la mejora en la población de alfalfa no estaría asociada solamente a incrementos en la densidad de siembra o a la elección de la variedad, sino que, adicionalmente, se debería tener en cuenta la textura, la estabilidad de los agregados y la materia orgánica del suelo. Estos indicadores están asociados al nivel de densidad aparente del suelo, la cual superó en todos los casos los valores óptimos para el crecimiento de las raíces. Para disminuir el nivel de compactación del suelo, se usó un subsolador con brazos angulados separados a 90 cm y hasta 40 cm de profundidad, el cual no modificó la densidad inicial de plantas. El efecto conjunto del laboreo profundo y la aplicación de yeso en alta dosis (200 kg ha⁻¹) generó una mayor densidad de plantas de alfalfa; sin embargo, no aumentó la producción de forraje. El uso simultáneo de un descompactador y la adición de yeso no incrementó el rendimiento de forraje, ni tampoco mejoró la condición física del suelo. Este presentaba restricciones físicas que no fueron

disminuidas con el laboreo profundo y la aplicación de yeso. La cantidad de materia orgánica no sería suficiente para regenerar la estructura del suelo y formar agregados estables.

Abstract

The Lerma Valley is an intermountain region, located in the province of Salta, between the sub-Andean mountains and the eastern slopes of the puna. In its central portion, an important livestock activity is developed, with alfalfa being the main pasture of these farms. The objective of this thesis is to describe alfalfa pastures in Valle de Lerma and evaluate the effectiveness of agronomic techniques for the recovery of its population and yield. Based on this, the study area is located in the departments of Rosario de Lerma and Cerrillos, in the alluvial cone of the Toro River, on the La Merced and Cerrillos soil associations. Through the analysis of satellite images with Normalized Difference Time Series (NDVI), and their corroboration on the ground, it was determined that alfalfa pastures totaled 2,197 ha in 2018, and 1,953 ha in 2019. A relationship was found between the number of plants and the following soil indicators: aggregate stability; bulk density of soil; clay percentage and organic matter index. For this reason, they could be used to characterize soil quality with alfalfa pastures. At the first grazing, an average population of 105 plants m^{-2} was determined, and a significant decrease, greater than 65%, in the density of alfalfa plants at the end of the first year of use, which would bring it closer to the minimum threshold of 30 plants m^{-2} . This quantity at the end of the first harvesting year could limit pasture production. It was found that the improvement in the alfalfa population would not be associated only with increases in planting density or the choice of variety, but also that texture, aggregate stability and organic matter should be taken into account. ground. These indicators determine the level of bulk density of the soil, which in all cases exceeded the optimal values for root growth. In order to reduce the level of soil compaction, a subsoiler with angled arms separated at 90 cm and up to 40 cm deep was used, which did not modify the initial density of plants. The joint effect of deep tillage and the application of high-dose gypsum (200 kg ha^{-1}) generated a higher density of alfalfa plants, but without this being reflected in a higher forage production. With a population below the threshold of 30 plants m^{-2} , there would be no response to the treatments on production. The simultaneous use of a loosener and the addition of gypsum did not increase forage yield, nor did it improve the physical condition of the soil. This presented physical restrictions that were not diminished with deep tillage and the application of plaster. The amount of organic matter would not be enough to regenerate the soil structure and form stable aggregates.

Palabras claves

Alfalfa, índice verde normalizado, compactación del suelo, número de plantas

Keywords

Alfalfa, normalized difference vegetation index, soil compaction, stand

Productos derivados de la tesis

Resúmenes en congresos

- Caruso, H. 2016. Factores asociados al cambio del stand de plantas de alfalfa. Revista Argentina de Producción Animal. 36 (1): 358.
- Caruso, H., Pardo, P., Gieco, J. 2017. Demografía y densidad del suelo en pasturas de alfalfa en el primer año de uso. Revista Argentina de Producción Animal. 37 (1): 117.
- Caruso, H., Gieco, J., Huidobro, J., Pérez, C., Moneta, D., Alonso, N., Beltran, M., Escudero, J., López, E. 2018. Población de alfalfa en suelo franco arenoso. 41° Congreso Argentino de Producción Animal. Revista Argentina de Producción Animal. 38 (1): 238.
- Caruso, H., Gieco, J., Martínez, M., Cuellar, E., Aranda, F. 2018. Renovación de pasturas de alfalfa con subsolado y aplicación de yeso en el Valle de Lerma. Revista Argentina de Producción Animal. 38 (1): 237.
- Caruso, H., Gieco, J., González, E., López, E., Vargas, D., Roaleti, J., Moneta, D. 2020. Uso del IVN para estimar la superficie implantada con alfalfa en el Valle de Lerma, Provincia de Salta. Virtual

Publicación en revista científica

- Caruso, H; Gieco, J.; Martínez, M. 2020. ¿Puede el laboreo profundo y la aplicación de yeso promover la recuperación de pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma? Revista Argentina de Producción Animal. 40(2):77-84.

Capítulo 1

Introducción y Organización de la Tesis

1.1. ANTECEDENTES

La Provincia de Salta posee una amplia diversidad de sistemas de producción. En la zona central, entre las laderas orientales de la Puna, al este, y las sierras subandinas, al oeste (138), se ubica el Valle de Lerma. Se trata de una depresión intermontana elongada en sentido meridiano, con una superficie de 2.400 km² aproximadamente, donde se ubican explotaciones agrícolas y ganaderas, que representan el 22% de la actividad productiva provincial. Los sistemas productivos predominantes son el tabacalero, el porotero, el hortícola, el ganadero intensivo y el mixto agrícola ganadero (28, 138). Si bien existe una tendencia a la agricultura, la producción de leche y el engorde intensivo se destacan entre las actividades principales.

La alfalfa (*Medicago sativa L.*) es la principal especie forrajera en las explotaciones ganaderas del Valle de Lerma (173). Se utiliza pura o consociada (72). En el año 1984, se estimó en base a encuestas que las praderas artificiales totalizaban 2806 ha (37). Posteriormente, en el Censo Nacional Agropecuario 2002 (87), se informó que la alfalfa se cultivó en 2460 has. Se desconoce su superficie y distribución en la actualidad.

La producción de alfalfa puede ser analizada por los componentes de rendimiento forrajero: densidad de plantas por unidad de superficie, número de tallos por planta y peso por tallo (43, 151, 183), siendo la densidad de plantas la más importante durante el primer año de uso (129). En la región central de Santa Fe, una población de 250 plantas m⁻² a los 45 días es considerada adecuada para lograr pasturas altamente productivas (111) y se ha sugerido que debería mantenerse un valor mínimo de 30 plantas m⁻² para maximizar la producción de forraje (152). En el Valle de Lerma, la población al primer pastoreo se ubica entre 110 y 147

plantas m⁻², disminuyendo durante el primer año de utilización, entre 27 y 19 plantas m⁻² (38, 137).

Esta menor cantidad de plantas podría estar asociada con modificaciones en el suelo (41).

La alfalfa no prospera satisfactoriamente cuando existen capas de suelo compactadas que puedan restringir su desarrollo (15) y afectar su rendimiento (109).

En sistemas pastoriles, la pastura forma parte de un complejo ecosistema en el que existen diversos tipos de interacciones entre los animales, las plantas y el suelo (78). Cada elemento del sistema afecta y es afectado por los otros componentes en forma directa o indirecta (176).

El suelo afecta de manera directa a las pasturas por las modificaciones del espacio poroso y el cambio en el movimiento de agua y aire asociado con la alteración de la macroporosidad (76).

La compactación del suelo se define como la disminución de volumen que experimenta una determinada masa debido a fuerzas externas que actúan sobre él (82). Como consecuencia de la aplicación de presiones, las partículas del suelo son reorganizadas, se incrementa la densidad, disminuyen el espacio poroso, la retención hídrica y el intercambio gaseoso, aumenta la resistencia mecánica (48) y puede reducir el desarrollo radicular. Es difícil de visualizar e interpretar (82) y depende de propiedades intrínsecas del suelo tales como textura, materia orgánica y contenido hídrico (100), como así también de la frecuencia e intensidad de las fuerzas que actúan sobre el suelo (el tránsito de maquinaria agrícola, las operaciones de labranza y el pisoteo de los animales durante el pastoreo) (121).

La compactación de suelo se puede caracterizar mediante la densidad aparente, la resistencia mecánica del suelo y la estabilidad de los agregados (192). Pereyra et al. (137) describen, en suelos francos sin estructura y pastoreados, con más de 200 vacas en ordeño ha⁻¹,

incrementos continuos de la densidad aparente del suelo en pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma, desde $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ a los 10 cm de profundidad hasta $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ a los 30 cm.

Según Canevari y Putnam (36), se pueden tomar dos decisiones de manejo sobre pasturas de alfalfa con problemas de compactación de suelo y baja cantidad de plantas: a) reemplazo por una nueva pastura (en otro sitio) o b) prolongar su utilización mejorando su producción.

El reemplazo de una pastura existente implica labores, insumos y pérdida de producción de forraje durante el período de preparación del suelo y establecimiento hasta la nueva cosecha de forraje (14). En el Valle de Lerma se desconoce el efecto de la variedad y la densidad de siembra para incrementar la población de pasturas de alfalfa. Hopkins et al. (84) reportaron que el beneficio de la implantación de la nueva pastura era eliminado al introducir en el análisis el déficit de producción asociado con el tiempo que tarda en entrar en producción.

Se puede prolongar la vida útil de las pasturas utilizando el laboreo, la adición de yeso, la fertilización y la intersembrado con el objetivo de descompactar y mejorar las condiciones físicas del suelo, mejorando la infiltración del agua, la aireación y el desarrollo de las raíces (105).

Para prolongar la producción de pasturas se aplican tecnología que permite la recuperación de la productividad o la prolongación de la vida útil de una pastura perenne (103, 177).

Cuando su crecimiento se ve comprometido por la compactación del suelo (24) se pueden utilizar maquinarias para mejorar la condición de la pastura. En el mercado nacional e internacional se utilizan implementos para la renovación de praderas como el aireador de praderas (123), arado de cincel (109) y subsolador (26).

El uso de subsoladores (147) mejora las condiciones del suelo para el crecimiento vegetal mediante la modificación de la distribución de tamaño de los agregados (132). El suelo es

desplazado hacia adelante, arriba y lateralmente, bajo un patrón de fallas crecientes, donde se producen fracturas a lo largo de planos definidos desde la punta de la reja hacia la superficie, con un ángulo aproximado de 45° (141). En condiciones de suelo firme, compactado, producen una disminución de la densidad aparente del suelo, aumentando el espacio poroso para almacenar agua (9).

Una de las herramientas usadas para mejorar la persistencia productiva de una pastura podría ser la utilización del laboreo profundo con subsolador. No se encontró en la bibliografía información sobre su uso en pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma.

1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS

El objetivo general de la tesis es describir las pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma y evaluar la eficacia de técnicas agronómicas para la recuperación de su población y rendimiento. Se plantea una tesis organizada en capítulos con distintas escalas de percepción y complejidad creciente. El presente capítulo, **Capítulo 1**, presenta la introducción general de este trabajo describiendo los antecedentes del tema de investigación, los objetivos y la estructura general de la tesis. Luego de esta Introducción, en el **Capítulo 2** se describe el área de estudio, sus sistemas de producción y se cuantifican las pasturas de alfalfa a través del análisis de imágenes satelitales con índices de vegetación y software específico.

Continúan tres capítulos experimentales, en cada uno de los cuales se plantean hipótesis, objetivo general y objetivos específicos, se analizan los antecedentes bibliográficos, se desarrolla a un marco teórico y se establecen conclusiones.

En el **Capítulo 3** se describen a nivel regional los cambios en la población de pasturas de alfalfa, las modificaciones físicas del suelo y su relación con indicadores edáficos durante el primer año de utilización.

En el **Capítulo 4** y el **Capítulo 5** se plantean formas de renovación de pasturas de alfalfa.

En el Capítulo 4 se analiza la implantación de una nueva pradera con laboreo total del suelo, en lotes cuyo cultivo antecesor haya sido distinto a la alfalfa. En esta sección, se implementan dos técnicas agronómicas, analizando en una el efecto de la variedad y en el otro la densidad de siembra.

En el **Capítulo 5** se evalúa la renovación de una pastura de alfalfa, que presentaba bajo stand de plantas y compactación del suelo, con un subsolador de brazos angulados más la adición de yeso sobre la cantidad de plantas, la producción de la pastura, la densidad del suelo, la resistencia mecánica, la materia orgánica y la estabilidad de los agregados

Las conclusiones parciales se reúnen en el **Capítulo 6**, mientras que la bibliografía se incluye en el **Capítulo 7**.

Esta tesis representa el primer trabajo realizado sobre pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma que: cuantifica su superficie y distribución de manera objetiva en base al análisis de imágenes satelitales, describe la población y el suelo de la pastura en base a indicadores, analiza la utilización de técnicas agronómicas para mejorar la población de la pastura y estudia una técnica de recuperación de la calidad física del suelo. Se espera que este trabajo aporte información sobre la problemática de las pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma en la provincia de Salta.

Capítulo 2

Pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma,
Provincia de Salta.

2.1. REGIONES AGROECONÓMICAS HOMOGÉNEAS DE LA PROVINCIA DE SALTA

La Provincia de Salta se ubica en el noroeste de la República Argentina, abarca una superficie de 154.775 km², representa el 5,6% de la superficie continental del país y es la sexta provincia por su extensión. Está situada entre 22°00' y 26°23' de latitud sur y 62°21' y 68°33 longitud oeste, limitando con tres países, Chile, Bolivia y Paraguay, y con seis provincias, Catamarca al oeste, Jujuy al norte, Chaco y Formosa al este y Santiago del Estero y Tucumán al sur. Se divide políticamente en 23 departamentos y 59 municipios. Por su orografía y la distribución de las precipitaciones (20), posee ambientes áridos, semiáridos y húmedos (7) con precipitaciones desde 100 a más de 1400 mm y climas mesotérmicos y macrotérmicos (135), lo que origina una amplia diversidad de sistemas de producción. Piccolo et al. (138) informan que en la Provincia de Salta se diferencian siete zonas agroeconómicas homogéneas, de las cuales cinco son ganaderas, ya sea con ganado mayor y/o menor o agrícolas-ganaderas. En la zona central, entre las laderas orientales de la Puna y las sierras subandinas. se encuentra el Valle de Lerma (Figura 2.1), caracterizado como un valle de producción intensiva (138).

2.2. EL VALLE DE LERMA

El Valle de Lerma es una depresión intermontana elongada en sentido meridiano (Figura 2.1), con una superficie de 2.400 km² aproximadamente, cuyas coordenadas extremas son: 24° 30' y 25° 38' latitud sur y 65° 22' y 65° 37' longitud oeste. Está comprendido por los departamentos Guachipas, La Viña, Chicoana, Rosario de Lerma, Cerrillos, Capital y La Caldera (Figura 2.2), con una extensión máxima en sentido norte-sur de 120 km desde las localidades de Alemania al sur hasta La Caldera al norte, y un ancho máximo de 25 Km en

su tramo central y más ensanchado entre Campo Quijano al oeste y La Isla al este (Figura 2.3). La ciudad de Salta, capital de la provincia, con 600.000 habitantes (88), se ubica en el departamento Capital, al norte del Valle de Lerma.

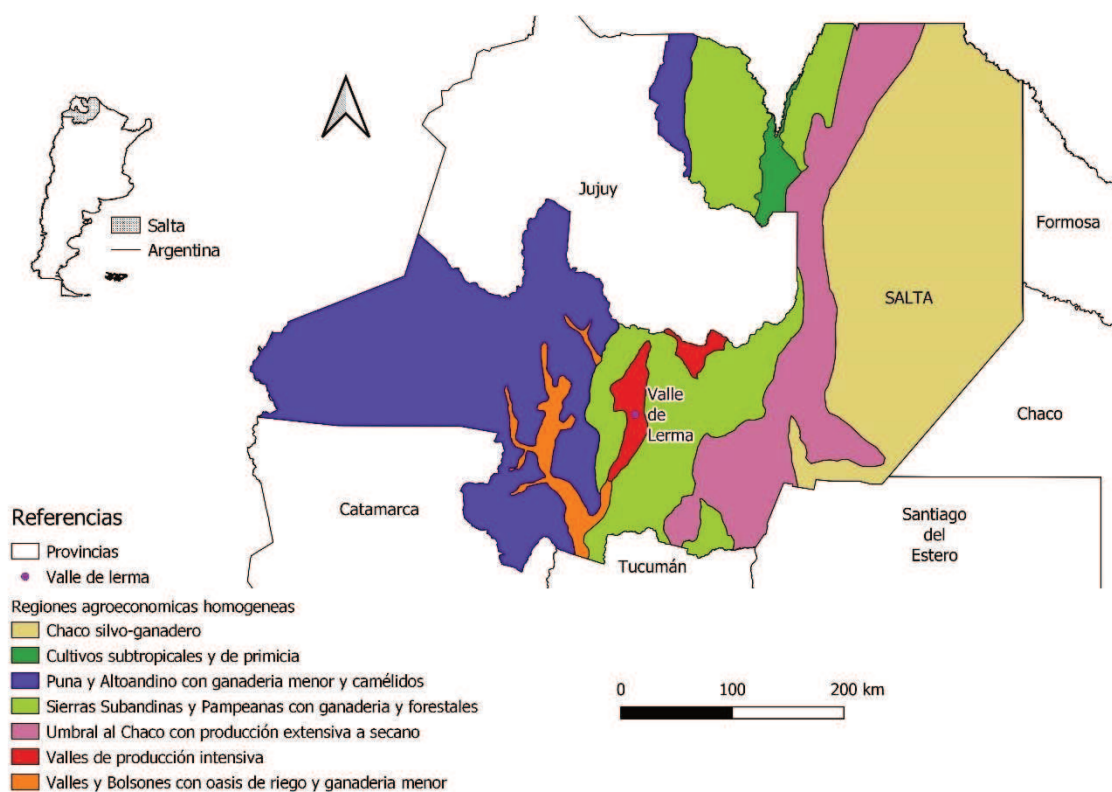


Figura 2.1. Regiones agroeconómicas homogéneas de la Provincia de Salta. Fuente Piccolo et al. (138). Elaboración propia.

2.2.1. Clima del Valle de Lerma

El clima del Valle de Lerma puede ser definido como subtropical serrano con estación seca (2). La precipitación promedio anual, para la localidad Cerrillos, en el centro del Valle de Lerma, es de 686,7 mm (7) (Cuadro 2.1).

La temperatura media anual del Valle de Lerma aumenta desde 16 °C al NO hasta 18 °C al SE (2), presentando la temperatura media máxima más elevada en octubre con 29,2 °C y la

temperatura media mínima menor en julio con 3,8 °C. La temperatura media mensual es de 17,2 °C, registrando en el verano una temperatura promedio de 20,6°C, con heladas entre el 2 de junio y 3 de setiembre y un periodo medio libre de heladas de 273 días (7). Las isothermas anuales tienen un trazado submeridiano, por lo que disminuyen desde 18°C en el sudeste a 16°C en el noreste (Figura 2.4). Esta distribución de las temperaturas, así como el gradiente de precipitaciones, determina una zonación microclimática (16). En la zona occidental los veranos son moderados y lluviosos. En la zona central, son cálidos con lluvias regulares, mientras que en la porción austral son cálidos con lluvias escasas (2).

Cuadro 2.1. Valores promedios de precipitación media (pp), temperatura promedio (T media), temperatura media máxima (T media max) y temperatura media mínima (T media min), de la localidad Cerrillos, (Valle de Lerma, Pcia. Salta). Fuente: EEA INTA Cerrillos, Salta.

	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may
pp (mm)	2,6	3,3	3,5	6,6	22,4	58,4	136,0	185,6	132,3	101,4	27,5	7,2
T media (°C)	10,9	10,6	12,8	15,5	19,0	20,4	21,4	21,3	20,4	19,4	16,7	13,5
T media max (°C)	18,5	19,9	25,2	26,1	29,2	27,0	21,0	28,5	25,9	24,4	23,4	20,8
T media min (°C)	6,2	3,8	7,2	17,5	21,3	19,9	16,1	16,6	16,7	13,9	13,4	9,6

El 89% de las precipitaciones se concentran entre noviembre y marzo, mientras que en el invierno el valle está desprovisto de lluvias. Las lluvias se inician gradualmente en la primavera, se intensifican durante el verano y decrecen en forma rápida durante el otoño.

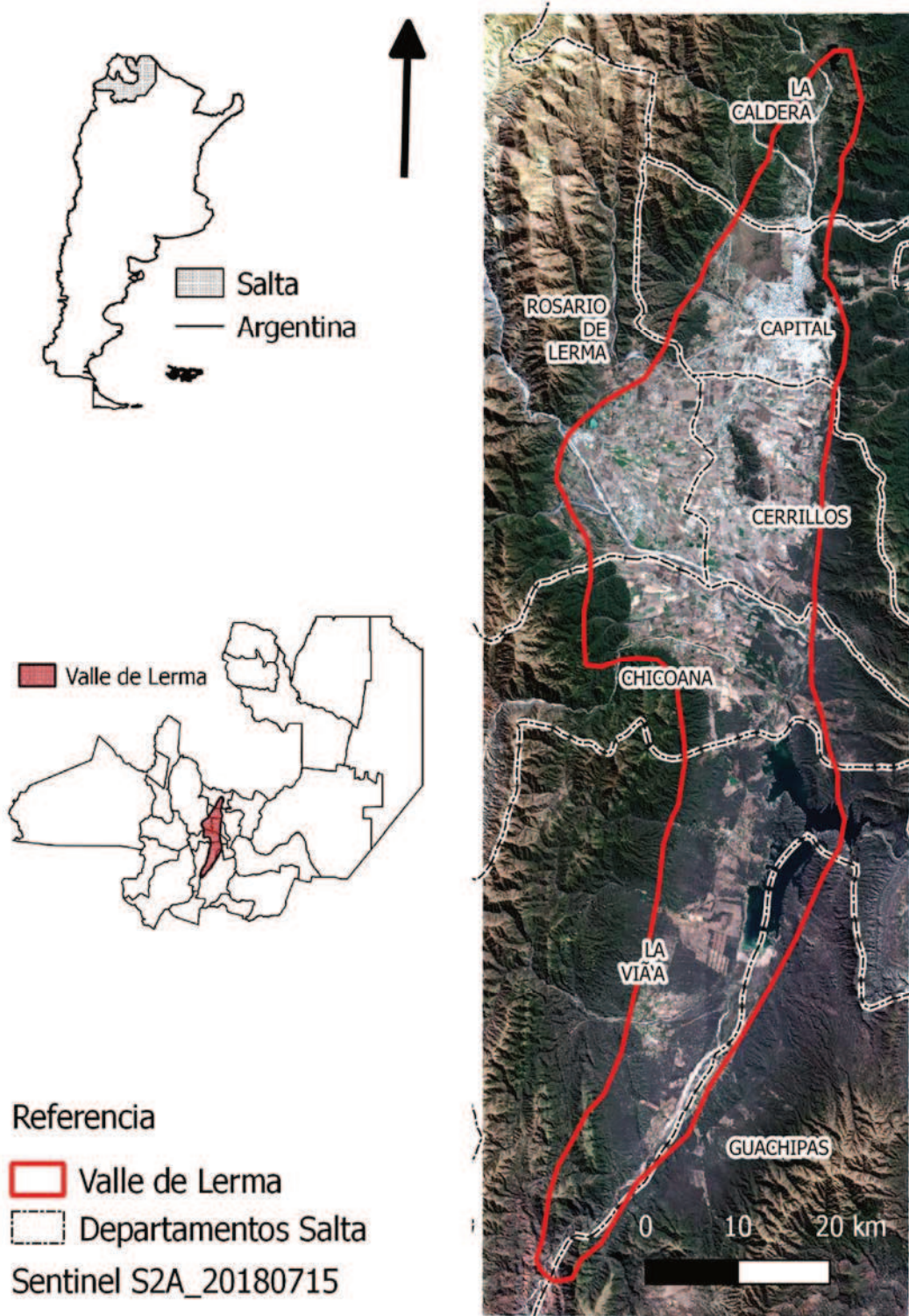


Figura 2.2. Departamentos del Valle de Lerma, Pcia de Salta, sobre imagen satelital Sentinel S2A_20180715. Elaboración propia.

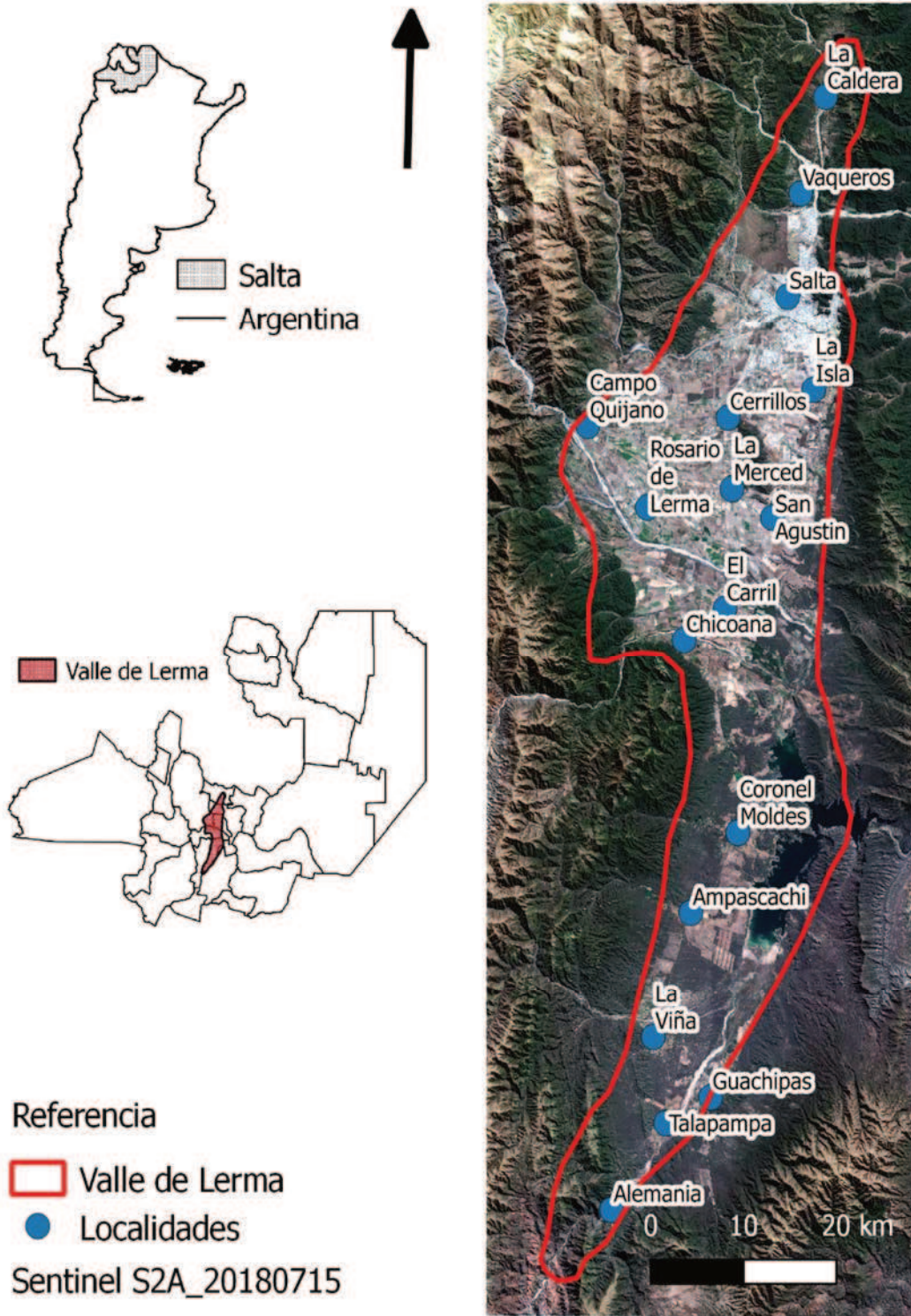


Figura 2.3. Localidades del Valle de Lerma, Pcia. de Salta, sobre imagen satelital Sentinel S2A_20180715. Elaboración propia.

La variación en la cantidad de lluvias durante el año está determinada por los cambios de la presión atmosférica (118). Los sistemas béricos que actúan sobre el clima del noroeste argentino son los anticiclones semiestacionarios del Pacífico y del Atlántico, que emiten vientos hacia el continente sudamericano (20). Durante enero, se separan los anticiclones mencionados y entre ellos se instala una faja de baja presión llamada “baja térmica” (7), que posibilita que lleguen los vientos cálidos y húmedos de regiones tropicales que producen precipitaciones. En julio, los anticiclones del Pacífico y el Atlántico se acercan, restableciendo la faja de altas presiones sobre el continente sudamericano. Durante el invierno en el norte argentino prevalecen condiciones anticiclónicas, siendo común los días soleados con escasas precipitaciones (118).

Existe un efecto regional relacionado con la distribución de las precipitaciones (Figura 2.5). Los cordones montañosos que se encuentran en el oeste del Valle de Lerma superan los 4000 msnm, mientras que las serranías que constituyen el límite oriental son más bajas y en su parte noreste su altura es de 2000 msnm. En estas últimas se encuentran, además, el Valle del Portezuelo, la Quebrada de Chachapoyas y la Quebrada del Mojotoro, que permiten la entrada de vientos húmedos. Estos vientos son detenidos por el alto contrafuerte occidental, al pie de los cuales descargan casi la totalidad de la humedad. Por tal motivo, las precipitaciones aumentan hacia el oeste (2) y se observan diferencias muy importantes entre localidades separadas por poca distancia. Por ejemplo, en la ciudad de Salta el promedio anual es de 695 mm, en tanto que, en San Lorenzo, a sólo 11 km de distancia hacia el oeste, es de 1395 mm (20). Más hacia el sur, al elevarse la cadena montañosa por el este, se hace sentir la sombra eólica que provoca y las lluvias disminuyen hasta alcanzar sólo 359 mm en la localidad Alemania (19).

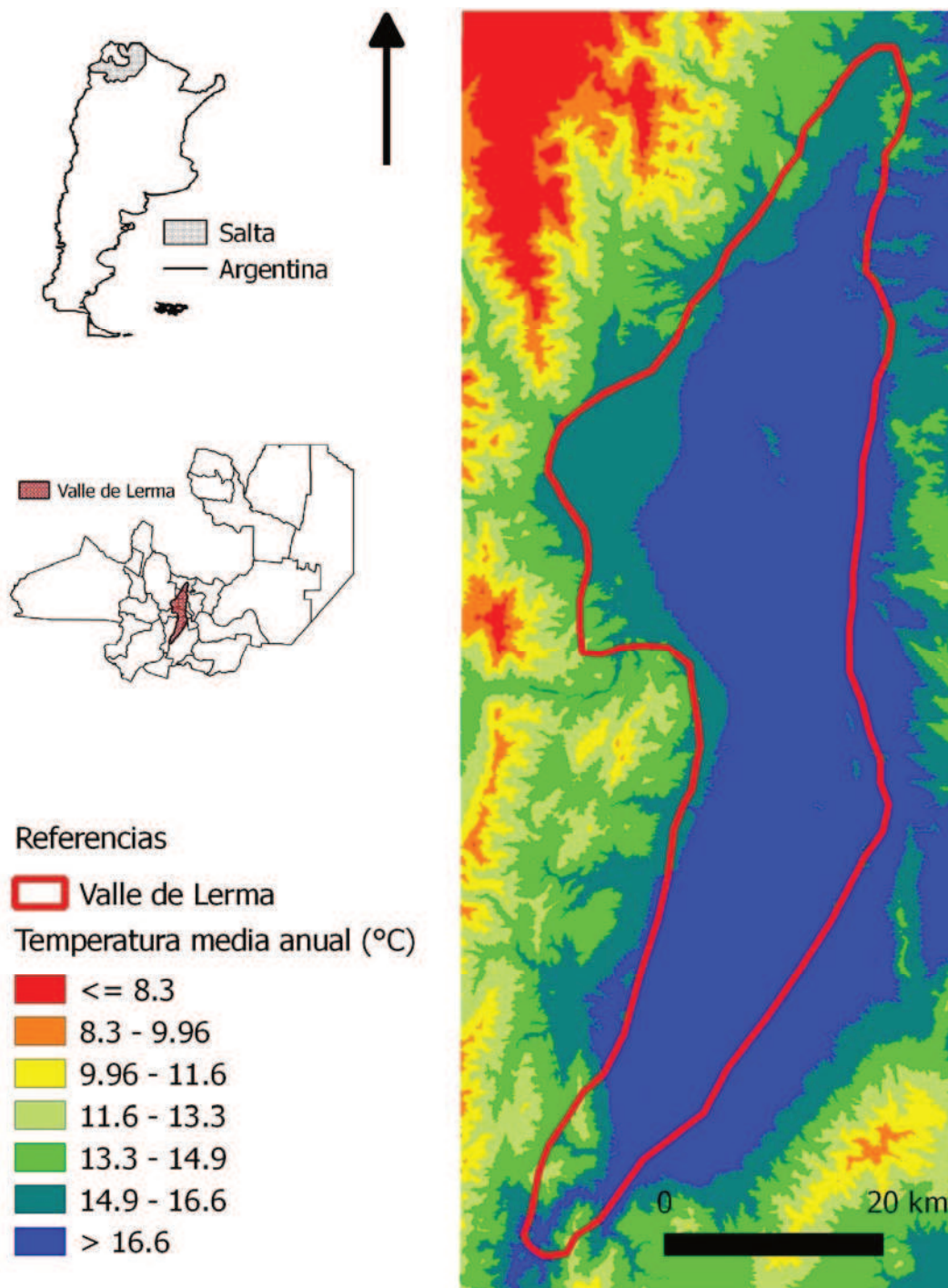


Figura 2.4. Temperatura media del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. Fuente Arias y Bianchi (7). Elaboración propia.

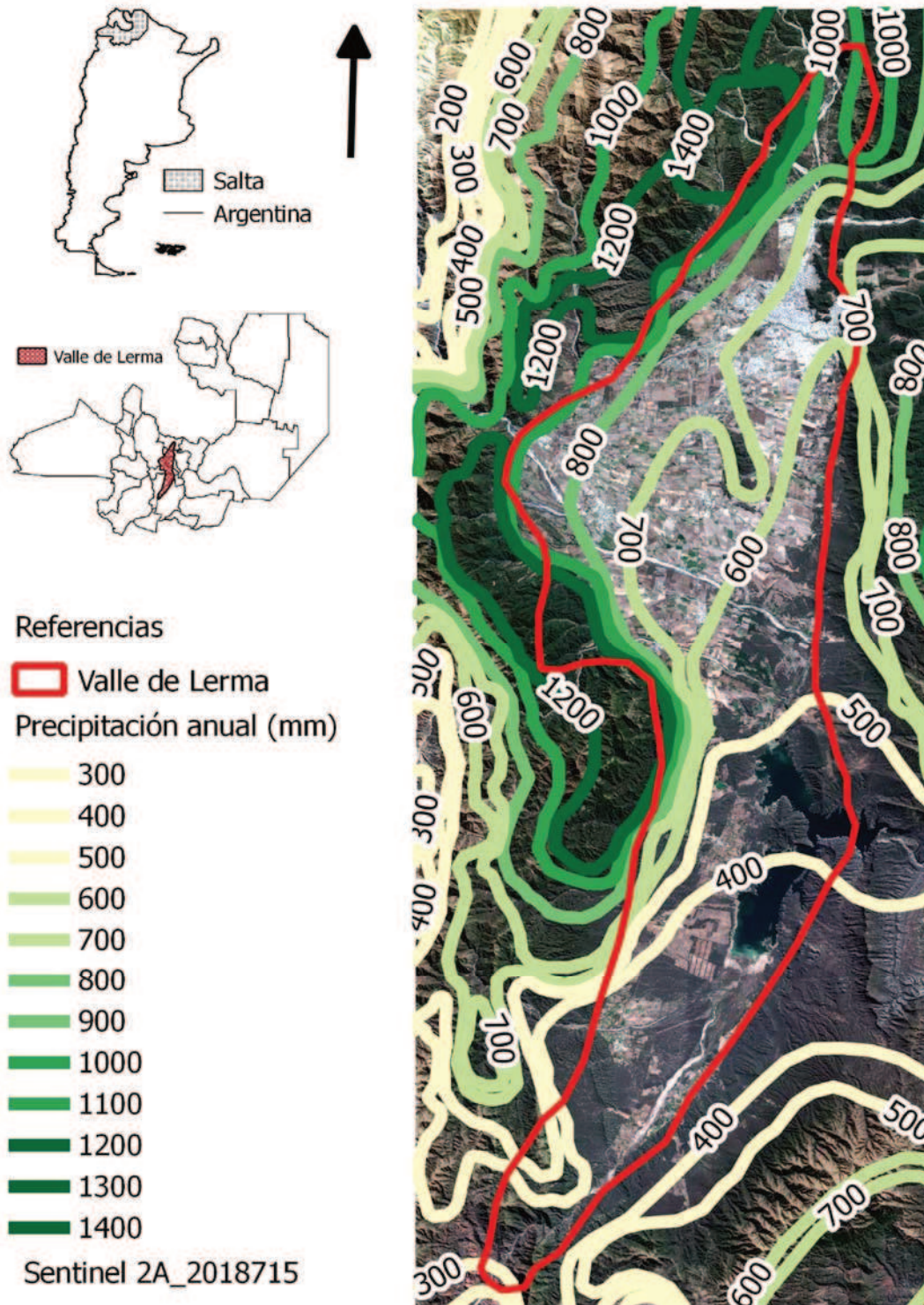


Figura 2.5. Distribución de la precipitación anual (mm) en el Valle de Lema, Pcia. de Salta, sobre imagen satelital Sentinel S2A_20180715. Elaboración propia.

El régimen pluviométrico de esta región presenta semejanzas con el régimen monzónico (7). Las bajas precipitaciones entre mayo y octubre no llegan a cubrir la demanda atmosférica y originan déficit hídrico (Figura 2.6), debiendo recurrir al riego para cubrir los requerimientos de los cultivos en este periodo (20). En el verano, las precipitaciones superan a la evaporación, produciendo excedentes que generan anegamiento de campos y daños a los cultivos (2).

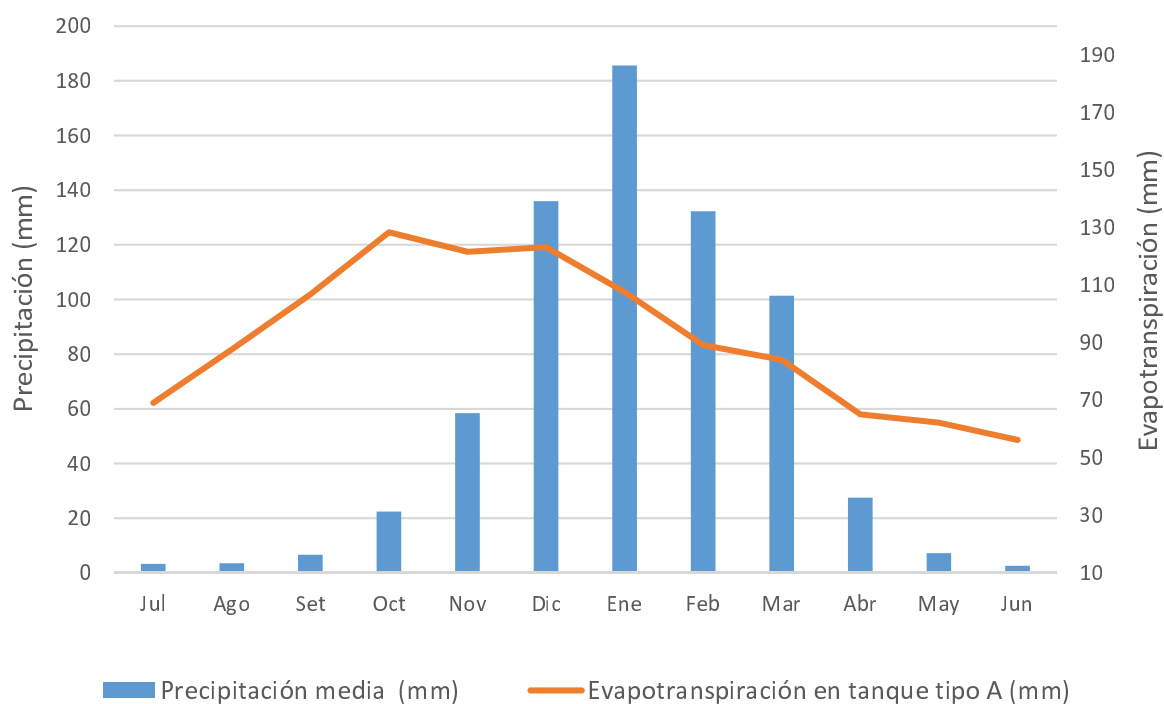


Figura 2.6. Balance hídrico de la localidad Cerrillos (Valle de Lerma, Pcia. Salta). Elaborado en base a datos de la EEA INTA Cerrillos.

2.2.2. Fisiografía del Valle de Lerma

El paisaje del Valle de Lerma es una llanura extendida con una pendiente del 1% y una altitud entre los 1000 y 1300 msnm (16). Se originó por el relleno de una depresión tectónica con sedimentos arrastrados por los ríos y tiene forma de triángulo escaleno con dirección

norte-sur. Desde el punto de vista geomorfológico, el Valle de Lerma está formado por una gran variedad de conos aluviales coalescentes que descienden de ambos flancos, depósitos de pie de monte, terrazas aluviales y otros tipos de depósitos como ser los conos de deyección o gravedad.

Considerando las formas del paisaje, el Valle de Lerma se divide en tres zonas, cada una con rasgos particulares: A) Septentrional: Abarca desde el ángulo norte del Valle de Lerma, en la localidad de La Caldera, hasta la ciudad de Salta, en las proximidades del río Arias. Sus formas dominantes son piedemontes y conos aluviales estabilizados, secundadas por formas de río, como las llanuras aluviales y terrazas, con depósitos fluviolacustres de composición heterogénea, B) Central: se extiende desde el río Arias hasta la localidad de Osma. Es la continuación de la Quebrada del río Toro que se ensancha constituyendo la zona más amplia del Valle. Las formas de río son dominantes en esta zona y están representadas por amplios y suaves abanicos aluviales, que se comportan como llanuras aluviales con el ápice en el oeste, en cercanías de la localidad de Quijano. Sobresalen como elemento topográfico discordante los cerros de San Miguel (Cerrillos) y C) Austral: desde Osma hasta el extremo sur en la localidad de Alemania. Esta zona se caracteriza por un incremento notable de afloramientos serranos por la erosión de los sedimentos aluviales.

2.2.3. Sistemas productivos del Valle de Lerma

Los sistemas productivos predominantes son: el tabacalero, el hortícola, el ganadero intensivo y el mixto agrícola ganadero (138). La disponibilidad de riego permite compensar las deficiencias de agua en otoño, invierno y primavera, desarrollando cultivos en la época que no registra precipitaciones. La producción de leche es la actividad pecuaria más

importante de esta área, seguida por el engorde intensivo de bovinos. El Valle de Lerma constituye una cuenca productora de leche extrapampeana (128) y concentra el 97% de las vacas de tambo de la Provincia de Salta (173). Tradicionalmente, la producción de leche se realiza en establecimientos mixtos agrícola-ganaderos, ya que solo el 21% se dedica a la producción de leche como única actividad (173), y en el 58% de los tambos se cultiva tabaco (35). Las explotaciones tamberas de esta región son pastoriles con suplementación (128), y, en ellas, se utiliza el pastoreo directo de pasturas templadas, principalmente alfalfa, cultivos anuales de invierno y/o de verano, y suplementos concentrados y voluminosos (35). La alfalfa se emplea en el 91% de los establecimientos, siendo incluida en el 100% de los tambos con más de 90 vacas en ordeño (35). La superficie ocupada por esta pastura se concentra en la porción central del Valle de Lerma, en los departamentos Rosario de Lerma y Cerrillos (128, 138, 173), en cercanías de las localidades Campo Quijano, Rosario de Lerma, La Merced y Cerrillos (87).

2.3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de esta tesis se ubica en la región central del Valle de Lerma, sobre el abanico aluvial del río Toro. Abarca los departamentos de Rosario de Lerma y Cerrillos de la Provincia de Salta. Conforman un polígono integrado por las asociaciones de suelo La Merced, Cerrillos y Sumalao (124); su límite norte es delimitado por la Ciudad de Salta (Figura 2.7). Sus coordenadas son oeste: $65^{\circ}37'29.5238''\text{O}$, $24^{\circ}55'41.2823''\text{S}$; este: $65^{\circ}21'19.5647''\text{O}$, $25^{\circ}01'23.6558''\text{S}$; norte: $65^{\circ}22'29.8236''\text{O}$, $24^{\circ}50'36.393''\text{S}$ y sur: $65^{\circ}23'33.0838''\text{O}$, $25^{\circ}06'16.2269''\text{S}$. Presenta una pendiente oeste – este del 1%, por lo que se comporta como una llanura aluvial.

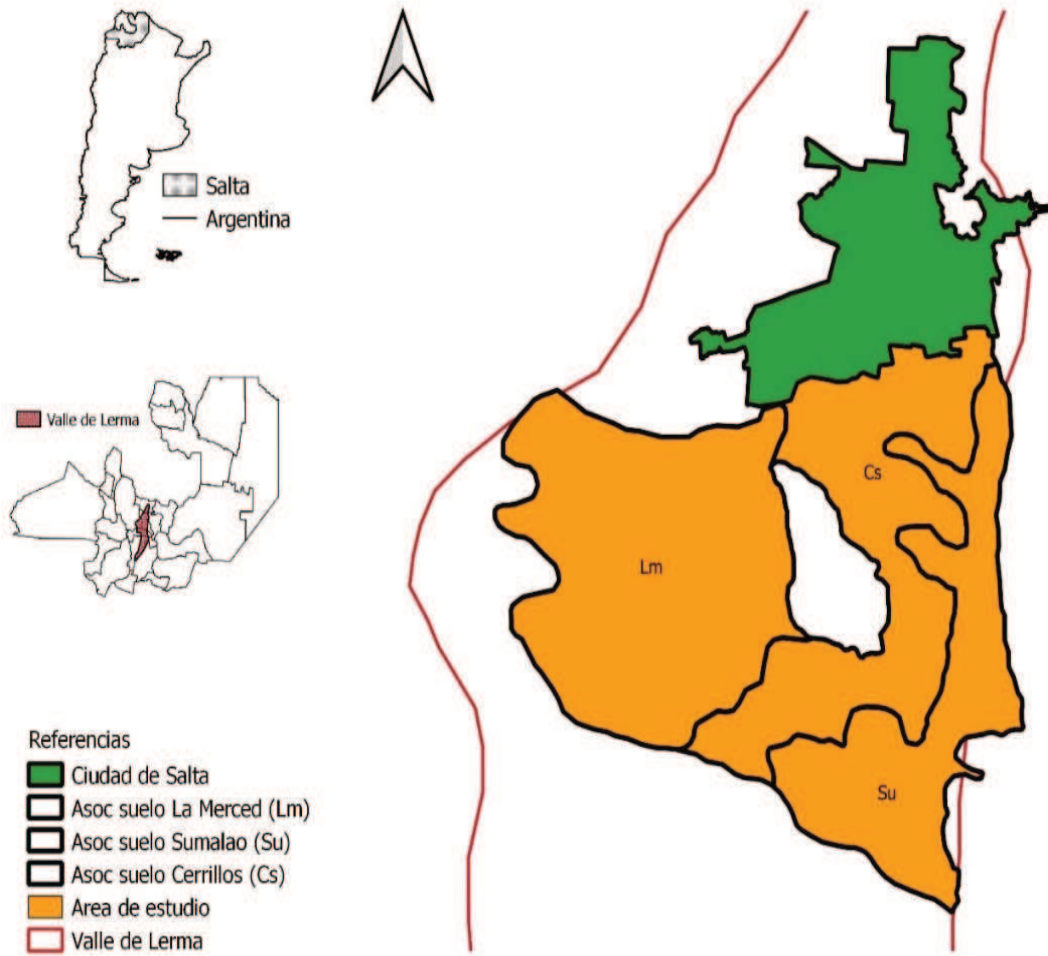


Figura 2.7. Área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta, en base a las asociaciones de suelo La Merced (Lm), Cerrillos (Cs) y Sumalao (Su); y el límite de la ciudad de Salta. Elaborado de acuerdo a los Nadir y Chafatinos (124).

El origen de estos suelos está relacionado con el régimen pluvial de los ríos del área, caracterizados por crecidas estivales que arrastran gran cantidad de materiales sólidos seguidos por marcados descensos de los caudales durante el invierno (2). Presentan perfiles con horizontes cuya secuencia es del tipo A-C o A-AC-C. Los suelos tienen texturas

variables entre franco a franco limosas - franco arcillosas. Presentan contenidos bajos a moderados de materia orgánica y de nutrientes y están pobremente estructurados.

En el área de estudio Nadir y Chafatinos (124) describen tres asociaciones de suelo: A) la asociación La Merced se ubica sobre el abanico aluvial del río Toro (2), con suelos de incipiente desarrollo con perfil A,C; moderadamente bien drenado, texturas medianamente gruesas en superficie y media a medianamente gruesa en profundidad; B) la asociación Cerrillos se ubica en la zona baja de la cuenca con texturas medias e incipiente desarrollo (124) (al norte de esta asociación se encuentra la ciudad de Salta) y C) la asociación Sumalao se ubica en la zona baja del área, en cercanías de la confluencia de los ríos Arenales y Rosario (124), con drenaje deficiente y bajas precipitaciones por la sombra eólica que ejercen los cordones del este del valle (20). En el centro del área de estudio se ubica el Cerro San Miguel, área montañosa con pendientes del 25 al 55% y riesgo de erosión, sin actividad agrícola.

2.4. CUANTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS PASTURAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La estimación de la superficie agrícola, que es fundamental para la toma de decisiones de los distintos actores involucrados en la producción agropecuaria, se puede realizar en base a encuestas y censos o a través del análisis de imágenes satelitales. Las encuestas y los censos incorporan diversas fuentes de incertidumbre debido a la ausencia de protocolos únicos y a la heterogeneidad de formación, motivación y compromiso de los informantes. Para resultar confiables y útiles, las estimaciones deben satisfacer una serie de características: basarse en una metodología debidamente documentada; poder reproducirse en el espacio y en el

tiempo; ser independientemente del observador, ser evaluables a través del contraste con observaciones de campo e incluir la confiabilidad de la estimación.

La clasificación del uso de la tierra es una de las aplicaciones más extendidas de los sensores remotos. A partir de imágenes satelitales, es posible identificar y establecer la distribución de múltiples elementos en el territorio. Registran la energía electromagnética emitida o reflejada por la superficie en distintas bandas del espectro electromagnético y proveen datos cuantitativos y continuos de la superficie terrestre. La discriminación de cultivos se basa en la diferente respuesta espectral que tienen los distintos componentes de la superficie del suelo, usando índices de vegetación. Los índices de vegetación son imágenes que se construyen a partir de operaciones algebraicas entre distintas *bandas espectrales*. El Índice de vegetación diferencial normalizado (IVN) permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie. Es un buen estimador de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación y la productividad primaria. Se calcula mediante la siguiente expresión: $IVN = (IRC - R) / (IRC + R)$, donde IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano y R es la reflectividad en el rojo.

El IVN se relaciona significativamente con aspectos claves de la vegetación, como la producción de biomasa (180) y el área foliar (172). El intervalo de valores posibles oscila entre -1 y 1. Los valores menores a 0,1 corresponden a cuerpos de agua y suelo desnudo. A partir de 0,3 encontramos presencia de vegetación e indica actividad fotosintética. Cuanto el IVN tiende a 1, la vegetación tiene una mayor actividad fotosintética y mayor crecimiento vegetativo. En base a este índice, se puede analizar la distribución y el tipo de vegetación en una región a lo largo del tiempo e identificar el patrón predominante de uso del suelo.

El paisaje agrícola del Valle de Lerma forma un mosaico por parches discontinuos de las distintas coberturas del suelo (2). Estas dependen de los diferentes cultivos y del momento de crecimiento. Se pueden generar mapas con las diferencias de vigor en áreas de estudio, utilizando los sistemas de información geográfica (SIG) para generar índices de vegetación y localizar los lugares en los que existe una mayor cubierta vegetal. En el periodo sin lluvias se puede detectar los potreros con pasturas templadas, que son los únicos con crecimiento en ese periodo.

En el año 1984, Candotti estimó en base a encuestas (35) que las praderas artificiales en el Valle de Lerma totalizaban 2806 ha, representado el 32% de la superficie de los tambos. Posteriormente, el Censo Nacional Agropecuario 2002 (87), con similar metodología, informó que la alfalfa se cultivó en 2460 ha. Se desconoce la dinámica y la superficie ocupada con esta forrajera en la actualidad.

Para analizar y cuantificar la superficie de suelo con pasturas de alfalfa durante los años 2018 y 2019 en la porción central del Valle de Lerma, en esta tesis se desarrolló y se validó la siguiente metodología inédita:

- 1- Determinación de los principales usos del suelo. El tabaco es el principal cultivo de la región, seguido por el poroto, las pasturas de alfalfa, el maíz, verdes de invierno y las hortalizas.
- 2- Identificación de la fenología de los principales cultivos. El tabaco y el maíz se desarrollan en la primavera y el verano, las pasturas de alfalfa tienen producción a lo largo del año, los verdes de invierno en los meses de otoño a primavera, mientras que los sistemas hortícolas ocupan el suelo a lo largo del año con distintas especies.
- 3- Identificación de las parcelas de alfalfa.

- a- Obtención y selección de imágenes de alta resolución Sentinel 2, del sitio “esa copernicus” (65), con un tamaño de pixel de 10 m x 10 m. En 2018, se utilizaron imágenes de las siguientes fechas: 20/06, 15/07, 30/07, 09/08, 24/08, 23/09 y 08/10. En 2019: 26/05, 20/06, 10/07, 30/07, 04/08, 24/08, 18/09, 28/09, 03/10 y 27/11.
Para la preparación de las imágenes satelitales, se utilizó el sistema de referencia de coordenadas WGS 84. Se generó una máscara de acuerdo al área de estudio y se recortaron las imágenes.
 - b- Índice Verde Normalizado.
 - I) Generación. Se utilizó la ecuación:
$$IVN = \frac{\text{banda4} - \text{banda8}}{\text{banda4} + \text{banda8}}$$
 - II) Normalizado. Se utilizó una escala de 10 rangos para poder compararlos entre las distintas fechas del mismo año.
 - c- Identificación de las pasturas de alfalfa en base a la dinámica estacional del Índice Verde Normalizado, utilizando el algoritmo “*Temporal Spectral Profile*” de QGIS.
- 4- Digitalización individual de las parcelas con alfalfa, utilizando imagen Google Earth de alta resolución para el desarrollo de una capa vectorial de potreros.
- 5- Evaluación de la clasificación:
- a- En otoño, invierno y primavera de 2018 y 2019, relevamientos de campo para identificar y discriminar los cultivos presentes.
 - b- Producción de una matriz de confusión para determinar el porcentaje de aciertos de las parcelas de alfalfa determinadas.
 - c- Determinación del Índice Kappa y la sensibilidad de la clasificación.

6- Cálculo de superficie ocupada con alfalfa. Individualmente, se estima la superficie de cada potrero, luego se totalizan para obtener la superficie total del área de estudio.

7- Elaboración de mapas con pasturas de alfalfa a nivel de lote.

La tendencia en los valores de IVN se determinaron con el algoritmo “Temporal Spectral Profile” de QGIS, obteniendo una serie temporal entre junio y de noviembre de 2018 e igual periodo de 2019, con lo que se identificaron los potreros con pasturas de alfalfa (Figuras 2.8; 2.9; 2.10; 2.11; 2.12; 2.13; 2.14; 2.15; 2.16; 2.17; 2.18; 2.19). Una vez que se identificaron todos los lotes con alfalfa, se digitalizó cada uno y se calculó su superficie. Finalmente, se validaron los resultados en terreno.

2018

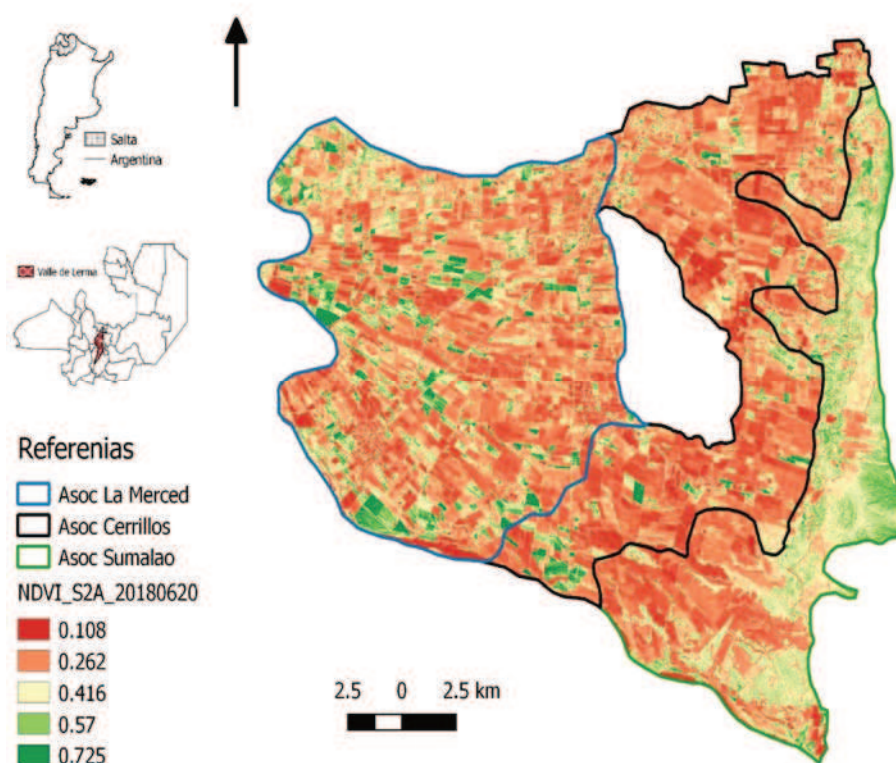


Figura 2.8. IVN del 20180620 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20180620. Elaboración propia.

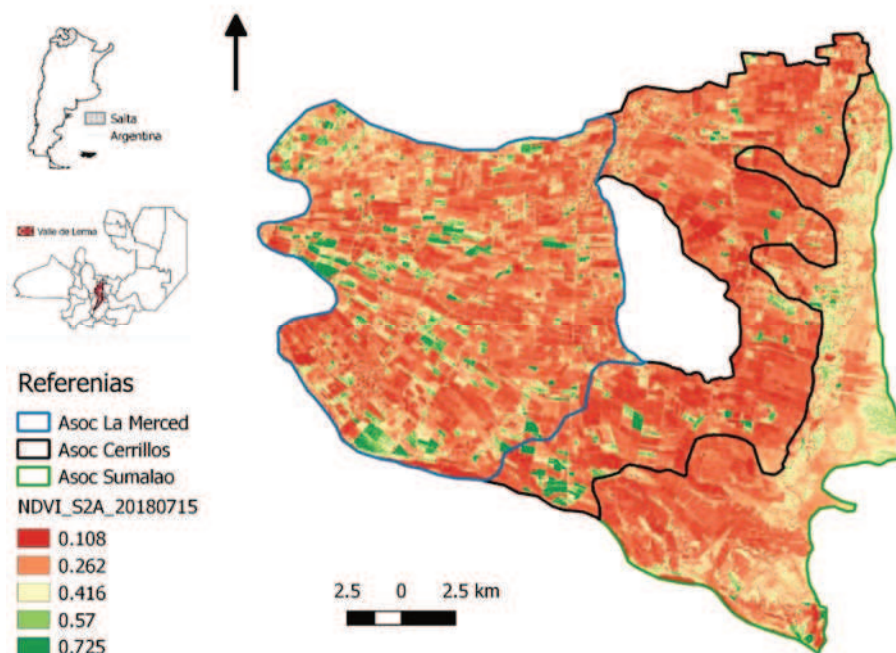


Figura 2.9. IVN del 20180715 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20180715. Elaboración propia.

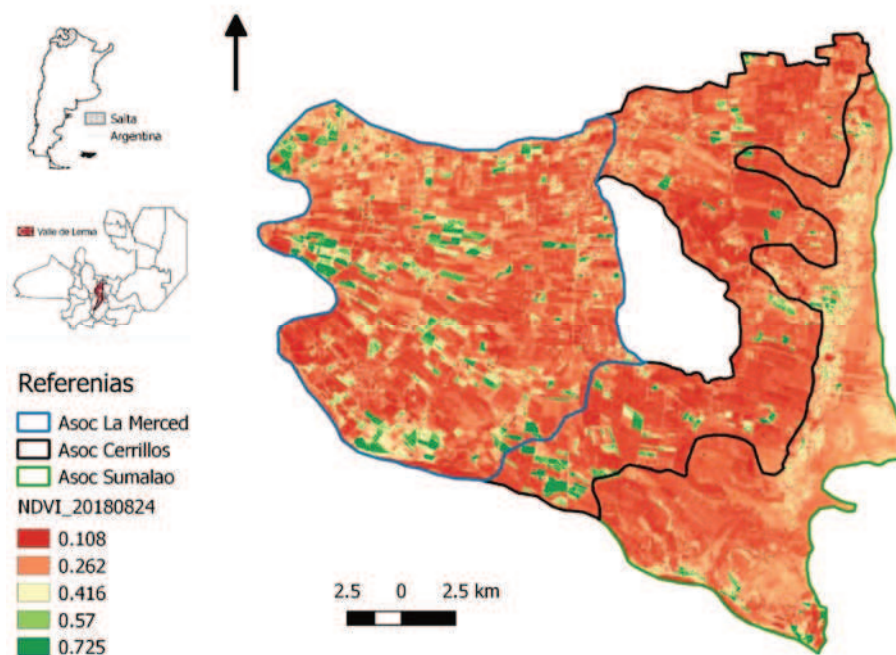


Figura 2.10. IVN del 20180824 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20180824. Elaboración propia.

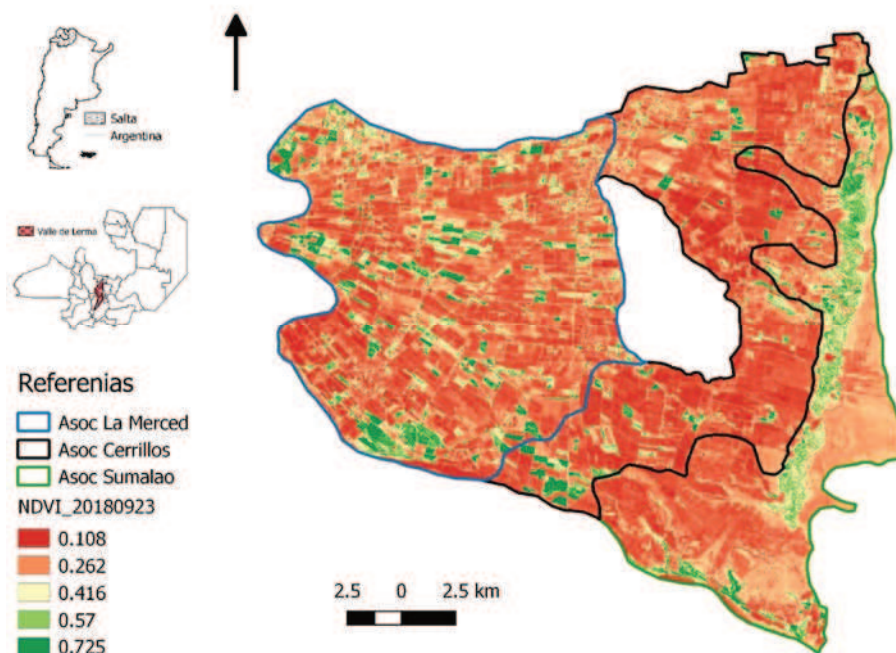


Figura 2.11. IVN del 20180923 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20180923. Elaboración propia.

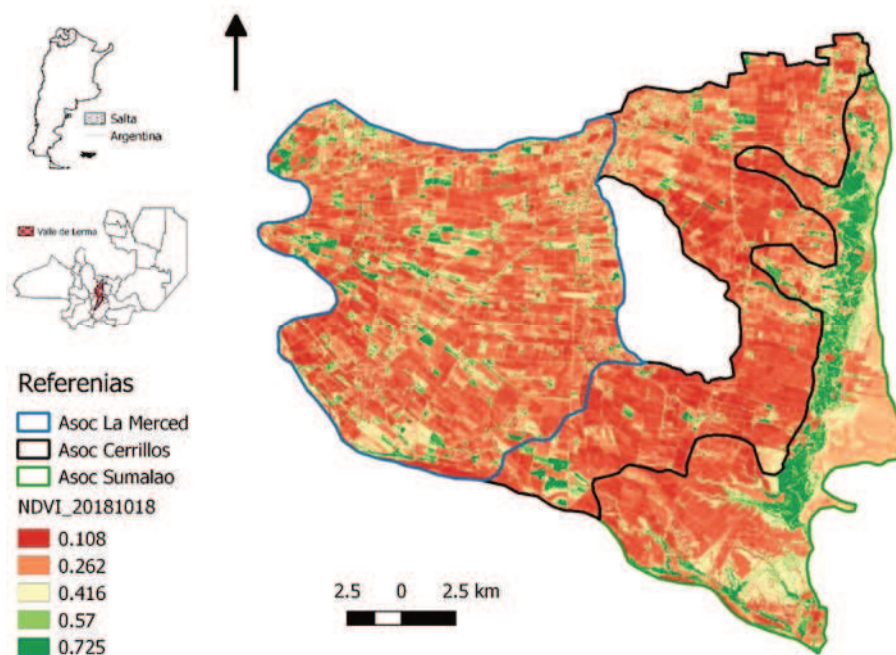


Figura 2.12. IVN del 20181018 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20181018. Elaboración propia.

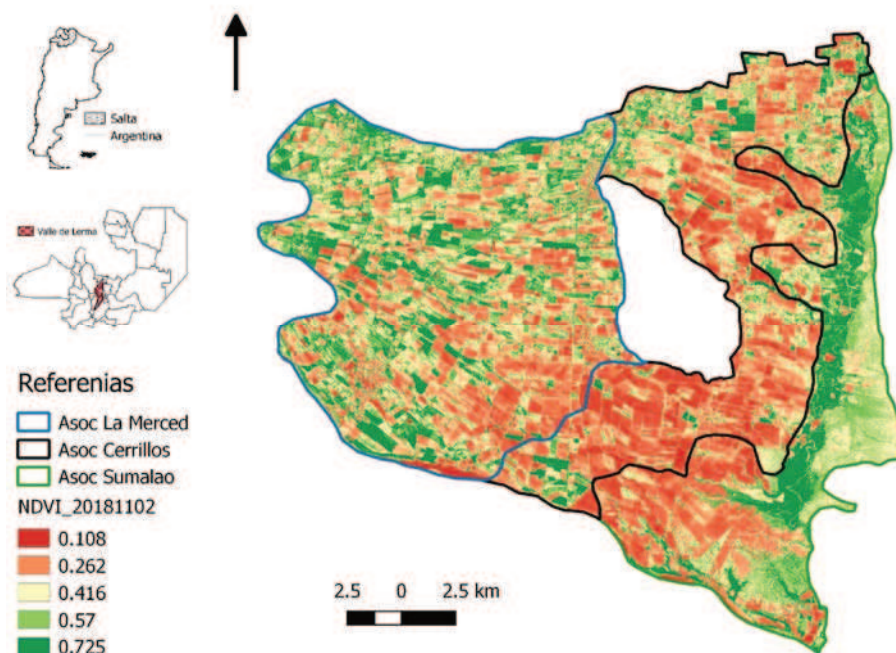


Figura 2.13. IVN del 20181102 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20181102. Elaboración propia.

Año 2019

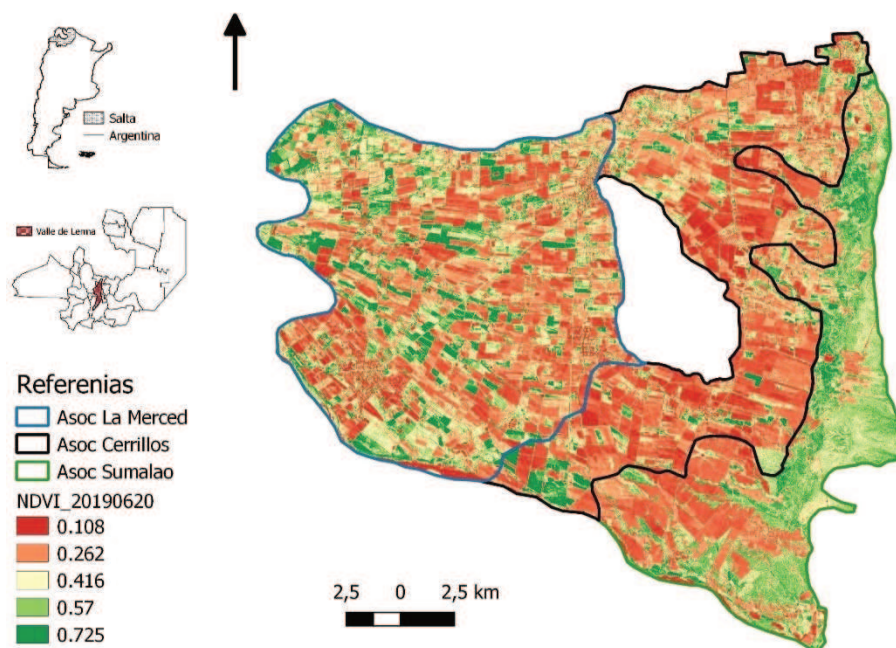


Figura 2.14. IVN del 20190620 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20190620. Elaboración propia.

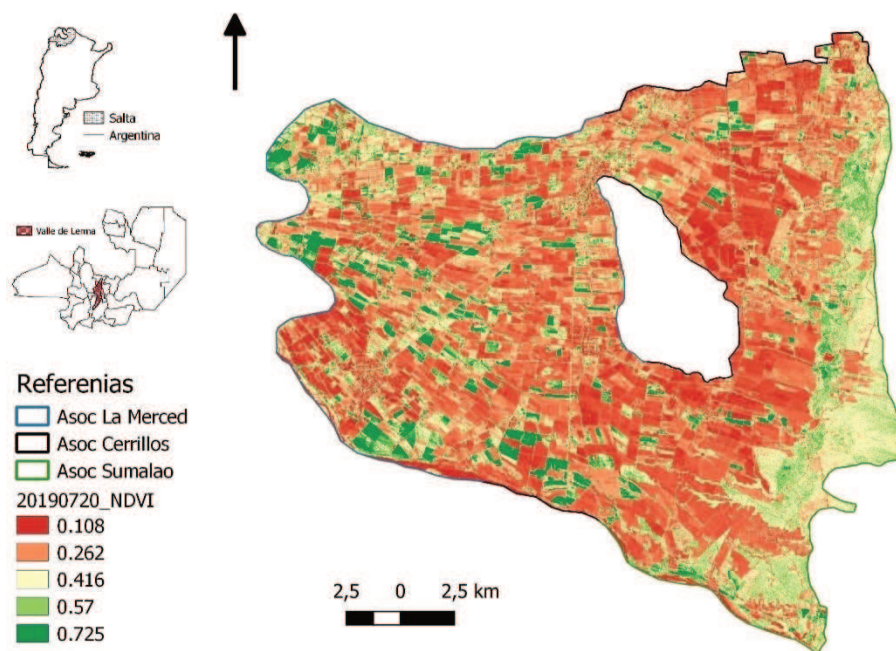


Figura 2.15. IVN del 20190720 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20190720. Elaboración propia.

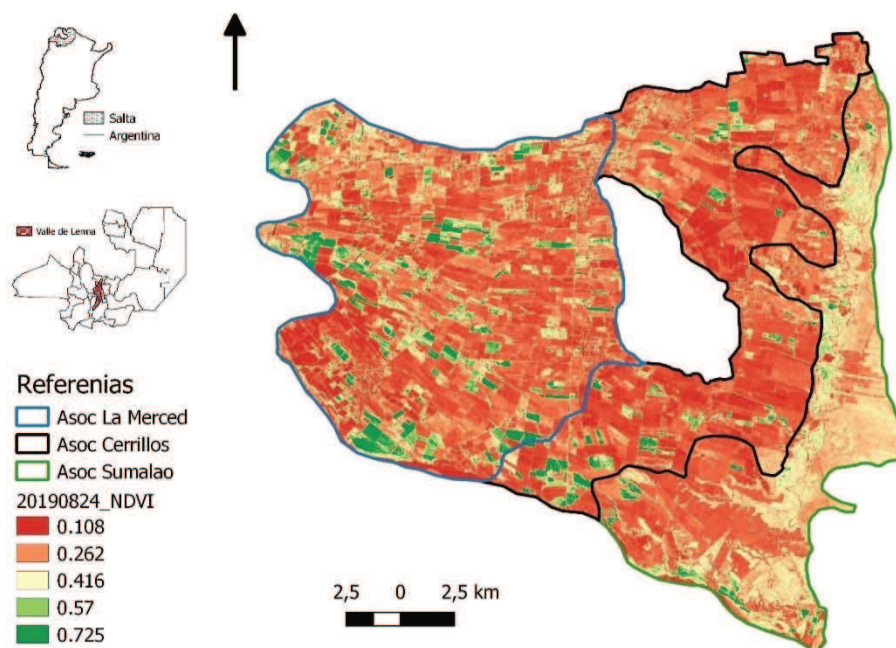


Figura 2.16. IVN del 20190824 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20190824. Elaboración propia.

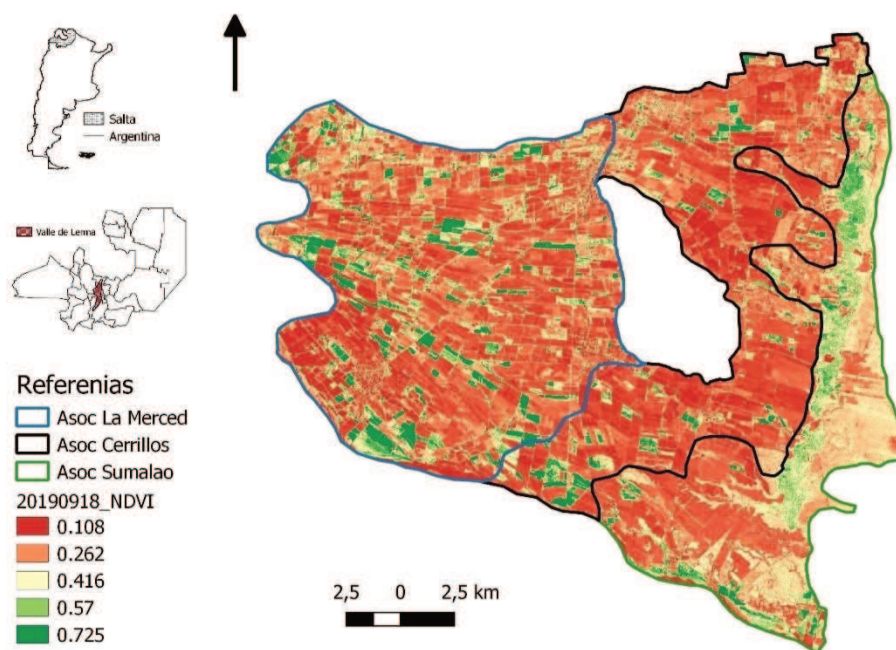


Figura 2.17. IVN del 20190918 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20190918. Elaboración propia.

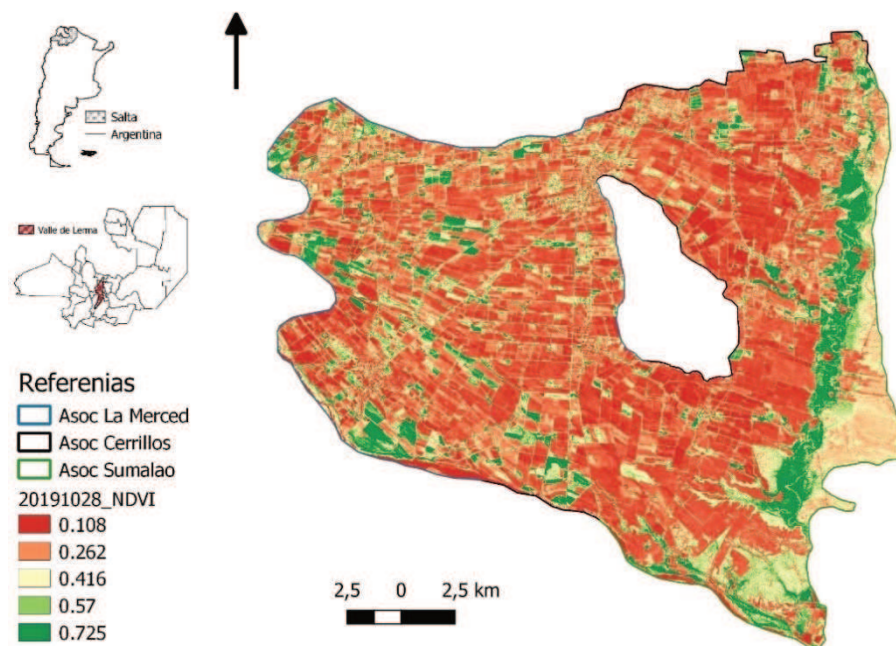


Figura 2.18. IVN del 20191028 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20191028. Elaboración propia.

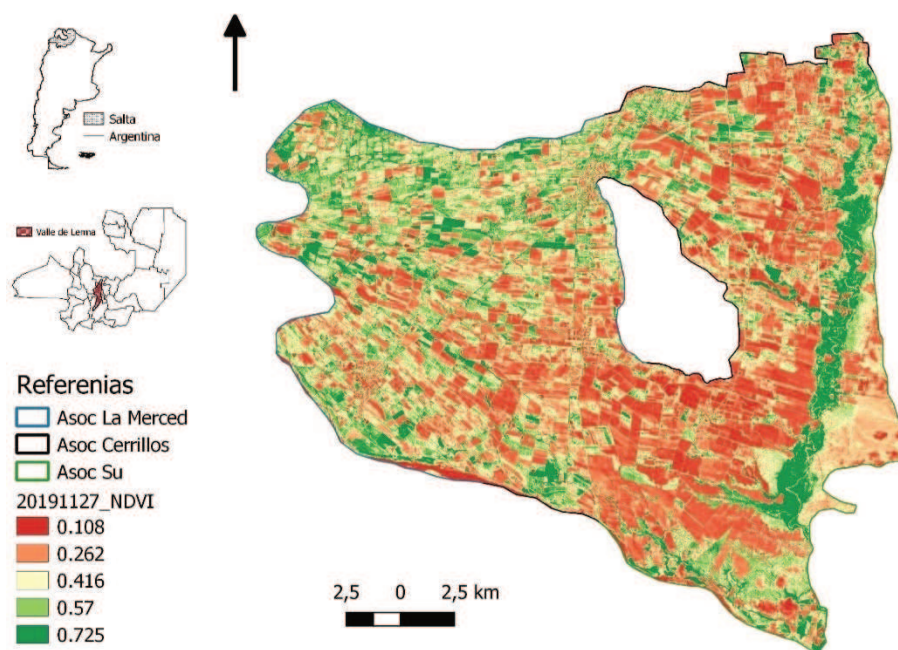


Figura 2.19. IVN del 20191127 del área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta. En base a imagen satelital Sentinel S2A_20191127. Elaboración propia.

Los lotes con alfalfa presentan valores de índice verde entre 0,41 y 0,90, con picos y valles asociados a sus aprovechamientos. En el área de estudio, entre junio y octubre de 2018, el 85% de los potreros con actividad fotosintética correspondió a alfalfa, que totalizó 2197 has, distribuidas en 275 potreros (Figura 2.20). En el mismo periodo de 2019, la alfalfa se localizó en el 80% de las parcelas con vegetación verde, alcanzando 1953 has, en 213 potreros (Figura 2.21).

La precisión de la clasificación estimada por el índice Kappa fue 0,75, lo que indica una buena discriminación de las parcelas con alfalfa de otros cultivos. La matriz de confusión mostró que el 96% de los potreros con alfalfa se estimaron correctamente. La identificación de los verdeos de invierno presentó mayor dificultad, ya que la sensibilidad para este cultivo

fue 76%, debido a la similitud con la firma espectral de alfalfa. La correcta identificación de las pasturas de alfalfa, por una parte, estaría asociada a la época elegida (mayo a septiembre), en la que se observa solo actividad fotosintética de las pasturas de alfalfa y los verdeos de invierno, y por otra, al número de imágenes satelitales, siete en 2018 y 10 en 2019, permitiendo una adecuada discriminación de la alfalfa.

En base a esta metodología, se observó que en 2019 la superficie con alfalfa disminuyó 11%.

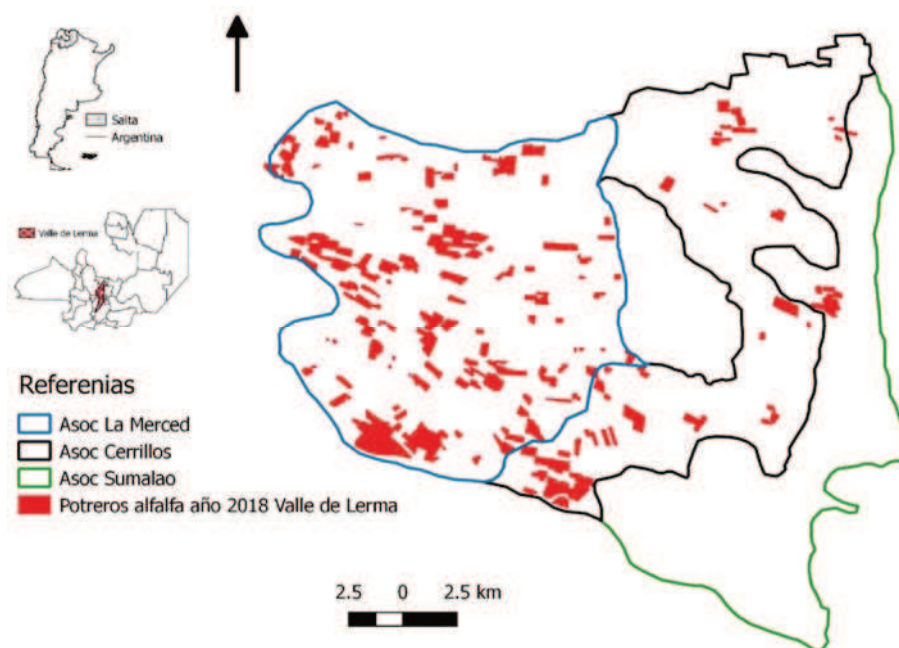


Figura 2.20. Potrereros con alfalfa en el área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta, durante el año 2018, en base a las asociaciones de suelo La Merced (Lm), Cerrillos (Cs) y Sumalao (Su). Elaboración propia.

La superficie implantada con pastura de alfalfa en 2018 y 2019 en la región central del Valle de Lerma, sería similar a la reportada por Candotti en 1984 y el Censo Nacional Agropecuario en 2002 (35, 87) y superior a la informada por el Censo Nacional Agropecuario en 2018 (89).

Entre mayo y septiembre, la superficie que no está ocupada con alfalfa o verdes de invierno presenta valores de IVN menores a 0,41, lo cual indica que no tienen vegetación en y que posiblemente se destinarían al cultivo de tabaco o maíz para silo durante la primavera y el verano fundamentalmente (138). En la asociación Sumalao, se observa a partir de octubre un incremento de la actividad fotosintética de la vegetación ribereña de los ríos Arenales y Rosario, que no están relacionados con pasturas de alfalfa o verdes.

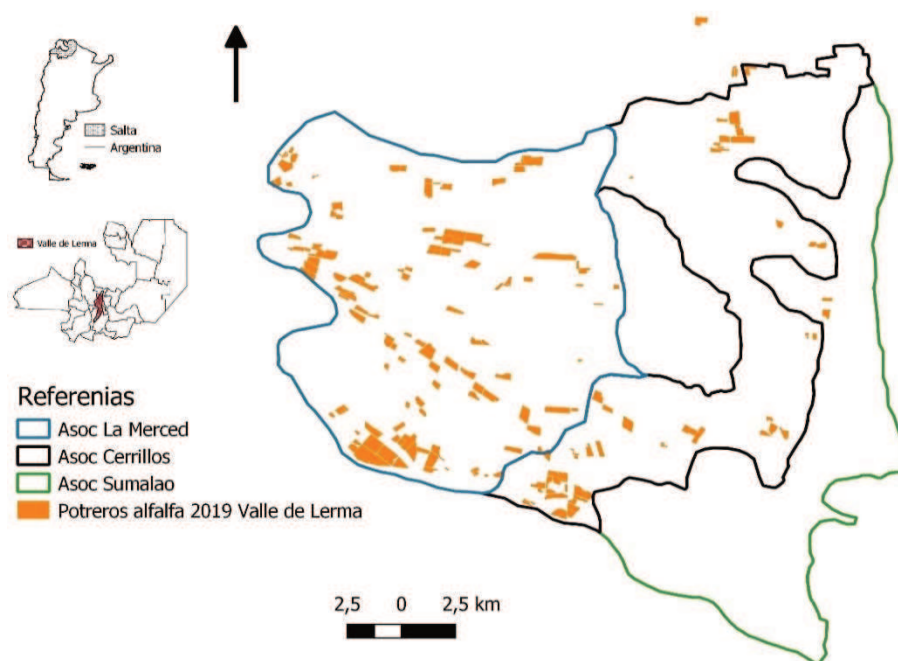


Figura 2.21. Potreros con alfalfa en el área de estudio en la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta, durante el año 2019, en base a las asociaciones de suelo La Merced (Lm), Cerrillos (Cs) y Sumalao (Su). Elaboración propia.

El IVN es un estimador lineal de la radiación absorbida por los tejidos verdes, ya que una superficie que esté fotosintetizando activamente reflejará poco en la banda del rojo y mucho en el infrarrojo. Este comportamiento espectral de la vegetación y el seguimiento de los cambios en el tiempo de la actividad fotosintética permitieron discriminar los potreros con

alfalfa y estimar su superficie. La precisión de la determinación aumentó sensiblemente al realizar evaluaciones de terreno y ajustar la metodología utilizada.

2.5. RESUMEN

El Valle de Lerma es una depresión intermontana elongada en sentido meridiano. El 89% de las precipitaciones se concentran entre noviembre y marzo. En el resto del año las lluvias no llegan a cubrir la demanda atmosférica y originan déficit hídrico, debiendo recurrir al riego para cubrir los requerimientos de los cultivos en este periodo. Los sistemas productivos muestran una tendencia hacia la agricultura (138). Los predominantes son: el tabacalero, el porotero, el hortícola, el ganadero intensivo y el mixto agrícola ganadero (138).

La producción de leche es la actividad pecuaria más importante, seguida por el engorde intensivo de bovinos. La alfalfa es la especie más difundida en los sistemas ganaderos de la región. Se concentra en los departamentos de Rosario de Lerma y Cerrillos, sobre el cono aluvial del río Toro en las asociaciones de suelo La Merced y Cerrillos. Estos departamentos agrupan el 97% de las vacas de tambo de la Provincia de Salta. (35). Las explotaciones tamberas de esta región son pastoriles con suplementación (128) y en ellas se utiliza el pastoreo directo de pasturas templadas, principalmente alfalfa, cultivos anuales de invierno y/o de verano y suplementos concentrados y voluminosos (35). La alfalfa se utiliza en el 91% de los establecimientos, siendo incluida en el 100% de los tambos con más de 90 vacas en ordeño (35). El análisis y clasificación del uso del suelo con índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes satelitales como el IVN, permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial a lo largo del tiempo. Los cambios del IVN entre agosto y septiembre permiten detectar los potreros en los cuales

se desarrollan pasturas templadas, siendo original de esta tesis estimar la superficie y su distribución en el Valle de Lerma. Los potreros con alfalfa presentan valores de IVN entre 0,41 y 0,85 con picos y valles asociados a los aprovechamientos. Este patrón de la serie temporal de IVN permitió determinar que en 2018 las pasturas de alfalfa totalizaron 2197 has, distribuidas en 275 potreros, mientras que en 2019 la alfalfa alcanzó 1953 has, en 213 potreros. En ambos años, las pasturas de alfalfa se concentraron en el Departamento de Rosario de Lerma, en la Asociación de suelo La Merced.

Capítulo 3

Demografía e indicadores de calidad de suelo en pastura de alfalfa durante el primer año de uso en el Valle de Lerma.

3.1 INTRODUCCIÓN

La alfalfa está ampliamente distribuida en el mundo (169), totalizando 32 millones de ha sembradas en regiones templadas y subtropicales (27). Es la pastura más difundida en las explotaciones ganaderas del Valle de Lerma (173). Es una especie perenne con escasa resiembra natural (104) y su persistencia está asociada con la supervivencia de la población lograda después de la siembra (27). Aun cuando la preparación del suelo y la siembra se haya hecho correctamente (144), habrá raleo de plantas durante su utilización (15). La disminución de la población se relaciona con factores bióticos y abióticos, como densidad de siembra (152), manejo del pastoreo, enfermedades (37), fertilidad del suelo (61), presencia de capas compactadas (38, 137) o lento escurrimiento (169).

La demografía es el estudio de los cambios de una población en el tiempo (161). Sevilla et al. (159) estudiaron durante cinco años la cantidad de plantas y la producción de forraje de alfalfa sembrada con densidades de 286, 571, 857 y 1143 semillas m⁻² de alfalfa de grupo de latencia 7 y en surcos a 0,15 m. Concluyeron que el número de plantas disminuyó progresivamente año tras año en las cuatro densidades probadas y que densidades de siembra superiores a 571 semillas m⁻² implicarían un gasto adicional innecesario de semilla.

Cangiano (37), en tres localidades de la Provincia de Buenos Aires, probó la implantación de dos variedades de alfalfa en ocho fechas distintas, indicando que en todas las fechas de siembra se encontraron disminuciones significativas en el número de plantas al final del primer año de aprovechamiento.

En el Valle de Lerma, Berti (17) informó que la producción de alfalfa alcanzó 25988 kg MS ha⁻¹ año⁻¹ en ensayos comparativos de rendimientos, con riego controlado, sin pastoreo y cortes al inicio de floración. Por su parte, Pereyra et al. (137), también en el Valle de Lerma,

indicaron que, en evaluaciones bajo condiciones reales de producción de una pastura de alfalfa consumida en forma directa con 240 vacas ordeñe ha^{-1} , la producción de materia seca anual alcanzó $11131 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con un stand de $110 \text{ plantas m}^{-2}$ al primer pastoreo, que se redujo a $27 \text{ plantas m}^{-2}$ al final del primer año de utilización.

Caruso y Miranda (38), estudiando pasturas de alfalfa durante el primer año de utilización en el Valle de Lerma, también en condiciones reales, reportaron una producción de materia seca total de $7150 \text{ kg MS ha}^{-1}$ durante el primer año de utilización, e indicaron que la población cae desde $159 \text{ plantas m}^{-2}$ al primer pastoreo a 13 al final del primer año de uso. En la región central de Santa Fe, se recomiendan poblaciones de $250 \text{ plantas m}^{-2}$ al final del primer año de uso para sostener niveles adecuados de producción (112). La caída en la población observada en el Valle de Lerma al final del primer año de uso es mayor a la registrada en otras regiones y estaría asociada a modificaciones físicas y químicas del suelo (46).

3.1.1. Indicadores de calidad de suelo

Viglizzo et al. (189) demostraron que la incorporación de tecnologías, principalmente de insumos, en los sistemas productivos rurales ha afectado decisivamente la estructura y funcionalidad de los ecosistemas; por un lado, se elevó la productividad biológica y económica de las tierras, pero al mismo tiempo se modificaron los flujos de energía, los ciclos minerales, el proceso hidrológico, la estabilidad y fertilidad de los suelos.

El desarrollo sustentable es aquel que permite la satisfacción de las generaciones presentes sin comprometer a las generaciones futuras (195). Para cumplir con el concepto de sustentabilidad, se requiere monitoreo y cuantificación de los cambios en los ecosistemas (197).

Un indicador es una variable que permite describir procesos, estados y tendencias de los sistemas de producción agrícola en diferentes niveles jerárquicos (197). Estas variables muestran información acerca de los cambios o tendencias de la condición del sistema (60). La finalidad de los indicadores es proveer una base empírica y numérica para conocer los problemas y calcular el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente. Por lo tanto, un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante, haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y cuantificable en forma comprensible. Los indicadores deben cumplir las siguientes características: a) describir los procesos del ecosistema; b) integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; c) reflejar los atributos de sostenibilidad que se quieren medir; d) ser sensibles a variaciones de clima y manejo; e) ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo; f) ser reproducibles; g) ser sencillos, fáciles de medir y entender; h) ser sensibles a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica (57).

Las características físicas son una parte necesaria en la evaluación de la calidad del suelo (46). Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además están relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros (140). La densidad aparente (49), la estabilidad de agregados (139), la resistencia del suelo (96) y la textura (90) son algunas características físicas del suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad y que son afectadas por el grado de compactación. Las propiedades químicas y físicas de los suelos afectan el crecimiento y la composición de la pastura (176) y la forma en la que

las propiedades del suelo son modificadas es una muy buena medida de la estabilidad del ecosistema pastoril (139).

3.1.2. Sistema pastoril

El ecosistema de uso pastoril (55) está compuesto por los animales en pastoreo, la pastura, los microorganismos edáficos y el suelo (77). Cada elemento del sistema afecta y es afectado por los otros componentes en forma directa o indirecta (78). El pastoreo genera efectos directos, asociados al pisoteo animal y las excretas, y efectos indirectos, relacionados con las modificaciones en la estructura y función del ecosistema. La Figura 3.1 muestra un modelo de sistema de pastoreo, con énfasis en los factores que afectan la calidad física del suelo (38). Los residuos vegetales y las excretas de los animales son reciclados por los microorganismos del suelo (176). La remoción de la vegetación por el pastoreo genera efectos indirectos en el crecimiento de las plantas por la compactación del suelo (76).

Adicionalmente, se debe considerar que la presión generada por los equipos de laboreo y el tránsito de maquinarias afectan a la pastura por efectos indirectos, disminuyen el espacio poroso del suelo y causan compactación (22).

Crespo (47) afirma que, para conservar la productividad de los sistemas pastoriles, se debe conservar la calidad del suelo. Taboada et al. (176) indicaron que, dentro de los requisitos y estrategias para alcanzar la sustentabilidad de los sistemas productivos, los aspectos relacionados con el manejo del suelo adquieren gran relevancia, ya que este es uno de los subsistemas más importantes de los sistemas agropecuarios. La calidad del suelo se puede cuantificar por la magnitud y la tasa de modificación de los indicadores de suelo (191). El deterioro de las pasturas ha sido asociado con el tiempo de pastoreo y el periodo de descanso

entre aprovechamientos y en pocas ocasiones se ha relacionado con las pérdidas en la calidad del suelo (118). Por lo tanto, la información edáfica es la base para la evaluación del manejo de los sistemas ganaderos (39).

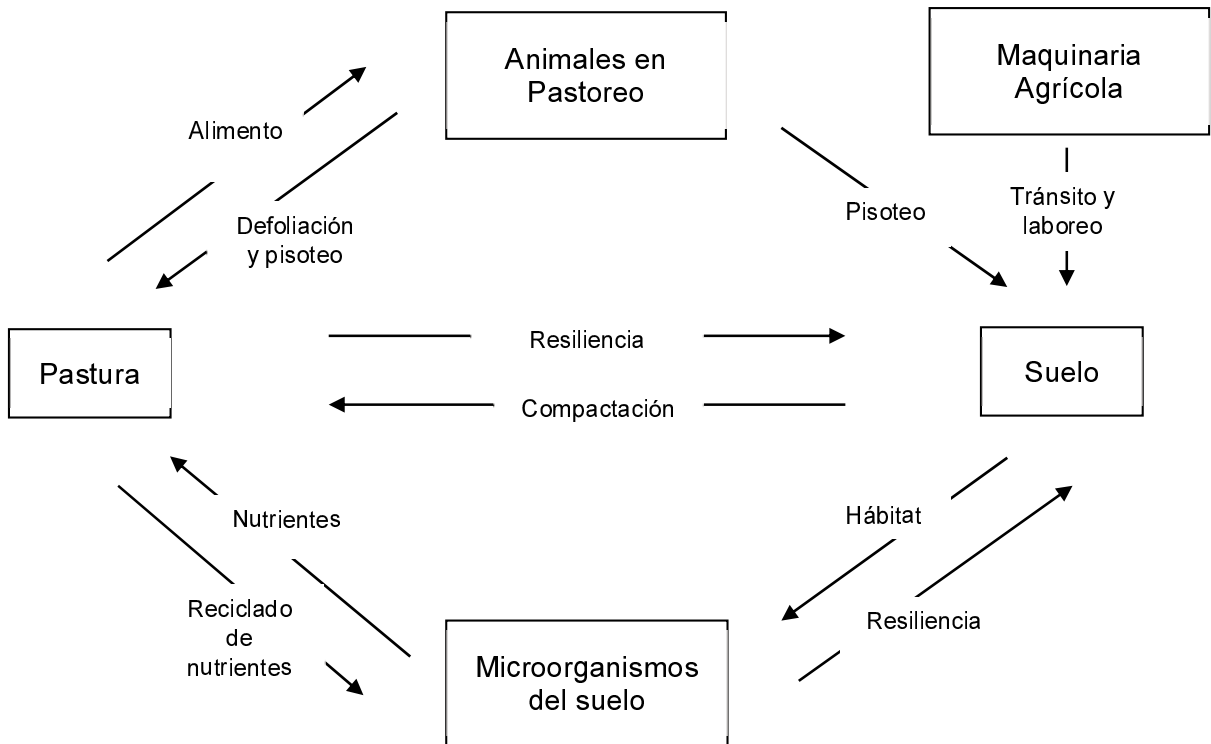


Figura 3.1: Componentes e interacciones de un sistema de pastoreo. En base a Taboada et al. (176) y Shah et al. (160).

El análisis de la complejidad de los sistemas productivos ganaderos debe ser realizado contemplando los componentes y sus interacciones. La producción animal no puede ser analizada en forma independiente, sino dentro del sistema pastoril que integra (59, 176), evaluando propiedades edáficas sensibles a los cambios en el agroecosistema de pastoreo (108).

3.1.3. Problemática de las pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma

La alfalfa no prospera en forma adecuada con impedimentos de suelo. La compactación es un proceso causante de degradación física del suelo (160) y se define como la pérdida de volumen de una masa de suelo producida por fuerzas externas (121). Entre los factores asociados con la compactación del suelo, se mencionan el tránsito de la maquinaria agrícola y de animales y el laboreo del suelo (160). El aumento de la densidad produce una disminución en la porosidad total, que genera cambios desfavorables en la relación suelo-agua-aire y afecta el desarrollo de las raíces de las plantas (48) y la productividad de los cultivos (38). En la figura 3.2., se observa cómo la presión sobre la superficie del suelo puede generar un importante disturbio por disminución en la producción de las pasturas, disminución en la cobertura del suelo e incremento del escurrimiento superficial, provocando declinación de las pasturas y generando modificaciones en el suelo por cambios en la estabilidad de los agregados, densidad aparente, distribución del tamaño los poros y resistencia mecánica, que afectan el crecimiento de las raíces y el movimiento de agua y aire en el suelo (191).

Bilotta et al. (22) expresaron que cuando un suelo es sometido a una determinada presión, ocasiona una reducción en su volumen y, como consecuencia, resulta en un aumento en su densidad, lo cual provoca un proceso de compactación y problemas de consistencia, porosidad total, difusión de gases, número, tamaño y distribución de poros, que afectan el crecimiento y desarrollo de las raíces. Taboada (174) afirmó que la degradación física del suelo por compactación implica aumentos de densidad aparente y de resistencia a la penetración, además de descensos de macroporosidad y de infiltración.

La presión sobre el suelo afecta indirectamente a la pastura a causa de la compactación, que genera una disminución del espacio poroso del suelo (22). Martínez Rubín et al. (109)

evaluaron el crecimiento de alfalfa en densidades de suelo entre 1,2 y 1,65 g cm⁻³ y concluyeron que la disminución de espacios porosos ocasionada por el incremento en la densidad aparente del suelo generó la reducción de altura en plantas y el incremento en el diámetro de los tallos, disminuyendo la producción de materia seca en más de un 30%.

Crespo (47) indica que, cuando no se tienen en cuenta las condiciones del suelo bajo pastoreo animal y la carga animal utilizada, pueden surgir problemas de degradación física del mismo, lo cual puede llevar a una disminución de la productividad de la pastura.

Comeron (40), en un ensayo en Rafaela sobre una pastura de alfalfa pastoreada con tres niveles de carga animal instantánea (228, 114 y 76 vacas ordeño día⁻¹ ha⁻¹), informó que se produjo reducción de la producción de forraje por disminución significativa del 20% del número de plantas y presencia de capas de suelo compactadas sin estructura entre 5 a 10 cm de profundidad, que habría reducido la velocidad de infiltración del agua en el suelo con el incremento de la carga animal instantánea.

Pereyra et al. (137) reportaron, para pasturas implantadas con laboreo en base a cincel y rastra de disco en el Valle de Lerma, antes del primer pastoreo, una densidad aparente de 1.4 g cm⁻³, para incrementarse en un 24% a 1.7 g cm⁻³ luego de cinco pastoreos.

Caruso y Miranda (38) evaluaron una pastura de alfalfa en un tambo en el Valle de Lerma implantada con cincel y rastra de discos, sostenida con riego suplementario y pastoreada con carga instantánea de 210 vacas en ordeño ha⁻¹. Informaron que la resistencia a la penetración aumentó desde 0,61 MPa antes del primer pastoreo a 3,2 MPa después del quinto pastoreo. Este aumento de la resistencia del suelo es un efecto superficial que se observa entre 7,5 (137) y 10 (78) cm de profundidad del suelo.

Mon (119) expresa que los efectos del laboreo son de corta duración y que los suelos con alto contenido de limo y con estructura degradada vuelven rápidamente a la densidad aparente previa al laboreo.

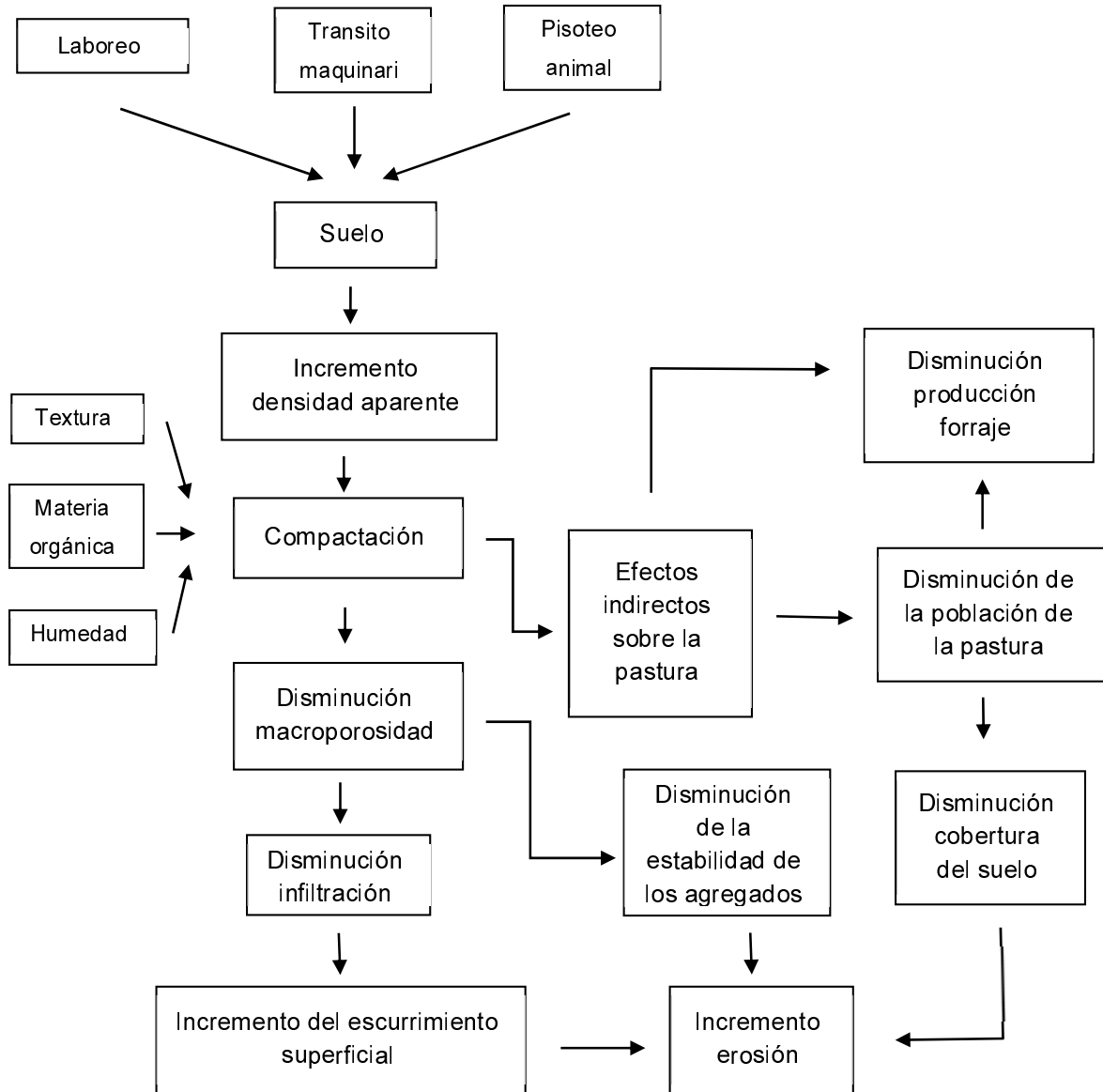


Figura 3.2. Diagrama conceptual mostrando cambios en la pastura por la compactación del suelo. Elaboración propia en base a Bilotta et al. (22).

Greenwood et al. (77) demostraron que el efecto de la carga animal es acumulativo en el tiempo y que el mismo tiende a un nivel estabilizado de densidad aparente y resistencia en el

largo plazo. Cuando el suelo es compactado, se reduce o se destruye el sistema de macroporos que participan del movimiento del agua y el aire (156).

La densidad aparente del suelo es la relación entre una masa de suelo y el volumen que ella ocupa (96). Disminuye el volumen de poros, aumenta la densidad (156) y presenta valores críticos diferentes según la textura del suelo. A medida que la textura se hace más gruesa, la densidad aparente presenta un valor crítico más alto (49).

La calidad física del suelo determina el ambiente para el desarrollo de las raíces, así como el ingreso y almacenamiento del agua para el crecimiento de las plantas (176). La alteración de las condiciones del suelo por el laboreo y las prácticas de manejo pueden afectar la producción de los cultivos a través de su influencia en la distribución de la materia orgánica, la actividad microbiana, la dinámica de nutrientes y la porosidad (64).

La estructura del suelo es fundamental para soportar plantas y animales (30) y surge de la unión de partículas primarias, arena, limo y arcilla en unidades secundarias llamadas agregados. En este proceso intervienen fuerzas naturales y sustancias derivadas de exudados de las raíces y provenientes también de la actividad microbiana (69). El arreglo de las partículas del suelo en agregados determina la presencia de poros para el almacenamiento y el transporte de agua y aire, además de permitir el crecimiento de organismos y raíces (163).

La estabilidad de agregados es una medida de la resistencia de los agregados de un suelo frente a las fuerzas desestabilizadoras (143) y es una estimación de la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando se someten a la acción de fuerzas originadas por el agua o por esfuerzos mecánicos externos (98). El espacio poroso depende de la forma, tamaño, distribución y estabilidad de los agregados. La ruptura de los agregados de gran tamaño, producto de la cantidad e intensidad de las labores

agrícolas para la preparación del suelo o por el pisoteo animal (22), afecta el movimiento y la disponibilidad del agua y el aire del suelo (69).

Por muchos años, los suelos del Valle de Lerma han sido sometidos a numerosas e intensas labores para la implantación, fundamentalmente de tabaco, presentándose disminuciones importantes en la estabilidad de agregados, procesos de erosión hídrica y pérdida de materia orgánica (85).

La estabilidad de agregados del suelo, por ser una característica edáfica dinámica, es considerada un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos (30), ya que se encuentra relacionada con el contenido de materia orgánica y la actividad microbiana (52), con el laboreo del suelo (33) y con el pastoreo (175).

Navarro et al. (125) definen a la declinación de las pasturas como el proceso evolutivo de pérdida de vigor, productividad y capacidad de recuperación natural, sin mantener los niveles de producción y calidad exigidas por los animales. Greenwood y McKenzie (76) establecen que los cambios en la calidad física del suelo causan deterioros en las pasturas al afectar el movimiento de agua y aire.

Bruand y Gilkes (31) indicaron que, cuando un suelo es sometido a una determinada presión, ocasiona una reducción en su volumen, generando un aumento en su densidad. Cuando el suelo es compactado, se reduce o se destruye el sistema de macroporos presentes en el suelo. Estos son importantes para el movimiento del agua y el aire, ya que sin ellos se presentan condiciones anaeróbicas (170).

La compactación del suelo afecta el crecimiento de las plantas debido a que, por encima de un determinado valor de densidad del suelo, la penetración de las raíces se detiene (108). Se denomina densidad límite al umbral de la densidad por encima del cual se reduce la

elongación de las raíces y se reduce el volumen de suelo explorado para obtener agua y nutrientes del suelo.

Daddow y Warrington (49) establecieron una relación entre la textura y el nivel de compactación del suelo que perjudica el crecimiento de las plantas (Figura 3.3). Estos autores indicaron que el efecto de la compactación se observa por encima de un valor umbral que está en función del contenido de arena, limo y arcilla. Un suelo que posee una densidad aparente mayor a su valor umbral de densidad está altamente compactado y en él se habría detenido el crecimiento de las raíces, afectando la productividad de las plantas.

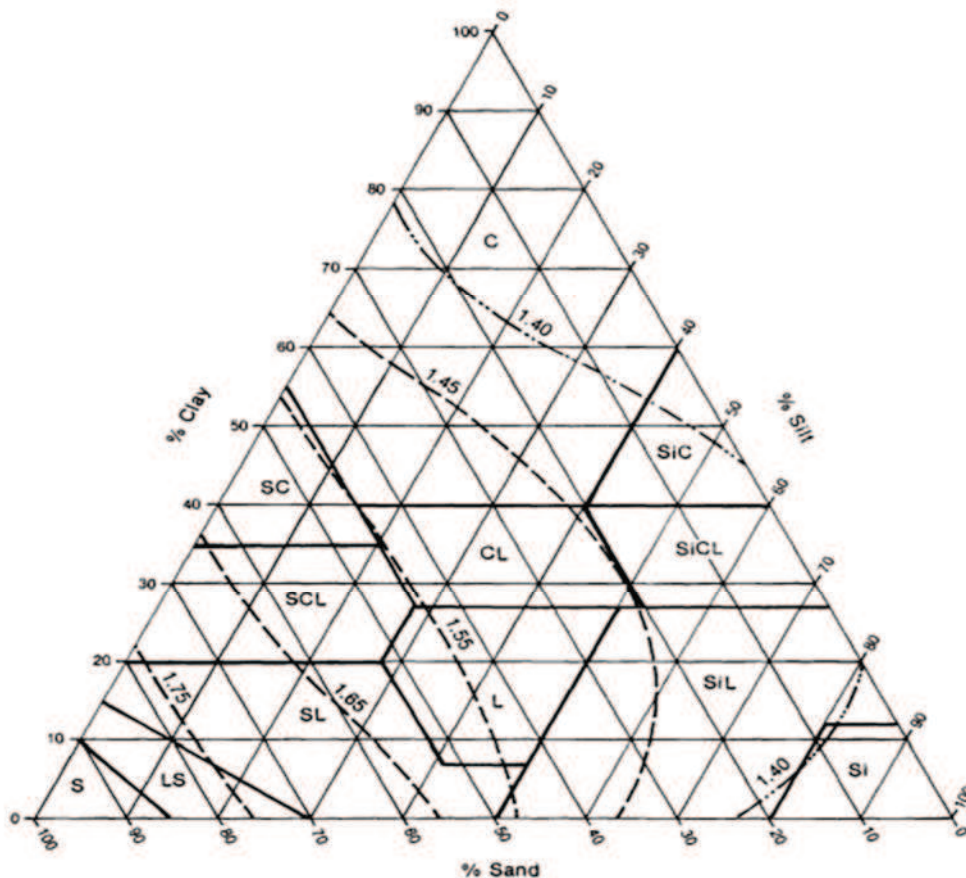


Figura 3.3. Densidad de suelo (g cm^{-3}) que limita el crecimiento de las raíces según la textura del suelo. Según Daddow y Warrington (49).

Jones (90) estudió el nivel de densidad del suelo a partir del cual se afecta el crecimiento de las raíces y sostiene que la textura del suelo determina el valor de densidad óptimo para el crecimiento máximo de las plantas. También determinó que la densidad óptima para el desarrollo máximo de las plantas es inversa a la suma entre el contenido de arcilla y limo, proponiendo una relación lineal entre estas variables.

Entre los factores que causan compactación del suelo se mencionan el tránsito de las maquinarias y el pastoreo animal (176). Greenwood et al. (77) determinaron que el efecto de la carga animal sobre las propiedades físicas de los suelos es acumulativo en el tiempo y que tiende a un nivel estabilizado de densidad aparente y resistencia en el largo plazo.

3.2. OBJETIVO E HIPÓTESIS

El objetivo general es evaluar, a nivel regional, las modificaciones en la cantidad de plantas de alfalfa durante el primer año de uso, en relación con los cambios del suelo en el Valle de Lerma. Se plantea como hipótesis que los indicadores de calidad física y química de los suelos presentan valores que afectan la persistencia de las pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma. Los objetivos específicos son: A) Reconocer las texturas de suelo presentes en pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma. B) Determinar los cambios en la cantidad de plantas de alfalfa entre el primer pastoreo y el final del primer año de aprovechamiento. C) Evaluar las modificaciones en la densidad aparente del suelo durante el primer año de utilización y D) Analizar cómo se relacionan los indicadores de suelo, materia orgánica, fósforo, pH, conductividad eléctrica, estabilidad de agregados y densidad del suelo con los cambios en el número de plantas en las distintas texturas evaluadas.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Ubicación y características de los sitios evaluados

La evaluación se llevó a cabo en 10 sitios: Mora, Vagón, Guachera, Álamo, Silo, Once, Seis, Eucaliptos, Monarca y Casa, ubicados en seis tambos a lo largo de una línea Este-Oeste, en cercanías de las localidades Campo Quijano, Rosario de Lerma, Cerrillos, La Merced y La Isla, en la zona central del Valle de Lerma, en el abanico aluvial del río Toro, en la Provincia de Salta (Figura 3.4). En el departamento Cerrillos se ubicaron Casa y Monarca, mientras que en el departamento Rosario de Lerma se localizó el resto. A todos los sitios se accede por las rutas nacionales 51 o 68 y por las provinciales 22, 26 o 36.

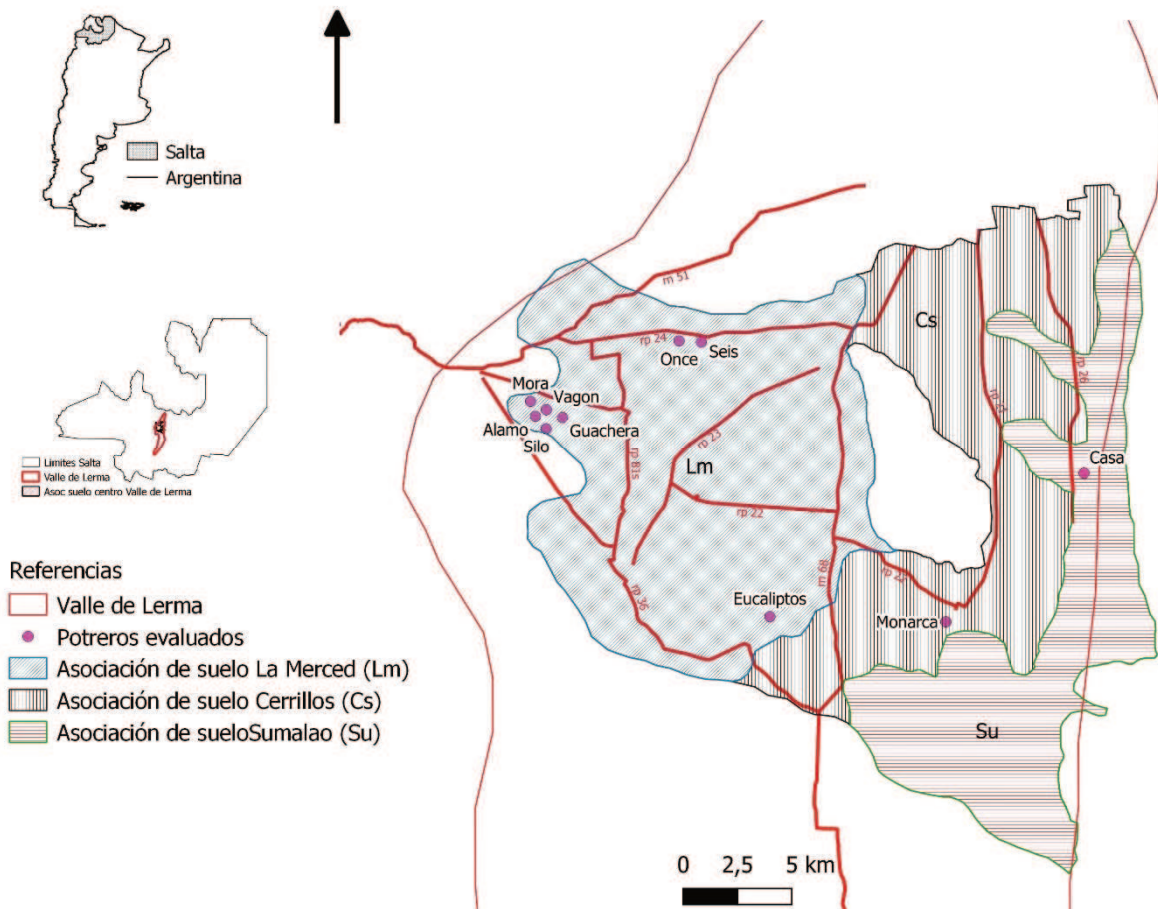


Figura 3.4. Ubicación de los sitios donde se evaluaron los cambios en las pasturas y el suelo antes del primer pastoreo y al final del primer año de uso, sobre un mapa de las asociaciones de suelos y la red vial de la región central del Valle de Lerma, Pcia. de Salta (área de estudio). Elaboración propia.

Todos los puntos de muestreo se ubicaron entre las isohietas de 700 y 800 mm y alrededor de la isoterma de 17°C de temperatura media anual.

En la región analizada, las precipitaciones registradas en diciembre de 2015 fueron menores al promedio, mientras que, entre enero y mayo de 2016, totalizaron 751 mm, superando en 304,2 mm a los valores medios (Cuadro 3.1). En diez de los trece meses que abarcó la evaluación se observó que la temperatura media superó al registro histórico.

Cuadro 3.1. Valores de precipitación media (pp), temperatura promedio (T media), temperatura media máxima (T media max) y temperatura media mínima (T media min), registrados entre mayo de 2015 y mayo de 2016 en la localidad Cerrillos (Valle de Lerma, Pcia. de Salta). Fuente: EEA INTA Cerrillos, Salta.

	2015							2016					
	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may
pp (mm)	3,8	5,6	8,9	8,6	2,5	12,2	45,2	57,9	236	322	79	114	7,4
T media (°C)	14,9	12,8	11,6	15,4	16,9	17,6	19,6	23,1	22,4	22,6	18,6	17,3	11,9
T media max (°C)	20,4	20,7	20,1	23,6	24,3	23,9	25,6	29,7	28	28,2	24	23,2	16,3
T media min (°C)	11,1	6,9	4,8	8,4	10	11,8	14,5	17,3	17,5	18,4	15	13,1	8,7

3.3.2. Características de los suelos analizados

De acuerdo a la Clasificación de los Suelos de Salta y Jujuy, realizada por Nadir y Chafatinos (124), los sitios Mora, Álamo, Vagón, Guachera, Silo, Once, Seis y Eucaliptos corresponden a la asociación de suelo La Merced, mientras que Monarca pertenece a la asociación Cerrillos y Casa, a Sumalao (Figura 3.4).

La asociación La Merced se encuentra ubicada en la provincia de Salta, al sur de la ciudad capital, en las localidades de La Merced y Rosario de Lerma, sobre abanico aluviales de relieve suavemente ondulado. El área corresponde al Chaco Serrano y presenta clima tropical. El material original lo constituyen rocas heterogéneas de areniscas, limolitas, calizas, margas, pizarras y filitas. Los suelos asociados son La Merced y Rosario de Lerma. La Merced es de

incipiente desarrollo; con perfil A, C; con texturas medianamente gruesa en superficie y media a medianamente gruesa en profundidad; moderadamente bien drenado; neutro a moderadamente alcalino; contenido de materia orgánico bajo; presencia de carbonatos; capacidad de intercambio catiónico baja a media; porcentaje de saturación de bases alto, pendiente del 2 %, erosión ligera. Clasificación Taxonómica Udifluvente típico. El suelo Rosario de Lerma es un suelo de incipiente desarrollo, perfil A, C; textura medianamente gruesa en superficie a gruesa en profundidad, pendiente del 2 al 6 %; erosión ligera; grava en profundidad. y clasificación taxonómica Udorthente típico.

La Asociación Cerrillos se encuentra en la provincia de Salta, al sur de la ciudad capital, se distribuye en forma meridiana desde el río Arenales en el norte hasta el río Rosario en el sur. Es una Subcuenca de los ríos Toro y Arenales. Se ubica sobre conos aluviales de relieve suavemente ondulado, en un área con clima tropical serrano correspondiente al Chaco Serrano. El material original lo constituyen rocas del Terciario como areniscas, limolitas, arcilitas y rocas del Ordovícico, lutitas y areniscas. Los suelos asociados son Cerrillos y La Merced. Cerrillos es de incipiente desarrollo; con perfil A, C; de textura media; bien drenado; moderada a extremadamente alcalino; salino; contenido de materia orgánica bajo; capacidad de intercambio catiónico moderadamente alta; porcentaje de saturación de bases moderada; pendiente del 2 al 6 %; erosión moderada. Clasificación Taxonómica Haplustepte típico. El suelo La Merced se describió en la asociación anterior. Al norte de la asociación Cerrillos se ubica la ciudad de Salta con 536113 habitantes, principal centro urbano de la provincia, con el 44% de la población provincial (88).

La Asociación Sumalao se encuentra en la provincia de Salta, al sur de la ciudad capital desde el río Arenales hasta su confluencia con el río Rosario. Corresponde a áreas serranas de la

cuenca Toro-Arenales. El clima es tropical serrano. Deriva de sedimentos lacustres. Los suelos asociados son Sumalao de textura media, perfil A, AC, C y clasificación taxonómica Endoaquepte fluvéntico y Los Remansos de textura gruesa, perfil A, AC, C y clasificación taxonómica Haplustol fluvéntico.

3.3.3. Manejo del cultivo de alfalfa

Todos los sitios fueron preparados con cincel y rastra de discos y se sembraron en el otoño de 2015 con variedades de alfalfa de grupos de latencia 8 y 9, con densidad de siembra entre 14 y 17 kg ha⁻¹ de semilla peleteada, utilizando sembradoras en líneas. Recibieron riego suplementario y se pastorearon, entre cinco y seis veces al año, al inicio de floración o con 5 cm de rebrote basal, haciendo uso de un alambrado eléctrico con más de 200 vacas ha⁻¹.

Los sitios Mora, Vagón, Guachera, Álamo y Casa habitualmente se destinan a la producción de pasturas, ya que se encuentran en explotaciones dedicadas exclusivamente al tambo, mientras que Silo, Once, Seis, Eucaliptos y Monarca se emplean tanto para la producción de pasturas como para el cultivo de tabaco, poroto u hortalizas en explotaciones mixtas agrícolas-ganaderas.

3.3.4. Metodología de muestreo

Cada sitio constituyó una unidad experimental (UE) y en cada uno de ellos se instalaron dos transectas sobre las que se distribuyeron regularmente entre seis y ocho puntos de muestreos separados por 25 m uno de otro, dependiendo del tamaño del lote. En cada uno de los puntos de muestreo se determinaron las variables respuesta en dos tiempos, antes del primer pastoreo (90 días desde la siembra) (T1) y al final del primer año de utilización (T2).

3.3.5. Variables analizadas

3.3.5.1. Variables de suelo

Se determinaron variables físicas (textura, densidad aparente y Estabilidad de agregados) y variables químicas (materia orgánica, fósforo, pH y conductividad eléctrica)

3.3.5.1.1. Textura

La textura del suelo se cuantificó utilizando una muestra compuesta obtenida hasta los 20 cm de profundidad en cada punto de muestreo.

La determinación de la textura del suelo o análisis granulométrico consiste en la separación y cuantificación de las partículas de arena, limo y arcilla de una muestra de suelo y en la consulta del triángulo de texturas para obtener su clase textural. La cuantificación de las partículas minerales puede hacerse por el método de los tamices y por el método de sedimentación de las partículas. Este último se fundamenta en la Ley de Stokes para partículas sólidas que caen dentro de un fluido viscoso. Se utilizó el Método de Bouyoucus modificado, descrito por Gee y Bauder (73). Se pesó 50 g de suelo seco al aire, y tamizado por 2 mm. Se lo colocó en un frasco de vidrio de 500 ml, se adicionó 250 ml de agua destilada y 100 ml de solución de hexametáfosfato de sodio (50g l^{-1}), agitando toda la noche en forma vertical a 130 rpm a temperatura ambiente. Se trasvasó el contenido a una bureta de 1 l, se agitó durante 1 minuto, se introdujo el hidrómetro estándar ASTM 152 H, con escala Bouyoucus en g l^{-1} (8) y se realizaron lecturas a los 90 y 1440 minutos para obtener la fracción arcilla. Posteriormente, se pasó el contenido de la bureta a un tamiz N° 270 (53 micrones), se lavó y recolectó lo que no atravesó el tamiz, que corresponde a la fracción arena. Se colocó en una estufa por 24 horas a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se pesó. La fracción limo se obtiene

por diferencia entre el peso de la muestra y la suma de las fracciones de arcilla más arena. Se ajustaron las determinaciones por porcentaje de humedad de la muestra y temperatura. Para esto último, se preparó un blanco que contenía solo agua y hexametáfosfato de sodio.

3.3.5.1.2. Densidad aparente

La densidad aparente (dap) se determinó por el método del cilindro. En cada punto de muestreo se obtuvieron dos muestras no disturbadas de 0 a 5 cm (dap 0-5) y de 0 a 10 cm de profundidad (dap 5-10), utilizando cilindros de 4 cm de diámetro (Figura 3.5).



Figura 3.5: Cilindros para la determinación de densidad aparente del suelo.

Se siguió la guía para evaluación de la calidad y salud del suelo (184), según la cual primero se limpia la superficie del suelo, se coloca en posición vertical el cilindro muestreador y se lo

introduce golpeando la parte superior de un porta cilindro para que penetre hasta la superficie, sin que se comprima el suelo contenido en el tubo.

Posteriormente, se realiza un pozo paralelo al cilindro, se corta con cuchillo su parte inferior para separarlo del suelo y se lo extrae. Se enraza con cuidado, se limpian las paredes exteriores del cilindro y se retira el suelo contenido en cada cilindro colocándolo dentro de una bolsa plástica rotulada y se lleva al laboratorio para determinar su peso húmedo. Se dejan secar al aire hasta peso constante, se obtiene el peso seco contenido en el cilindro. Finalmente, se relacionan los pesos del suelo seco con el volumen del cilindro y se determina la densidad aparente del suelo expresada en g cm^{-3} ,

3.3.5.1.3. Estabilidad de los agregados

La estabilidad de los agregados del suelo (EAS) se determinó a través de la técnica de los microtamices para agregados entre 1 y 2 mm propuesta por Corvalán et al. (44). utilizando una muestra compuesta obtenida hasta los 20 cm de profundidad en cada punto de muestreo. En un microtamiz (Figura 3.6), que posee en el fondo una malla de 250 micrones, se coloca una muestra de suelo de 5 gr, con agregados de suelo entre 1 y 2 mm, se inserta en un equipo para tamizado en húmedo, el cual genera movimientos oscilatorios durante 5 minutos (Figura 3.7).

El suelo que queda en el microtamiz representa la fracción de agregados que resistieron la agitación en agua. Se seca en estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se pesa.

Se sumerge el microtamiz en calgón durante 12 horas. Transcurrido este tiempo, se lava para eliminar las partículas menores a 53 micrones y se seca en estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Finalmente, se pesa este residuo y se expresa la estabilidad de los agregados del suelo como porcentaje.



Figura 3.6. Microtamices utilizados para la determinación de la estabilidad de los agregados del suelo.



Figura 3.7. Tamizado en húmedo usando microtamices, con movimientos oscilatorios durante la determinación de la estabilidad de los agregados del suelo.

3.3.5.1.4. *Materia Orgánica*

El contenido de materia orgánica (MO) se evaluó entre 0 y 5 cm de profundidad (MOT 0-5) y entre 0 y 10 cm (MOT 0-10) se cuantificó utilizando las muestras de suelo extraídas con los cilindros de 0-5 y 0-10 cm para las determinaciones de densidad aparente del suelo.

La materia orgánica se determinó mediante la técnica de Walkley y Black, descrita por Page (133). Se sometió una muestra de suelo de 0,2 g seca y tamizada con malla de 500 micrones a una oxidación con dicromato de potasio en presencia de ácido sulfúrico concentrado. Luego, se valoró el excedente del dicromato de potasio con una solución de sal de Morh (Sulfato Ferroso Amoniacal) usando ferroina como indicador. Se utilizó un patrón de suelo para materia orgánica de 1,17% de materia orgánica, provisto por el Laboratorio Central de Análisis de la EEA Cerrillos del INTA.

Los niveles de MO pueden ser variables y estar relacionados con la textura (155) o con el manejo del suelo (4). Un porcentaje particular de materia orgánica puede resultar alto, medio o bajo, dependiendo de la granulometría del suelo. Para ajustar esta variabilidad, se ha elaborado el índice materia orgánica (IMO) (146), que relaciona el tenor de materia orgánica (MO) con el contenido de partículas finas (limo + arcilla), según la ecuación:

$$\text{IMO (\%)} = \left(\frac{\text{MO (\%)}}{\text{limo (\%)} + \text{arcilla (\%)}} \right) * 100$$

Se determinó el valor de IMO de 0 a 5 cm (IMO 0-5) y el de IMO de 0 a 10 cm (IMO 0-10).

3.3.5.1.5. *Fósforo*

El contenido de fósforo (P) se cuantificó utilizando una muestra compuesta obtenida hasta los 20 cm de profundidad en cada punto de muestreo.

Se utilizó la técnica de Bray y Kurtz II (29), según la cual se pesan 2.5 g de suelo y se colocan en un Erlenmeyer de 50 ml. Se adicionan 25 ml de la solución extractante. Se agita por 5 minutos en agitador. El extracto se filtra en papel de filtro y, simultáneamente, se preparan blancos solo con reactivos. Se toma una alícuota de 2 a 40 ml del extracto, dependiendo de la concentración de fósforo en solución (alícuotas de 5 a 10 ml son en general adecuadas para suelos bajos y medios en fósforo) y se coloca en un matraz aforado de 50 ml. Se adiciona agua hasta completar aproximadamente 40 ml. Se agregan 5 ml de reactivo, se agita y se completa volumen. Se espera 30 minutos y se lee en un espectrofotómetro a 882 nm. Paralelamente, se prepara una curva de calibración de fósforo.

3.3.5.1.6. pH

Se utilizó el método potenciométrico en suspensión suelo en agua destilada en relación 1:2,5 (95). En un recipiente de 50 ml, se pesó 20 g de suelo, previamente secado al aire y tamizado por tamiz de 2 mm. Se incorporaron con probeta 50 ml de agua destilada. Se agitó cada muestra con varilla de vidrio durante un minuto, dejándolas luego en reposo durante 12 horas. Se utilizó un equipo Oakton pH 510 Series. Al día siguiente, se calibró según las especificaciones con solución buffer 7 y 4. Se agitaron nuevamente las muestras y se determinó el pH de la suspensión. Se considera la lectura estable cuando no se observan modificaciones mayores a 0,02 unidades de pH en 20 segundos.

3.3.5.1.7. Conductividad eléctrica

La determinación de conductividad eléctrica (CE) se realiza luego de la determinación de pH, se introdujo en el recipiente que contiene de la dilución de suelo 1:2,5 el electrodo del

conductímetro, marca Altronix CTX II, previamente calibrado con solución de conductividad conocida, y se ajustaron las lecturas con temperatura (131).

3.3.5.2. Variables del cultivo

3.3.5.2.1. Densidad de plantas

La densidad de plantas (n° plantas) se determinó contando coronas sobre la superficie del suelo (161), las cuales se identificaron individualmente, dentro de un marco de 0,25 m² (38).

3.3.6. Análisis estadístico

La tendencia en la densidad de planta, densidad aparente del suelo 0-5 cm y densidad aparente del suelo 5-10 cm se estudió a través de un análisis de medidas repetidas en el tiempo, con tiempo como efecto dentro de cada unidad experimental (sitio). Para el análisis estadístico de las modificaciones en las variables respuesta, se propusieron siete modelos lineales generales y mixtos con distintas estructuras de covarianza, correlación residual, heteroscedasticidad residual y efectos aleatorios. Se consideró como efecto fijo la textura, el tiempo y su interacción. Mediante criterios de verosimilitud (AIC y BIC) y pruebas de cociente de verosimilitud restringida, se eligió para cada una de las variables respuesta analizadas el modelo que mejor describió la estructura de covarianza de los datos (54). Posteriormente, se realizó la comparación de medias para los efectos fijos usando la prueba LSD Fisher (10).

La asociación entre los indicadores de suelo y las variables respuesta se estimó a través de análisis multivariado. Se utilizó un análisis de conglomerados para agrupar y caracterizar a

los sitios evaluados. Se utilizó el paquete estadístico Infostat para los análisis estadísticos (53).

3.3.7. Análisis multivariado

Se analizó la relación entre la densidad de plantas y la densidad del suelo con los indicadores de suelo, materia orgánica del suelo, fósforo, tamaño de partículas, estabilidad de los agregados del suelo, pH, conductividad eléctrica y el índice de materia orgánica (IMO) a través del análisis multivariado. Para esto, en cada sitio se obtuvieron muestras compuestas alrededor de cada punto de muestreo, se secaron al aire y se tamizaron con tamiz de 2 mm previamente a las determinaciones realizadas personalmente en los laboratorios de la Universidad Nacional de Salta y del INTA-Cerrillos.

Se analizaron en 66 puntos de muestreo las variables edáficas y la población de la pastura. Estas dos últimas variables se analizaron en dos momentos.

Para establecer relaciones entre las variables respuesta y los indicadores de suelos, se utilizó el análisis de componentes principales, gráficos Biplot y de conglomerados, dentro del análisis multivariado. El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica estadística multivariante de simplificación que permite transformar un conjunto de variables correlacionadas entre sí en un conjunto sintético de variables no correlacionadas, denominadas factores o componentes principales (CP). El ACP permite estudiar la interdependencia de variables a través de una representación gráfica de los datos con un nuevo conjunto de variables, CP (10), que son ejes artificiales que permiten obtener gráficos de dispersión de observaciones (53).

Se realizó un dendrograma, que es una representación o diagrama que organiza los datos en subcategorías que se van dividiendo hasta llegar al nodo siguiente, simbolizando las ramas de un árbol que se van dividiendo sucesivamente (10).

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Agrupamiento de los sitios evaluados

La primera evaluación consistió en controlar la uniformidad en el tipo de textura de cada sitio, ya que Quiroga et al. (146) expresan que las modificaciones del suelo no pueden generalizarse, sino que deben ser estudiadas comparando suelos de similar textura (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Clasificación textural y granulometría de los diferentes sitios evaluados. (Franco Arenosos (FA), Franco (F), Franco Limosos (FL) y Franco arcillo Limoso (FaL)).

Sitio	Textura	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Seis	FA	53	37	10
Once	FA	59	33	8
Mora	FA	53	38	9
Guachera	FA	58	36	6
Monarca	F	44	47	8
Vagón	F	47	43	9
Silo	F	40	48	12
Eucaliptos	F	45	44	11
Álamo	FL	35	49	17
Casa	FaL	10	61	29

El criterio empleado para el agrupamiento por textura fue: Gruesa (arenoso (A), areno franco (AF), franco arenoso (FA)); Media (franco (F), franco limoso (FL), franco arcillo limoso (Fal), limoso (L)) y Fina (arcilloso (a), franco arcilloso (Fa), franco arcillo limoso (FaL),

arcillo limoso (aL), arcillo arenoso (aA)), de acuerdo a lo propuesto por Corvalán et al. (44) y Caruso et al. (39).

Los sitios se agruparon en textura media (Silo, Vagón, Eucaliptos, Monarca, Álamo), gruesa (Once, Seis, Mora y Guachera) y fina (Casa) (45).

Para conocer las similitudes entre los lotes, se utilizó la distancia métrica Euclídea de los datos de las variables (Cuadro 3.3). Los sitios franco arenosos, francos y franco limosos se pueden agrupar en textura gruesa y media (45). Presentaron las menores distancias Euclídeas (2,79; 3,01; 3,99) y pueden ser analizados en conjunto, mientras que el lote Casa, de textura fina, mostró las mayores distancias Euclídeas (5,15; 4,48; 5,35).

De acuerdo a la distancia Euclídea, el sitio Casa no se integrará en el análisis de los cambios en la población de alfalfa ni de la densidad del suelo, ya que por su textura presenta características que lo diferencian del resto. Se lo incluye posteriormente en el análisis multivariado para el análisis conjunto de los indicadores de suelo.

Cuadro 3.3. Matrices de distancias Euclídeas de los sitios donde se evaluaron los cambios en las pasturas y el suelo antes del primer pastoreo y al final del primer año de uso, bajo los efectos de la textura (Franco Arenoso (FA), Franco (F), Franco Limoso (FL) y Franco arcillo Limoso (FaL))

	FL	FA	F	FaL
FA	0	2,79	3,01	5,15
F	2,79	0	3,99	4,48
FL	3,01	3,99	0	5,35
FaL	5,15	4,48	5,35	0

De acuerdo a la clasificación de los suelos de Salta y Jujuy, Nadir y Chafatinos (124), en escala 1:200000, indicaron para la asociación La Merced suelos con textura franco arenosa y para la asociación Cerrillos, suelos francos, mientras que, para la asociación Sumalao,

informaron suelos de textura fina. En este estudio, a nivel de sitios, se observaron texturas que no reportaron los autores mencionados. En la asociación La Merced, se detectaron suelos franco arenosos, francos y franco limosos, en la asociación Cerrillos, suelos franco arenosos y en Sumalao, franco arcillo limosos.

3.4.2. Demografía y compactación del suelo en pasturas de alfalfa del Valle de Lerma

En cada sitio se determinaron, en dos momentos, antes del primer pastoreo (T1) y al final del primer año de uso (T2), las variables respuesta densidad de plantas y la densidad aparente a distintas profundidades (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Cambios en la densidad de plantas de alfalfa (n° plantas) y en la densidad aparente del suelo 0-5 cm (dap 0-5) y 5-10 cm (dap 5-10) antes del primer pastoreo (T1) y al final del primer año de uso (T2) en los sitios evaluados.

Sitio	n° plantas (plantas m ⁻²)		dap 0-5 (g cm ⁻³)		dap 5-10 (g cm ⁻³)	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2
Seis	111	34	1,3	1,6	1,6	1,5
Once	107	69	1,7	1,8	1,5	1,6
Mora	138	25	1,6	1,7	1,5	1,5
Guachera	102	20	1,5	1,6	1,6	1,6
Monarca	107	34	1,6	1,6	1,5	1,7
Vagón	62	26	1,5	1,5	1,4	1,5
Silo	77	33	1,7	1,7	1,5	1,8
Eucaliptos	161	39	1,3	1,7	1,3	1,8
Álamo	78	24	1,5	1,7	1,5	1,5
Casa	102	55	1,4	1,6	1,4	1,5

Las mediciones repetidas en cada sitio (unidad experimental, UE) proporcionan información sobre la tendencia en el tiempo (137). Se utilizó un diseño bifactorial de medidas repetidas,

siendo el factor inter-UE la textura del suelo (F y FA) y el factor intra-UE el tiempo (T1 y T2), con 5 repeticiones en suelos franco y 4 en franco arenoso. Los cambios en la densidad de plantas, dap 0-5 y dap 5-10, se analizaron con un arreglo de parcelas divididas (split-plot), con tiempo como efecto dentro de UE. Las medias se compararon con la prueba LSD Fisher ($p < 0,05$).

De acuerdo a los valores de AIC (Akaike's Information Criterion) y BIC (Schwarz's Bayesian Information Criterion), se escogió el modelo autorregresivo de orden 1 y varianzas residuales heteroscedásticas en el tiempo para analizar los cambios en la densidad aparente del suelo 0-5 cm y densidad 5-10 cm.

3.4.2.1. Análisis de los cambios en la densidad de plantas

El número de plantas m^{-2} presentó una disminución significativa entre T1 y T2 ($p < 0,0001$), lo que fue similar en las dos clases texturales ($p = 0,1068$), y no se observó interacción clase textural*tiempo ($p = 0,3439$), por lo que, la modificación en la cantidad de plantas fue igual en cada clase textural (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Cambios en la densidad de plantas de alfalfa (n° de plantas) antes del primer pastoreo (T1) y al final del primer año (T2) bajo el efecto de la textura del suelo.

Textura	n° de plantas (plantas m^{-2})	
	T1	T2
Media	93,5±7,87 Aa	30,75±3,30 Ba
Gruesa	110,0±8,73 Aa	35,38±3,66 Ba

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre texturas. Los valores son media \pm error estándar.

La cantidad promedio de plantas m^{-2} al primer pastoreo (T1) fue en de 105 con un máximo de 161, mientras que, al final del primer año de utilización (T2), la media fue de 36 plantas m^{-2} , con máximo de 69 y mínimo de 20. La densidad de plantas de alfalfa en T1 fue menor a la reportada para otras regiones del país (152, 154, 159), pero similar a la informada en ensayos en el Valle de Lerma (38, 137).

El stand de plantas presentó una disminución superior al 65% al final del primer año de utilización y se acercó al umbral mínimo de plantas que podría afectar la producción de la pastura (152). Esta tendencia declinante es coincidente con lo reportado por Caruso y Miranda (38), quienes informaron para el Valle de Lerma una caída al primer pastoreo desde 159 de plantas m^{-2} a 13 plantas m^{-2} al final del primer año de uso, y por Sosa et al. (167), quienes registraron una caída del stand de plantas de 116 a 56 plantas m^{-2} durante el primer año de aprovechamiento de una pastura de alfalfa.

Romero et al. (152), en Rafaela, Provincia de Santa Fe, expresaron que la evolución del stand de plantas en alfalfa mostró una tendencia declinante en el número de plantas m^{-2} entre los sucesivos recuentos, aun con densidades de siembra extremas (5 y 25 $kg\ ha^{-1}$).

Soto (169), en una experiencia de siembra de distintas densidades de alfalfa en Chile, menciona que al segundo año de la pastura las plantas logradas son el 50% de las semillas sembradas y que una población inferior a 40 plantas m^{-2} no es adecuada para mantener el nivel óptimo de producción.

Basigalup y Rossanigo (15) informaron que, independientemente de la cantidad de semilla que se siembre, habrá raleo de plantas en el tiempo. Contrariamente a lo esperado, el aumento de la densidad de siembra incrementa la cantidad de plantas inicialmente, pero se incrementa

la mortalidad por la mayor competencia entre las plantas y la población tiende a estabilizarse en valores similares, independientemente de la cantidad de semillas sembradas (168).

La disminución de la población de alfalfa es común durante su establecimiento (134), sin embargo, los estudios sobre los cambios demográficos de las poblaciones de alfalfa son escasos (161). Shi (161) sembró alfalfa con una densidad de 1944 semillas m^{-2} en Tucson, EEUU, y observó una curva de supervivencia con dos periodos de mortalidad y reportó que solo el 29% de las semillas sembradas germinaron y emergieron.

Para la región central de Santa Fe, tener un stand de alrededor de 250 plantas m^2 al primer pastoreo es considerado adecuado (154). Romero et al. (152), informaron que la densidad de plantas debajo de la cual se afectaría negativamente la producción de biomasa aérea de pasturas de alfalfa es de 30 plantas m^2 .

La cantidad de plantas al primer pastoreo encontradas en este experimento fue menor a la reportada en otras investigaciones y se alcanzaría el umbral de 30 plantas m^2 que afectaría el rendimiento al final del primer año de uso.

3.4.2.2. Cambios en la densidad del suelo

De acuerdo a los valores de AIC (Akaike's Information Criterion) y BIC (Schwarz's Bayesian Information Criterion), se escogió el modelo autorregresivo de orden 1 y varianzas residuales heteroscedaásticas en el tiempo para analizar los cambios en la densidad aparente del suelo 0-5 cm y densidad 5-10 cm.

La dap 0-5 incrementó en forma significativa entre los tiempos evaluados ($p=0,0003$) en ambas clases texturales de manera similar ($p=0,6423$) y sin que se verifique interacción

significativa textura*tiempo ($p=0,8628$). La dap 0-5 incrementó desde 1,54 a 1,66 g cm⁻³, tanto en texturas gruesas como en finas (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.6. Cambios en la densidad aparente 0-5 cm (dap 0-5) antes del primer pastoreo (T1) y al final del primer año (T2) bajo los efectos de la textura del suelo.

Textura	dap 0-5 (g cm ⁻³)	
	T1	T2
Media	1,54±0,03 Ba	1,66±0,02 Aa
Gruesa	1,56±0,04 Ba	1,65±0,03 Aa

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre texturas. Los valores son media ± error estándar.

La dap 5-10 se incrementó en forma significativa entre los tiempos evaluados ($p= 0.0063$) en los suelos de textura media, permaneciendo sin modificaciones en los de textura gruesa ($p=0,0030$). La dap 5-10 se incrementó en forma significativa desde 1,46 a 1,63 gr cm⁻³ en las texturas medias, sin modificarse en las gruesas entre 1,55 y 1,54 g cm⁻³ (Cuadro 3.7).

Cuadro 3.7. Cambios en la densidad aparente 5-10 cm (dap 5-10) antes del primer pastoreo (T1) y al final del primer año (T2) bajo los efectos de la textura del suelo.

Textura	dap 5-10 (g cm ⁻³)	
	T1	T2
Media	1,46±0,03 Ba	1,63±0,03 Aa
Gruesa	1,55±0,03 Aa	1,54±0,04 Ab

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre texturas. Los valores son media ± error estándar.

La densidad aparente que limitaría el crecimiento de raíces se ubica en 1,55 g cm⁻³ para texturas medias y para las gruesas en 1,60 g cm⁻³ (49). Al final del primer año de uso, se

superó los límites de densidad que podrían afectar el crecimiento de raíces por la presencia de capas compactadas en todos los sitios evaluados.

Pereyra et al. (137) informaron que, antes del primer pastoreo, la densidad aparente de una pastura de alfalfa con suelo franco, con 43% de limo y sin estructura en el Valle de Lerma fue de 1.4 g cm^{-3} y aumentó a 1.7 g cm^{-3} al inicio del segundo año de utilización. Los autores mencionaron que el índice de compactación pasó de 70 a 88%. Rápidamente desapareció el efecto de la remoción del suelo y la densidad se acercó a la máxima obtenida por el test Proctor durante el primer año de uso. Esto fue coincidente con lo planteado por Mon (119), quien afirma que la disminución de la densidad del suelo por la remoción en suelos con alto contenido de limo es de corta duración y tiende a una reconsolidación en forma rápida.

En Uruguay, Formoso (67) evaluó en tres experimentos el efecto de la compactación del suelo sobre la producción y la cobertura del suelo de 12 especies forrajeras desde el 2001 al 2005, determinando que raigrás fue la única especie que no modificó la cobertura en suelos compactados, mientras que alfalfa fue la especie más sensible y la que más disminuyó su cobertura. El autor informó que la alfalfa disminuyó el stand de plantas de 7,9 plantas por metro de surco a 4,3 y el rendimiento de 12247 kg ha^{-1} en parcelas no compactadas a 7190 kg ha^{-1} en suelos compactados. La mejora de la calidad del suelo está relacionada con mayor infiltración, aireación, macroporos, estabilidad de los agregados, materia orgánica, disminución de la densidad aparente y resistencia mecánica (158).

Durante el primer año de utilización en los suelos evaluados, hasta los 10 cm de profundidad, se observó un incremento de dap y se registraron valores que podrían afectar el crecimiento de raíces. Daddow y Warrington (49) plantean los límites de densidad entre los cuales se limitaría el crecimiento de raíces, para suelos franco arenosos entre $1,65$ y $1,75 \text{ g cm}^{-3}$.y para

suelos francos entre 1,45 y 1,55 g cm⁻³. Así, en estos últimos se podrían haber alcanzado valores de dap que podrían afectar el crecimiento de raíces por la presencia de capas endurecidas desde el inicio de la evaluación y durante el primer año de utilización.

3.4.3. Análisis de indicadores de calidad de suelo adicionales

Se analizaron otros indicadores de suelo determinados en laboratorio, los que arrojaron los siguientes resultados (Cuadro 3.8).

Cuadro 3.8. Valores promedio de estabilidad de los agregados (EAS), materia orgánica 0-5 cm (MO 0-5), materia orgánica 0-10 cm (MO 0-10), fósforo (P), pH, conductividad eléctrica (CE), índice de materia orgánica 0-5 cm (IMO 0-5), índice de materia orgánica 0-10 cm (IMO 0-10) observados en los sitios evaluados.

Sitio	EAS (%)	MO 0-5 (%)	MO 0-10 (%)	P (ppm)	pH	CE (mmhos cm ⁻¹)	IMO 5 (%)	IMO 10 (%)
Seis	42	4,2	4,1	166	6,8	0,55	7,5	6,9
Once	27	1,5	1,5	12	6,3	0,21	3,7	3,7
Mora	52	2,8	2,7	8	6,3	0,45	5,9	5,7
Guachera	73	3,4	3,1	15	6,3	0,56	8,5	7,7
Eucaliptos	34	2,4	2,6	33	6,8	0,43	4,7	5,0
Silo	20	1,9	1,7	43	7,4	0,59	3,4	3,1
Monarca	33	2,6	2,5	10	7,9	0,83	4,5	4,5
Vagón	56	3,4	3,3	33	6,7	0,61	6,4	6,2
Álamo	32	2,6	2,5	8	6,3	0,45	4,4	4,4
Casa	32	3,9	3,7	24	8,3	1,37	4,5	4,3

3.4.3.1. Estabilidad de los agregados del suelo

De acuerdo con los valores de referencia planteados por Corvalán et al. (44), se observa que en los suelos franco arenosos la EAS es buena en un sitio (20 a 40 % EAS) y muy buena en tres (> 40%). En los francos hay tres lotes buenos y solo uno muy bueno (Cuadro 3.8.). En

función de estos valores, la estabilidad buena podría indicar que el suelo no tiende a perder estructura y a formar costras superficiales (44),

3.4.3.2. Materia orgánica

Los contenidos de materia orgánica de los sitios analizados difieren entre lugares muy próximos entre sí. Se observa que el sitio Seis presenta un valor muy bueno (superiores a 3,9 %), mientras que los sitios Mora, Guachera, Monarca, Vagón y Eucaliptos presentan valores buenos (2,4 a 3,9 %). En dos casos, Once y Silo, se encontraron valores de MO menores al valor crítico de 2%, por debajo del cual se podría limitar el crecimiento normal de los cultivos (186).

La MO fue mayor en 0-5 cm que en 0-10 cm ($p=0,0125$), lo que es esperable debido a la cobertura vegetal de las pasturas y el aporte de carbono de las heces, que contribuyen a la agregación y estabilización del suelo (61).

3.4.3.3. Fósforo

Los contenidos de fósforo, al igual que los de materia orgánica, difieren entre lugares muy cercanos. Se observa que los sitios Seis, Vagón, Silo y Eucaliptos presentan valores altos de fósforo (superiores a 31 ppm), los sitios Once, Mora y Guachera presentan valores bajos (10 a 17 ppm), mientras que el sitio Mora presenta valores muy bajos (menor a 10 ppm).

Pilatti et al. (139) demostraron que para altas producciones de los alfalfares se presentaron limitantes en el suelo de ciertos nutrimentos esenciales. Estos autores encontraron a nivel de campo respuesta a la corrección del pH y a la adición de P en el centro de Santa Fe. Fontanetto et al. (66) afirman que la acidez del suelo tiene un efecto negativo sobre las leguminosas

debido a que afecta la fijación del N, disminuye la cantidad de nódulos y reduce la disponibilidad de P y Molibdeno (Mo). Quiñonez et al. (145), en un ensayo realizado en Esperanza, Departamento Las Colonias, Provincia de Santa Fe, sobre un suelo Argiudol típico Serie Esperanza, reportaron que en los tratamientos donde no se agregó P la producción de materia seca fue 26% menor.

En las explotaciones tabacaleras del Valle de Lerma es habitual el agregado de fertilizantes fosforados al suelo y, dado que son de baja movilidad, se acumula el fósforo en el suelo (42), por lo que los lotes analizados en las explotaciones tabacaleras podrían presentar mayores niveles de este nutriente que los lotes evaluados en explotaciones lecheras (46).

3.4.3.4. pH

Se observa que el rango de pH se ubicó entre 6,3 y 7,9. El 75% de los sitios evaluados son ligeramente ácidos o neutros. De acuerdo a la clasificación de Ortega y Corvalán (131), los suelos evaluados son ligeramente ácidos (pH 6,1 a 6,5) (Once, Mora y Guachera), neutros (pH 6,6 a 7,3) (Seis, Vagón y Eucaliptos) moderadamente básico (pH 7,4 a 7,8) , (Silo) , y básico (pH 7,9 a 8,4) (Monarca).

Para alcanzar adecuados niveles productivos, las pasturas de alfalfa necesitan una buena nutrición de los suelos y valores de pH edáficos cercanos a la neutralidad (157). Corvalán et al. (46), al analizar la distribución por quintiles de muestras de suelo del Valle de Lerma, informan que la media es de pH 6,6 (neutros) e indican que la presencia de suelos con acidez o alcalinidad es escasa.

3.4.3.5. Conductividad eléctrica

La alfalfa es un cultivo parcialmente tolerante, por lo que una concentración menor a 4 mmhos cm^{-1} es muy buena y no posee limitaciones (131). En todos los sitios evaluados, los niveles de conductividad eléctrica fueron muy buenos para el cultivo de la alfalfa y no presentaron limitaciones por el contenido de sales.

3.4.3.6. Índice de materia orgánica

En suelos de la región semiárida pampeana, en la Provincia de Buenos Aires, con buen manejo y prácticas agronómicas adecuadas, el valor del IMO debería ubicarse por encima de 5 (85). Un valor de IMO por debajo de este umbral sugiere la pérdida de MO en relación a la suma de arcilla más limo del suelo (65), lo que fue detectado en los sitios Once, Eucaliptos, Silo, Monarca, Álamo y Casa, en los cuales la materia orgánica podría estar retenida por las partículas del suelo y no disponible para las pasturas.

Se determinaron IMO 0-5 e IMO 0-10 utilizando los valores de materia orgánica, limo y arcilla obtenidos en cada punto de muestreo, dentro de cada sitio evaluado. Contrariamente a lo observado en el contenido de materia orgánica, en los valores de IMO 0 - 5 cm y IMO 0 - 10 cm en no se encontraron diferencias significativas ninguno de los sitios.

3.4.4. Análisis multivariado

De acuerdo con el análisis de componentes principales, CP1 y CP2 explican el 62% de la variabilidad total (Cuadro 3.9).

El eje que mejor permite diferenciar los grupos de textura es el CP1, mientras que en el CP2 se observan diferencias en las plantas y la densidad del suelo. En el CP1, las variables

positivas con mayor influencia son EAS (0,34); MO 0-5 (0,35), IMO 5 (0,39); IMO 10 (0,36) y dap 5-10 t2 (-0,28); n° plantas t2 (-0,26); dap 0-5 T1 (-0,21) entre las negativas. En el CP2, en cambio, las variables con mayor peso son Arena (0,44); dap 0-5 T1 (0,26); CE (-0,41); pH (-0,40); Limo (-0,35). (Cuadro 3.10).

Cuadro 3.9. Autovalores de los componentes principales (CP) del análisis multivariado entre las variables respuesta y los indicadores de suelo registrados en cada sitio analizado.

CP	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	5,93	0,35	0,35
2	4,53	0,27	0,62
3	2,02	0,12	0,75
4	1,55	0,09	0,83
5	1,23	0,07	0,90
6	0,84	0,05	0,95
7	0,40	0,02	0,97
8	0,38	0,02	0,99
9	0,12	0,01	1,00

El número de plantas inicial depende de la densidad aparente del suelo, IMO, la estabilidad de los agregados del suelo y la cantidad de partículas finas del suelo. Al final del primer año de uso, las pasturas presentaron menor cantidad de plantas, lo que estuvo relacionado con el incremento de la densidad superficial del suelo, la disminución de la materia orgánica y la disminución de la estabilidad de los agregados del suelo.

Se observó una dependencia directa entre las propiedades físicas y químicas del suelo. La descomposición de la materia orgánica por los microorganismos influye sobre la disponibilidad de nutrientes, la agregación, la porosidad y la densidad del suelo, permitiendo un crecimiento y desarrollo adecuado de las partes subterráneas de las plantas (71).

Cuadro 3.10. Correlación de las variables de componentes principales 1 y 2 (CP1 y CP2) del análisis multivariado entre las variables respuesta y los indicadores de suelo observados en cada sitio analizado. Con sombreado amarillo se destacan las variables con mayor influencia en cada componente principal.

VARIABLES	CP1	CP2
EAS	0,35	0,15
P	0,14	-0,05
MO 0-5	0,35	-0,23
MO 0-10	0,34	-0,26
pH	-0,11	-0,41
CE	0,07	-0,43
Arena	-0,03	0,44
Limo	-0,16	-0,33
arcilla	0,15	-0,04
IMO 5	0,38	0,12
IMO 10	0,38	0,11
dap 0-5 T1	-0,23	0,18
dap 0-5 T2	-0,27	0,24
dap 5-10 T1	0,22	0,26
dap 5-10 T2	-0,16	0,06
Plantas T1	-0,05	-0,01
Plantas T2	-0,24	-0,12

Los indicadores de suelo, estabilidad de los agregados, densidad aparente del suelo, porcentaje de arcilla e índice de materia orgánica, podrían ser utilizados para caracterizar la persistencia productiva de las pasturas en el Valle de Lerma.

El Biplot (Figura 3.8) es un gráfico de dispersión de las observaciones correspondiente a las dos primeras dimensiones del análisis de componentes principales, compuesto por un eje denominado Componente Principal 1 (CP1), abscisas o eje X y por otro llamado Componente Principal 2 (CP2), eje de las ordenadas (11).

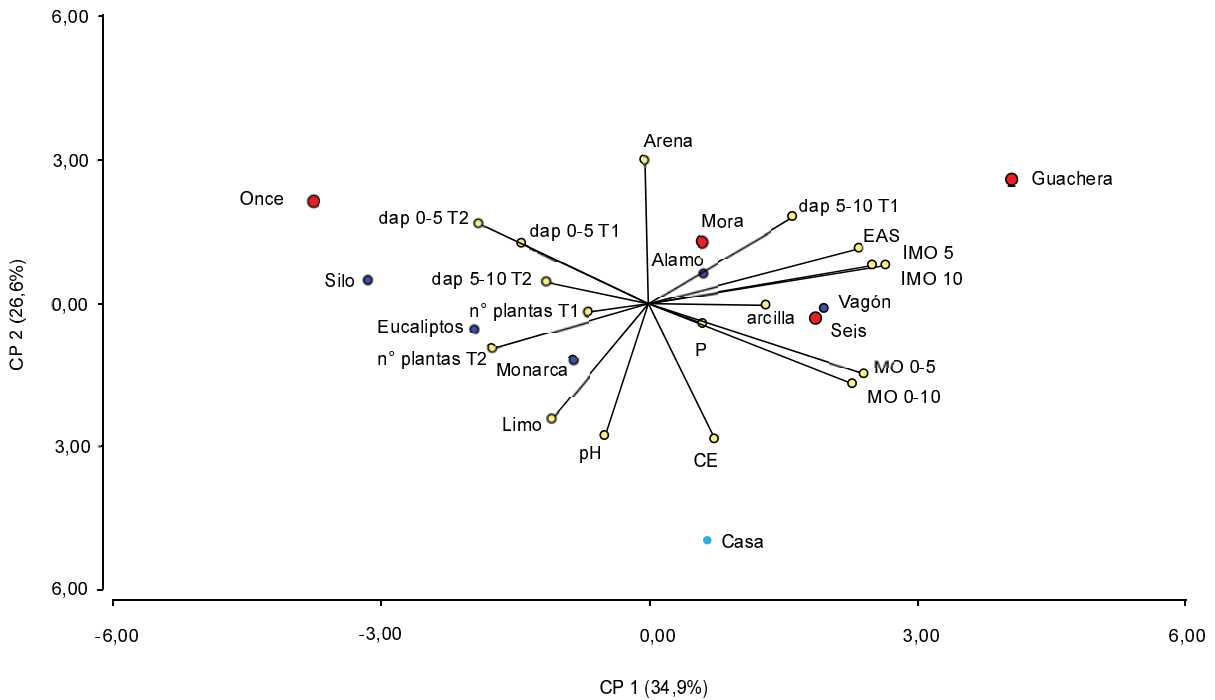


Figura 3.8. Relación entre las variables respuesta, los indicadores de suelo y los sitios evaluados en un gráfico Biplot de acuerdo a los Componentes Principales 1 y 2 (CP 1 y CP 2). ● Sitios textura gruesa, ● Sitios textura media, ● Sitios textura fina.

El biplot se construyó en base a una matriz de 17 x 66 y se observa que el CP1 y el CP2 explican el 62% de la variabilidad total de los datos, por lo que no es necesario incluir en el análisis, gráficos adicionales entre los otros componentes principales (85).

No se observaron diferencias estadísticamente significativas en la cantidad de plantas de alfalfa al final del primer año entre los tipos de textura del suelo, lo que se aprecia en el Biplot, donde plantas t2 es perpendicular a arena, limo y arcilla.

Los lotes se agruparon de acuerdo a los cambios en la densidad de plantas de alfalfa y al conjunto de indicadores de suelo en un dendrograma (Figura 3.9). La longitud de las ramas indica la magnitud de las distancias entre ellas. Se agrupa objetos cercanos entre sí, uniéndolos al conglomerado más cercano, hasta que se forma un solo conglomerado que integra a todos los objetos (11). Se observan tres grupos: el grupo 1 está formado por los sitios Once, Silo, Eucaliptos y Monarca; el grupo 2, por Mora, Álamo, Vagón, Seis y Guachera y el grupo 3, por Casa.

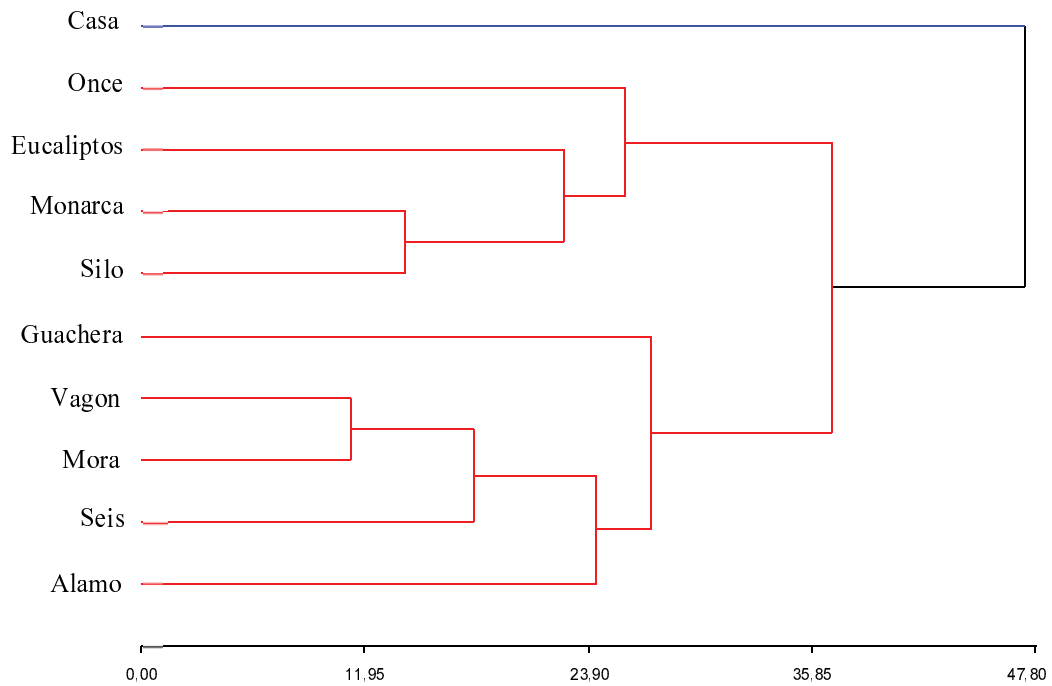


Figura 3.9. Agrupamiento de los sitios donde se evaluaron los cambios en las pasturas y el suelo antes del primer pastoreo y al final del primer año de uso, en gráfico dendrograma.

Los sitios del grupo 1, tres de textura media y uno de textura gruesa, se asocian con la mayor cantidad de plantas al final del año de utilización, los menores valores iniciales de densidad aparente del suelo 5-10 cm, los menores valores de IMO y los porcentajes de arcilla entre 8 y 12%. Los del grupo 2 presentaron las menores cantidades de plantas al final de la

evaluación, los mayores cambios en la densidad aparente del suelo hasta los 5 cm de profundidad y presentaron entre 47 y 66% de partículas finas. El sitio Casa mostró un comportamiento distinto al resto de los lotes evaluados.

3.5. CONCLUSIONES

En el Valle de Lerma las pasturas de alfalfa presentan menor cantidad de plantas que en otras regiones del país en el mismo momento. Se determinó antes del primer pastoreo una población máxima de alfalfa de 110 plantas m^{-2} y una disminución significativa a 35 plantas m^{-2} al final del primer año de aprovechamiento, que la acercaría al umbral mínimo de 30 plantas m^{-2} y que podría afectar la producción de la pastura.

Al final del primer año de uso, se superó la densidad aparente que limitaría el crecimiento de las raíces hasta los 10 cm de profundidad en las texturas evaluadas.

El índice IMO, el cual incorpora la cantidad de partículas finas del suelo, tuvo una correlación mayor con los cambios en la densidad de plantas de alfalfa que el contenido de materia orgánica del suelo.

Los indicadores de calidad física y química presentan valores que afectan la persistencia de la pastura de alfalfa. Se encontró correlación entre el número de plantas y los indicadores de suelo: estabilidad de los agregados; densidad aparente del suelo; porcentaje de arcilla e índice de materia orgánica. Por esta razón, estos indicadores podrían ser usados para caracterizar la calidad del suelo con pasturas en el Valle de Lerma.

Capítulo 4

Población de alfalfa en relación a la variedad y la densidad de siembra en el Valle de Lerma.

4.1. INTRODUCCIÓN

La alfalfa es una pastura perenne con escasa resiembra natural (104). Shi (161) indica que la curva de vida de la alfalfa presenta fuerte mortandad de plantas en etapas tempranas, y baja en estadios intermedios o tardíos. A medida que aumenta la densidad de siembra, se obtiene un mayor número inicial de plantas, pero luego presenta mayores disminuciones en el tiempo (37).

Romero et al. (152), en Rafaela, Provincia de Santa Fe, probaron densidades de siembra entre 5 y 25 kg ha⁻¹ y no obtuvieron diferencias significativas en la producción de forraje y en el número de plantas al final del primer año de utilización.

Soto y López (168) evaluaron en Chile tres variedades de alfalfa con densidades de siembra entre 10 y 30 kg ha⁻¹ y observaron que con las densidades más bajas se obtenía un menor stand inicial de plantas; sin embargo, todas las poblaciones decrecían y tendieron a igualarse a los 36 meses. Además, los autores reportaron que el rendimiento de forraje no se incrementó con el aumento de la densidad, pero sí registraron una disminución del peso de las raíces a los 12 meses después de la siembra.

Palmer y Winn-Williams (134), en un estudio desarrollado en Nueva Zelandia, probaron diferentes densidades de siembra e indicaron que la tasa de mortandad de plantas es directamente proporcional a la cantidad de semillas sembradas. Mencionaron que altas densidades no extienden la producción de la pastura, ya que después de varios años desde la siembra, la cantidad de plantas que se mantenían en producción era superior en las parcelas con baja densidad (5 kg ha⁻¹) en comparación con las de mayor densidad (16,8 kg ha⁻¹). También indicaron que una densidad de 30 plantas m⁻² fue suficiente para obtener la máxima producción de forraje.

Leach (102) analizó la supervivencia de alfalfa en un ensayo de manejo del pastoreo en Queensland, Australia, e informo una población inicial de 40 plantas m^{-2} , que posteriormente disminuyó a 13 al final del sexto año de utilización, con una pérdida anual de cinco plantas $m^{-2} \text{ año}^{-1}$.

4.1.1. Recuperación de pastura de alfalfa

Un exitoso establecimiento de la alfalfa requiere de una adecuada cantidad de plantas que sea persistente en el tiempo (120). Independientemente de la cantidad de semilla que se siembre, habrá raleo de plantas durante su utilización (15). La disminución de la población de alfalfa se relaciona con factores bióticos y abióticos (161), como la densidad de siembra, el manejo del pastoreo (32), el exceso de agua en el suelo durante el aprovechamiento, enfermedades (104), la fertilidad del suelo (15) o la presencia de capas compactadas (109).

Las recomendaciones actuales sugieren que, cuando la población de alfalfa cae por debajo de 44 (177) o 30 (134) plantas m^{-2} , es el momento de renovar la pastura. Romero et al. (152), en un ensayo en Rafaela, Provincia de Santa Fe, alcanzaron el umbral de 30 plantas m^2 luego del tercer año de utilización. Sevilla et al. (159), en Río Negro, lo alcanzaron entre el cuarto y quinto año, dependiendo de la densidad de siembra.

En el Valle de Lerma, durante el primer año de uso, la cantidad de plantas disminuye continuamente y, al inicio del segundo año, sería escasa para mantener la producción con rendimientos económicamente viables (6). En esta región, Pereyra et al. (137) y Caruso y Miranda (38) reportaron poblaciones entre 27 y 19 plantas m^{-2} al final del primer año de utilización. La baja cantidad de plantas estaría asociada a cambios en el suelo,

fundamentalmente a las modificaciones en el espacio poroso y a la estructura física de los suelos.

La recuperación de las pasturas puede ser definida como una serie de acciones que tienen por objetivo extender su vida productiva, aumentar la capacidad de carga, reemplazar plantas viejas o enfermas (177) y mejorar la calidad del suelo (123).

La recuperación puede ser parcial o total. La primera se define como la siembra, sin laboreo previo, de una o más especies forrajeras sobre una pastura con baja cantidad de plantas, mientras que la segunda incluye la destrucción de la pastura deteriorada con laboreo del suelo, seguido por la resiembra de otro cultivo (177). Implica la aplicación de prácticas agronómicas, tales como laboreo del suelo, fertilización, control de malezas y siembra, con el objetivo de aumentar la población y producción de la pastura (81, 101).

La estrategia de renovación depende del grado de degradación de la pastura. Cuando es severo, la opción más viable es el laboreo del terreno y el establecimiento de un nuevo cultivo (36).

4.2. OBJETIVOS E HIPOTESIS

Hipótesis

El incremento de la población de alfalfa puede estar condicionado por pérdidas de calidad física del suelo en el Valle de Lerma.

Objetivo general

Evaluar el efecto de la densidad de siembra y la variedad sobre la población de plantas de alfalfa al final del primer año de uso en relación a los cambios en el suelo.

Se establecieron dos objetivos específicos, los cuales se analizaron con dos experimentos independientes. En el experimento 1 el objetivo específico fue evaluar la persistencia de variedades de alfalfa. Mientras que en el experimento 2 el objetivo específico fue analizar el efecto de distintas densidades de siembra sobre la población de pasturas de alfalfa.

4.3. EXPERIMENTO I

4.3.1. Materiales y métodos.

4.3.1.1. Ubicación geográfica.

El experimento se desarrolló en un establecimiento agropecuario dedicado exclusivamente a la producción de leche, ubicado en el centro de la Provincia de Salta, en el Valle de Lerma, en cercanías de la localidad de Campo Quijano ($24^{\circ}55'19''S$ y $63^{\circ}35'53''O$), departamento Rosario de Lerma, a 30 km de la ciudad de Salta y al que se accede a través de la Ruta Nacional N° 51.

4.3.1.2. Datos climáticos

Los valores registrados desde julio de 2014 hasta julio de 2015 para las precipitaciones y las temperaturas máximas y mínimas promedio se muestran en el Cuadro 4.1. Se observa que las precipitaciones se concentran entre noviembre y abril, con un valor promedio de 612.5 mm. Las precipitaciones promedio entre julio 2014 y julio 2015 se ubicaron en el registro histórico, pero se produjeron eventos extremos en febrero y principalmente en marzo (205.5 mm). Se observó un incremento de la temperatura mínima durante todo el periodo evaluado, destacándose las mínimas promedio entre agosto y diciembre de 2014, que superaron a la media histórica.

Dado que las precipitaciones se concentran fundamentalmente entre los meses de noviembre y abril, es necesario el uso de agua de riego durante el resto de los meses para disponer de forraje a lo largo del año (128).

Cuadro 4.1. Valores de precipitación media (pp), temperatura promedio (T media), temperatura media máxima (T media max) y temperatura media mínima (T media min), registrados entre julio de 2014 y julio de 2015 en la localidad Cerrillos (Valle de Lerma, Pcia. de Salta). Fuente: EEA INTA Cerrillos, Salta.

	2014							2015					
	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
pp (mm)	2,6	0,0	0,0	31,7	20,4	58,2	121,4	185,7	205,5	28,2	3,8	5,6	8,9
T media (°C)	11,1	15,1	18,2	21,9	20,5	16,5	22,0	21,3	20,0	19,0	14,9	12,8	11,6
T media max (°C)	19,9	25,2	26,1	29,2	27,0	26,1	28,4	26,9	25,0	23,9	20,4	20,7	20,1
T media min (°C)	3,8	7,2	17,5	21,3	20,0	20,0	17,2	17,4	17,0	15,5	11,1	6,9	4,8

4.3.1.3. Características del suelo

El ensayo se ubica en la asociación de suelos La Merced (descrita en el Capítulo 3), los que son, de incipiente desarrollo, perfil A, C; texturas medianamente gruesa en superficie y media a medianamente gruesas en profundidad, imperfecta a moderadamente bien drenados, masivos (124), sin estructura (137) y que al momento de la siembra presento las siguientes características: 64% de arcilla más limo, estimado con la técnica de Bouyoucus modificada (73); 2,2% de materia orgánica, por Walkley y Black (127, 133); 0,17% de nitrógeno, por Kjeldhal (126); pH en solución igual a 6,2, por método potenciométrico; 4 ppm de fósforo, por Bray y Kurtz (29); 65% de estabilidad de agregados del suelo, por la técnica de los microtamices (44) y densidad aparente igual a 1,35 g cm⁻³, por el método del cilindro (184). El cultivo antecesor fue maíz para silo y el suelo se preparó con cincel más rastra de disco de tiro excéntrico. Se fertilizó con 100 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico, dosificado con el cajón

fertilizador de la sembradora y aplicado con tubos de descargas independientes en el mismo momento de a la siembra. Luego de la siembra, el suelo recibió riego gravitacional para asegurar la germinación de las semillas.

4.3.1.4. Pastura evaluada

Se sembraron tres variedades de alfalfa de grupos de latencia 8 y 9 (Ecotipo local, Patriarca y Sequel) (Figura 4.3), con 18 kg ha⁻¹ y una separación entre hileras de 17,5 cm.

En agosto de 2014 cada variedad se asignó al azar a una macroparcela. de 200 m de largo y 25 m de ancho. Durante el periodo de aprovechamiento, las macroparcels se pastorearon simultáneamente al inicio de floración o con 5 cm de rebrote basal, usando alambrado eléctrico, con una carga instantánea de 210 vacas en ordeño ha⁻¹ y humedad gravimétrica del suelo superior al 14%.

4.3.1.5. Unidad experimental

Se utilizó un muestreo sistemático (51) para cuantificar en una misma área la densidad de plantas de alfalfa y evaluar los cambios en el suelo (137). En cada macroparcela, se estableció una transecta de 120 m sobre la que se establecieron al azar 6 puntos equidistantes de muestreo (unidad experimental, UE). En cada unidad experimental, se determinó el número de plantas de alfalfa en tres momentos (14/12/14, 19/03/15 y 07/07/15) y la densidad aparente del suelo (19/03/15 y 07/07/15). Se extrajeron muestras compuestas de suelo para determinar la estabilidad de los agregados (EAS) y la materia orgánica (MO) en dos fechas (19/03/15 y 07/07/15).

4.3.1.6. Variables analizadas

Las variables respuesta fueron: densidad de plantas (n° plantas) y densidad aparente del suelo de 0-10 cm (dap).

4.3.1.6.1. Densidad de plantas

El número de plantas en cada unidad experimental se estimó por el recuento de coronas sobre la superficie del suelo dentro de un marco de 0,25 m² (161). Se realizó la identificación individual de cada corona en tres momentos (14/12/14, 19/03/15 y 07/07/15) con un marco de 0,25 m².

4.3.1.6.2. Densidad aparente 0-10 cm

En cada unidad experimental se sacaron muestras no disturbadas con cilindro de 4 cm de diámetro y 10 cm de profundidad para la determinación de densidad aparente del suelo, siguiendo la Guía para evaluación de la calidad y salud del suelo del USDA (184), tal como se describió en el Capítulo 3.

4.3.1.7. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de las modificaciones en el número de plantas, se propusieron siete modelos lineales generales y mixtos con distintas estructuras de covarianza, correlación residual, heteroscedasticidad residual y efectos aleatorios. Se consideraron como efectos fijos la variedad, el tiempo y su interacción. Mediante criterios de verosimilitud (AIC y BIC) y pruebas de cociente de verosimilitud restringida, se eligió el modelo que mejor describió la estructura de covarianza de los datos (11). Posteriormente, se realizó la comparación de

medias para los efectos fijos usando la prueba LSD Fisher (54). Se utilizó Infostat para los análisis estadísticos.

Se aplicó el análisis de medidas repetidas en el tiempo. Para este análisis, se debe aceptar que la correlación entre medidas repetidas es constante dentro de la UE. Se asume simetría compuesta y se puede analizar como parcelas divididas (split-plot) con tiempo como sub-parcela (171). En este caso, solo se puede aplicar el ANOVA si las varianzas de las diferencias de pares de tiempos son constantes (condición de esfericidad), lo cual puede probarse mediante el test de Mauchly. Si se cumple la condición de esfericidad, se puede aplicar el modelo de parcelas divididas, pero cuando no se cumple, el modelo split-plot no es válido. En tal caso, se deben modelar estructuras de covarianzas distintas a la de simetría compuesta mediante modelos mixtos (97).

4.3.1.8. Análisis de regresión

Se analizó a través de un análisis de regresión la relación entre el número de plantas y los cambios en los indicadores de suelo: densidad aparente, materia orgánica, y estabilidad de los agregados.

Se cuantificaron las modificaciones de los indicadores físicos de suelo densidad aparente y estabilidad de los agregados con respecto a los valores de la siembra para realizar una regresión lineal con número de plantas m^{-2} , para lo cual se obtuvieron muestras disturbadas en tres momentos (antes de la siembra, 19/03/15 y 07/07/15) alrededor de cada punto de muestreo (UE). Posteriormente, se secaron las muestras al aire y se tamizaron con tamiz de 2 mm, previamente a las determinaciones de laboratorio.

4.3.1.9. Análisis de laboratorio

Se determinó textura, materia orgánica y estabilidad de los agregados del suelo. El tamaño de partículas se estimó por Bouyoucus modificado (73), la materia orgánica por Walkley y Black (127, 133) y la estabilidad de agregados por la técnica de microtamices (44). Las determinaciones se realizaron en 54 muestras compuestas de acuerdo a lo descripto en el Capítulo 3, en los laboratorios de la Universidad Nacional de Salta y del INTA-Cerrillos.

4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.1. Cambios en la densidad de plantas de alfalfa

En este ensayo, se determinó la ausencia de esfericidad de los datos ($p=0,016$) a través del test de Mauchly, por lo que se modelaron siete estructuras de covarianza (54). De acuerdo con los valores de AIC (Akaike's Information Criterion) y BIC (Schwarz's Bayesian Information Criterion), se escogió el modelo 7 de covarianzas sin estructura de correlación residual y variancias residuales heterogéneas en el tiempo para analizar los cambios en el n° plantas m^{-2} de alfalfa.

Se observaron diferencias significativas en la cantidad de las plantas desde el primer pastoreo hasta el final de la evaluación ($p<0,0001$), tendencia que fue similar en las tres variedades ($p=0,90$) en las tres fechas analizadas ($p=0,20$). Las tres variedades presentaron las mismas modificaciones en cada una de las fechas analizadas.

No se encontraron diferencias significativas en la densidad de plantas al primer pastoreo entre variedades en diciembre de 2014, que se ubicó entre 127 y 134 plantas m^{-2} (Cuadro 4.2), similar a la población al primer corte reportada por Cangiano (37) en un ensayo de densidades de siembra en Balcarce. En este, se lograron 100 y 125 plantas m^2 para la variedad CUF 101

en siembras de otoño e invierno respectivamente. También fue equivalente al stand informado por Sosa et al. (167), quienes, en Zavalla, Santa Fe, indicaron un stand de 116 plantas m⁻² al inicio del aprovechamiento.

Cuadro 4.2. Evolución de la densidad de plantas de alfalfa (n° plantas) durante dos años (2014 y 2015) bajo el efecto de la variedad.

Variedad	densidad de plantas de alfalfa (n° plantas m ⁻²)		
	31/12/14	19/3/15	7/7/15
Ecotipo	134,4±9,4 Aa	43,3±6,3 Ba	24,7±1,6 Ca
Patriarca	134,4±5,6 Aa	50,0±3,9 Ba	18,6±3,0 Ca
Sequel	127,2±3,4 Aa	57,3±4,3 Ba	32,0±4,0 Ca

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre variedades. Los valores son media \pm error estándar.

Con una población inicial entre 133 (107) y 150 (37) plantas m² homogéneamente distribuidas, se puede lograr producciones de forraje adecuadas. Sevilla et al. (159) afirman que, independientemente de la cantidad de semilla que se siembre, habrá raleo de plantas en el tiempo y la reducción dependerá de la intensidad con que actúen en distintos ambientes características limitantes del suelo, textura fina, bajo nivel de materia orgánica y compactación.

Romero et al. (152), en un ensayo en Rafaela, expresan que la evolución del stand de plantas en alfalfa mostró una tendencia declinante en el número de plantas m⁻² entre los sucesivos recuentos desde el primer aprovechamiento, aun con densidades de siembra extremas (5 y 25 kg ha⁻¹).

Palmer y Winn-Williams (134) determinaron que con menos de 30 plantas m⁻² de alfalfa los lotes son poco productivos, lo que puede estar asociado a excesiva profundidad de siembra,

estratos de suelo densificados, bajos contenidos de fósforo y nitrógeno o fallas en la metodología de riego. Para mejorar la productividad de estos sitios y dado que la alfalfa no tiene resiembra natural, estos autores proponen la interseembra con gramíneas o el laboreo profundo del suelo.

Sevilla et al. (159) evaluaron la persistencia de alfalfa en el Valle del Río Negro en un ensayo iniciado en 1996, en el que se sembraron entre 6 y 24 kg ha⁻¹ determinaron que el número de plantas fue mayor con las densidades de siembra más altas y se iguala en un periodo muy corto, siendo este efecto particularmente intenso durante el primer año. El autor indica que el número de plantas se redujo desde la siembra hasta la finalización del período experimental, logrando para todas las densidades evaluadas entre 21 y 29 plantas m⁻² al cuarto año de utilización.

Las pérdidas de plantas reportadas para el Valle de Lerma son superiores a las registradas en otras partes del país (159, 167). En este ensayo, se observó una pérdida promedio del 75% del stand de plantas, con una declinación constante (102) desde 132 a 25 plantas m⁻² al final del primer año de utilización. Este comportamiento fue similar a lo encontrado en 2011 por Pereyra et al. (137), quienes determinaron los cambios de la población de alfalfa durante el primer año de uso en un tambo del Valle de Lerma y reportaron que la cantidad de plantas m² cayó de 110 antes del primer pastoreo a 21 al final del primer año de utilización. Es similar también a lo informado por Caruso y Miranda (38), quienes reportaron un stand de plantas antes del primer pastoreo entre 171 y 147 plantas m², que cayeron entre 9 y 16 plantas m² al fin del primer año de evaluación. Las observaciones del cambio del stand se deben realizar desde el inicio del aprovechamiento para evitar confundir las pérdidas de plantas con otros factores de manejo a largo plazo (37).

4.4.2. Densidad aparente del suelo

Partiendo de un valor de dap de $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ al momento de la siembra, el suelo presentó valores similares durante marzo de 2015 (Cuadro 4.3), los que se incrementaron en forma significativa entre 23% (Ecotipo y Patriota) y 23,5% (Sequel) a junio de 2015.

Daddow y Warrington (49) establecen una relación entre la textura del suelo y el nivel de compactación del suelo que afecta el crecimiento de las plantas. Estos autores indican que el efecto de densificación del suelo se observa por encima de un umbral de densidad de suelo que está en función del contenido de arena, limo y arcilla. Un suelo que posee una densidad aparente mayor a su valor umbral está altamente compactado y en él se habría detenido el crecimiento de las raíces, lo que afectaría la productividad de las plantas. De acuerdo con la metodología propuesta por los autores, el umbral de densidad para el suelo evaluado en este ensayo, con 47% limo y 17% arcilla (suelo franco), estaría situado entre $1,45$ y $1,55 \text{ g cm}^{-3}$. De esta forma, por encima de este rango de densidad, se afectaría el crecimiento de la vegetación, lo que podría haber ocurrido en julio de 2015, donde se registraron densidades superiores a $1,6 \text{ g cm}^{-3}$. Los valores obtenidos en este ensayo son coincidentes con los informados por Pereyra et al. (137). En un ensayo sobre alfalfa en el Valle de Lerma, reportaron antes del primer pastoreo una densidad aparente de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, obteniéndose un valor de $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ al final del primer año de utilización, lo que significaría un aumento del 24% respecto al primer registro. Los autores informan que la densidad al primer pastoreo se debería al efecto residual de la remoción del suelo por la labranza sobre un suelo de textura fina y sin estructura, que tiende a una reconsolidación en el corto plazo. Lo que es coincidente con Mon (119), quien expresa que los efectos del laboreo son de corta duración y que los

suelos con estructura degradada son muy susceptibles a una pronta reconsolidación natural, desapareciendo rápidamente el efecto de la labranza.

Cuadro 4.3. Valores de densidad aparente 0-10 cm (dap 0-10) durante el año 2015 bajo el efecto de la variedad.

Variedad	dap 0-10 (g cm ⁻³)	
	19/3/15	7/7/15
Ecotipo	1,3±0,03 Ba	1,6±0,02 Aa
Patriarca	1,2±0,03 Ba	1,6±0,02 Aa
Sequel	1,3±0,05 Ba	1,7±0,01 Aa

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre variedades. Los valores son media \pm error estándar.

Formoso (67) evaluó en Uruguay mediante tres experimentos el efecto de la compactación del suelo sobre la producción y la cobertura del suelo de doce especies forrajeras desde el 2001 al 2005, determinando que el *rye grass perenne* (*Lolium perenne*) fue la única especie que no modificó la cobertura en suelos compactados, mientras que alfalfa fue la especie más sensible y la que más disminuyó su cobertura. En este sentido, el autor informa que la producción de *rye grass* fue indiferente a la compactación del suelo. En cambio, la alfalfa disminuyó el stand de plantas de 7,9 a 4,3 plantas por metro, la cobertura del suelo en 69% y el rendimiento de 12247 kg ha⁻¹ en parcelas no compactadas a 7190 kg ha⁻¹ en suelos compactados.

Pereyra et al. (137) y Caruso y Miranda (38) informaron que, en suelos similares al evaluado, la densidad aparente aumentó a medida que se incrementó la profundidad, lo que podría deberse a factores propios del suelo, migración de partículas finas o al pisoteo animal (58).

La modificación en el espacio poroso por el aumento de la densidad puede ser responsable de la pérdida prematura de los alfalfares por la reducción del crecimiento radicular (40, 109).

4.4.3. Estabilidad de los agregados del suelo

A la siembra, el suelo bajo análisis registró una estabilidad de los agregados (EAS) de 65%, que se puede considerar como excelente (39, 131), registrando en marzo de 2015 una disminución superior a 48 unidades porcentuales (Cuadro 4.4.). Estos suelos se comportaron como inestables (119) y las propiedades físicas tales como la densidad aparente, la distribución del tamaño de los poros o la estabilidad de los agregados regulan la aireación del suelo y, por lo tanto, el crecimiento de las plantas (125).

Cuadro 4.4. Valores de estabilidad de los agregados del suelo (EAS) durante el año 2015 bajo el efecto de la variedad.

Variedad	EAS (%)	
	19/3/15	7/7/15
Ecotipo	17 \pm 3,8 Ba	50 \pm 4,6 Aa
Patriarca	10 \pm 1,5 Ba	40 \pm 2,3 Aa
Sequel	10 \pm 3,7 Ba	31 \pm 0,5 Aa

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre variedades. Los valores son media \pm error estándar.

Durante julio de 2015, se recuperó la EAS, posiblemente debido a la reconsolidación del suelo por el proceso de humedecimiento y secado que acerca las partículas del suelo, lo que coincide con Varela et al. (188), quienes, en un ensayo de cultivo de cobertura en suelos franco-limosos de la región pampeana, encontraron variaciones temporales significativas en la estabilidad de los agregados en relación a los cambios en la humedad del suelo.

4.4.4. Materia orgánica

Los suelos evaluados presentaron contenidos regulares de materia orgánica (MO) (131) y no mostraron variación a lo largo del periodo evaluado (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Valores de materia orgánica (MO) durante el año 2015 bajo el efecto de la variedad.

Variedad	MO (%)	
	19/3/15	7/7/15
Ecotipo	2,1 \pm 0,1 Aa	2,2 \pm 0,03 Aa
Patriarca	2,2 \pm 0,2 Aa	2,2 \pm 0,1 Aa
Sequel	2,1 \pm 0,08 Aa	2,2 \pm 0,09 Aa

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre variedades. Los valores son media \pm error estándar.

Los valores de materia orgánica obtenidos son coincidentes a los reportados por Ferrary et al. (63), quienes, para un Inceptisol en el Valle de Lerma que recibe habitualmente labranza mínima vertical, reportaron un contenido de 2,24% de MO.

4.4.5. Regresión lineal

Se analizaron las modificaciones de dap, EAS y MO en cada UE en las fechas 19/3/15 y 07/07/15 con respecto a los valores al momento de la siembra. En cada fecha, las modificaciones de cada indicador se acumularon y se hicieron regresiones lineales con las modificaciones en el n° pl m^{-2} . En la fecha 19/03/15, se encontró una relación significativa entre el n° pl m^{-2} y la disminución de EAS ($y = -35,9 + 1,76x$; $R^2 = 0,9$; $p < 0,0001$), mientras que en la fecha 07/07/15 la relación fue significativa entre n° pl m^{-2} con una disminución de EAS ($y = -499,94 + 8,17x$; $R^2 = 0,9$; $p = 0,0006$) y con el incremento de dap ($y = 499,7 + 509,6x$;

$R^2 = 0,9$; $p=0,01$). De esta forma, se observó primero una disminución de la estabilidad de los agregados del suelo, a lo que se le sumó posteriormente un incremento de dap , que podría haber afectado la densidad de plantas de alfalfa por modificaciones en el espacio poroso, las cuales afectaron el movimiento de agua y aire del suelo. Esto se debe a que se produjo una redistribución del volumen poroso por la compactación que habría afectado la capacidad para conducir agua, aire y permitir el desarrollo de raíces (125).

4.5. CONCLUSIONES DEL EXPERIMENTO I

La población de alfalfa disminuyó desde 134 a 32 plantas m^{-2} , tendencia que fue similar en las tres variedades.

Se observó primero una disminución de la estabilidad de los agregados del suelo, y posteriormente se identificó un incremento de la densidad aparente desde 1,2 a 1,7 $g\ cm^{-3}$.

Bajo las condiciones evaluadas, se determinó una disminución del 75% del número de plantas de alfalfa que no estaría asociada con la variedad, sino con la baja estabilidad de los agregados del suelo y con el incremento de la densidad aparente del suelo durante el primer año de uso que habría afectado el desarrollo de las raíces.

4.6. EXPERIMENTO II

4.6.1. Materiales y métodos

4.6.1.1. Ubicación del ensayo

El ensayo se realizó en una explotación ($24^{\circ}55'19''S$, $63^{\circ}35'53''O$) dedicada al tambo y a la producción de tabaco, entre las rutas provinciales N° 36 y N° 845.

4.6.1.2. Características del suelo

La experiencia se realizó sobre suelo franco de la asociación La Merced (descrita en el Capítulo 3), masivo y sin estructura, que presentó 64% de partículas finas formadas por arcilla y limo, determinado por la técnica de Bouyoucus modificada. (73). La materia orgánica fue igual a 2,2%, estimada por la técnica de Walkey & Black (127, 133); pH 6,2 (Método potenciométrico) y 0,15 mmhos/cm de conductividad eléctrica (conductímetro). Todos los análisis fueron realizados personalmente de acuerdo a las técnicas descritas en el Capítulo 3.

4.6.1.3. Pastura a evaluar

Se sembró una pastura de alfalfa sobre un lote que tuvo al cultivo de tabaco como antecesor (Figura 4.1).



Figura 4.1. Lote donde se evaluó el efecto de la densidad de siembra sobre la cantidad de plantas de alfalfa en relación con cambios en el suelo. Al final del cultivo antecesor (tabaco) y previamente al laboreo del suelo para la implantación de la pastura.

El suelo se preparó con cincel más rastra de discos y antes de la siembra se aplicó un rolo desterronador (Figura 4.2.). La siembra se realizó en mayo de 2017 con una variedad de grupo de latencia 9, peleteada con 20% de material inerte, poder germinativo del 93%, con sembradora en líneas a 17.5 cm con doble disco abresurco.

Inmediatamente a la siembra, recibió riego de gravitacional (este primer riego se denomina “de asiento”) para lograr la germinación de las semillas de 100 mm aproximadamente y se continuó regando hasta diciembre para cubrir la demanda del cultivo de 550 mm (196).

La pastura se aprovechó con vacas de tambo al inicio de floración o con 5 cm de rebrote basal, usando alambrado eléctrico con carga instantánea alta de 210 vacas en ordeño ha⁻¹ y humedad del suelo superior al 14%, cercana a la humedad límite para la compactación (137).



Figura 4.2. Estado del lote donde se evaluó el efecto de la densidad de siembra sobre la cantidad de plantas de alfalfa en relación a cambios en el suelo, previo a la siembra de la pastura.

4.6.1.4. Diseño del experimento

Se utilizó un diseño bloques completamente aleatorizado, con cuatro repeticiones con medidas repetidas en el tiempo. Los tratamientos fueron tres densidades de siembra D6, D12 y D18 (6, 12, 18 kg ha⁻¹, sin material inerte). La unidad experimental fue de 10 m de largo por 3 m de ancho.

4.6.1.5. Variables evaluadas

En cada unidad experimental se estableció un punto de muestreo fijo en el que se determinó número de plantas (n° plantas m⁻²), densidad aparente del suelo de 0 a 5 (dap 0-5) y 5-10 cm de profundidad (dap 5-10) y estabilidad de los agregados del suelo (EAS). en tres momentos: antes del primer pastoreo (T1, 7/8/17), antes del verano (T2, 6/11/17) y al final del verano del primer año (T3, 9/3/17).

La variable n° plantas m⁻² se determinó contando coronas sobre la superficie del suelo en un marco de 0,25 m² (161). La dap 0-5 y 5-10 se determinó en muestras no disturbadas, extraídas con cilindros metálicos de 5 cm de diámetro a 5 y 10 cm de profundidad, siguiendo el método del cilindro (184), y EAS por el método de los microtamices (44). Las variables se determinaron de acuerdo a la metodología descrita en el Capítulo 3.

4.6.1.6. Análisis estadísticos

Para evaluar los cambios en n° plantas m⁻², EAS, dap 0-5 y dap 5-10, primero se determinó la simetría compuesta de los datos a través del test de Mauchly y posteriormente se realizó un análisis de bloques con arreglo de parcelas divididas (split-plot), con tiempo como efecto dentro de UE. Las medias se compararon con la prueba LSD Fisher ($p \leq 0,05$). Se utilizó R e Infostat para los análisis estadísticos.

4.6.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se cumplió el supuesto de homogeneidad de las varianzas de las diferencias entre pares de tiempos (Esfericidad), estimado por el test de Mauckly.

4.6.2.1. Cambios en la densidad de plantas de alfalfa

La densidad de plantas de alfalfa no presentó diferencias significativas en T1 (Cuadro 4.6) en las tres densidades de siembra ($p=0.7274$), disminuyendo en forma significativa más de 63% hasta T3 ($p>0,001$).

La producción de alfalfa puede ser descrita por tres componentes de rendimiento: plantas por área, tallos por plantas y producción por tallo (150). Durante el primer año de utilización, el rendimiento de forraje se asocia positivamente con la cantidad de plantas logradas (151), cuya persistencia depende de la supervivencia de las plantas iniciales, ya que su resiembra es nula (27).

Cuadro 4.6. Cambios en cantidad de plantas de alfalfa (n° plantas) antes del primer pastoreo (T1), antes del verano (T2) y al final del primer año de uso (T3) bajo los efectos de la densidad de siembra (6 kg ha⁻¹ (D6), 12 kg ha⁻¹ (D12), 18 kg ha⁻¹ (D18)).

	T	Densidad de siembra (kg ha ⁻¹)		
		D6	D12	D18
n° plantas m ⁻²	T1	185±40 Aa	165±6 Aa	172±73 Aa
	T2	100±11 Ab	118±41 Ab	129±27 Ab
	T3	66±31 Ac	64±5 Ac	61±23 Ac

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre densidades. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre fechas. Los valores son media ± error estándar.

La alfalfa presenta disminución en la cantidad de plantas durante el primer año de uso (161), aun cuando la preparación del suelo y la siembra se hicieron correctamente (144), ya que habría raleo de plantas durante su utilización (15). La disminución de la población de alfalfa depende de la densidad de siembra (152), manejo del pastoreo (37), fertilidad del suelo (25), presencia de capas compactadas (38, 137), lento escurrimiento y agua estancada sobre la superficie (169).

Los valores iniciales obtenidos en este ensayo son similares a los reportados por Caruso y Miranda (38), quienes informan al primer pastoreo, en un ensayo con tres dosis de yeso en una pastura de alfalfa en el Valle de Lerma, densidades entre 147 y 171 plantas m^{-2} . Además, son superiores a los informados por Pereyra et al. (137), quienes reportan al primer pastoreo una población de 110 plantas m^{-2} .

La cantidad de plantas inicial fue menor a la reportada en otras regiones. En Rafaela, Provincia de Santa Fe, Romero et al. (152) informan que, a medida que aumenta la densidad de siembra, se obtiene un mayor número inicial de plantas.

Sevilla et al. (159), en un ensayo en Hilario Ascasubi, Buenos Aires, con densidades entre 286 y 1143 plantas m^{-2} sembradas a 15 cm entre hileras, informan que la muerte de plantas fue mayor con densidades de semilla crecientes y ocurrió principalmente desde la siembra hasta el primer verano. Al cabo de este período, las densidades de planta tendieron a igualarse en los cuatro tratamientos. Indican también que densidades de 12 $kg\ ha^{-1}$ de semilla neta permitieron maximizar la producción de forraje.

Se observó una disminución del 63% de la cantidad de plantas. Al final del primer año de uso, se observó entre 61 y 66 plantas m^{-2} . En el Valle de Lerma, Caruso y Miranda (38) obtuvieron al final del primer año de aprovechamiento entre 9 y 16 plantas m^{-2} . Pereyra et

al. (137), también en el Valle de Lerma, informaron 27 plantas m⁻² al final del primer año de uso. En Rafaela, Mattera et al. (112) indican que una población de 250 plantas m⁻² al final del primer año es adecuada para no afectar la producción de la pastura.

Al final del primer año de uso, la cantidad de plantas podría limitar la producción de las pasturas (134, 154).

4.6.2.2. Estabilidad de los agregados del suelo

Antes del primer pastoreo, la estabilidad de los agregados fue baja (<10%), mejorando a regular (10 a 20%) en T2, posiblemente debido a ciclos de secado-humedecimiento, y finalmente disminuye a valores menores a los iniciales al final del verano (131) (Cuadro 4.7).

Cuadro 4.7. Cambios en la estabilidad de los agregados del suelo (EAS) antes del primer pastoreo (T1), antes del verano (T2) y al final del primer año de uso (T3) bajo los efectos de la densidad de siembra (6 kg ha⁻¹ (D6), 12 kg ha⁻¹ (D12), 18 kg ha⁻¹ (D18)).

	T	Densidad de siembra (kg ha ⁻¹)		
		D6	D12	D18
EAS (%)	T1	7 _{±2} Ab	8 _{±2} Ab	8 _{±1} Ab
	T2	14 _{±1} Aa	13 _{±13} Aa	14 _{±1} Aa
	T3	4 _{±1} Ac	5 _{±2} Ac	5 _{±1} Ac

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas (p<0,05) entre densidades. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas (p<0,05) entre fechas. Los valores son media ± error estándar.

La estabilidad de los agregados es la resultante de la presión que ejerce el aire al ser desplazado por el ingreso de agua durante el proceso de humedecimiento, ya que el agua succionada por los capilares de los agregados comprime el aire ocluido en su interior. Si las burbujas que se forman no pueden salir a través de poros de mayor diámetro, los agregados

tienden a romperse (52) y las partículas del suelo puedan ser arrastradas por el agua. En este sentido, Barthes y Roose (13) determinaron en Francia, en ensayos bajo lluvia simulada, la pérdida de suelo después de 30 minutos y se la correlacionó negativamente con la cantidad de macroagregados estables en la superficie.

La cantidad y distribución de los agregados estables en el suelo se asocian con el contenido de materia orgánica y la cantidad de partículas finas. La primera estabiliza los agregados al mantener las partículas minerales unidas, reducir su hinchamiento y aumentar la fuerza intrínseca en ellos. Además, la estabilidad de los agregados está asociada con la distribución del tamaño de partículas y con los niveles de materiales cementantes (143). En este sentido, el índice de Materia orgánica relaciona el contenido de materia orgánica con las partículas finas de limo y arcilla (146, 187).

No todas las fracciones de la materia orgánica causan el mismo efecto sobre la estabilidad de los agregados. Los cambios en los pools lábiles que no están asociados a las partículas finas del suelo son los que parecen relacionarse más estrechamente con la estabilidad estructural (61). Las prácticas de manejo que alteren la dinámica de las fracciones lábiles de la materia orgánica incidirán sobre las fracciones lábiles (39). La materia orgánica particulada responde con rapidez a las alteraciones provocadas por el manejo. En los suelos bajo labranza convencional, las labranzas rompen los macroagregados, provocan la pérdida de la materia orgánica protegida dentro de ellos y su oxidación conduce a su reducción (63).

Pilatti et al. (139) mencionan que las gramíneas generan mayor cantidad de agregados estables al agua que las leguminosas, lo que podría estar asociado con el incremento de las fracciones lábiles de la materia orgánica generadas por hongos asociados a las raíces fasciculadas (142).

4.6.2.3. Densidad aparente del suelo

La dap 0-5 al inicio de la evaluación presentó valores críticos que podrían afectar el crecimiento de raíces. Los valores se incrementaron en T2 y T3 significativamente ($p=0,013$), de igual forma en las tres densidades ($p=0,4219$). La dap 5-10 también presentó valores que podrían afectar el crecimiento de las raíces desde T1, aumentando en forma significativa al final de la evaluación ($P=0,0439$). Durante el periodo analizado, se observó un adensamiento del suelo desde el primer pastoreo, lo que habría afectado el crecimiento de las raíces y el movimiento de agua del suelo (Cuadro 4.8).

Cuadro 4.8. Cambios en la densidad aparente entre 0-5 cm (dap 0-5) y densidad aparente entre 5-10 cm (dap 5-10) antes del primer pastoreo (T1), antes del verano (T2) y al final del primer año de uso (T3) bajo los efectos de la densidad de siembra (6 kg ha^{-1} (D6), 12 kg ha^{-1} (D12), 18 kg ha^{-1} (D18)).

	T	Densidad de siembra (kg ha^{-1})		
		D6	D12	D18
dap 0-5	T1	1,6±0,06 Ab	1,7±0,13 Ab	1,6±0,17 Ab
	T2	1,7±0,14 Aa	1,8±0,05 Aa	1,8±0,08 Aa
	T3	1,8±0,10 Aa	1,8±0,01 Aa	1,8±0,05 Aa
dap 5-10	T1	1,6±0,17 Ab	1,6±0,13 Ab	1,7±0,10 Ab
	T2	1,7±0,10 Ab	1,7±0,01 Aa	1,6±0,05 Ab
	T3	1,8±0,08 Aa	1,7±0,05 Aa	1,8±0,05 Aa

Para cada variable, letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre densidades. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre fechas. Los valores son media ± error estándar.

El establecimiento de niveles críticos de densidad del suelo provee una herramienta útil para el monitoreo de la condición estructural del suelo (96). Esto resulta de especial importancia en aquellos sistemas de producción donde la compactación puede ser un problema latente. Según Daddow y Warrington (49), la densidad aparente crítica disminuye al aumentar el

contenido de limo más arcilla del suelo y plantean, como límite para el crecimiento de raíces para un suelo como el analizado en este ensayo, entre 1,45 y 1,55 g cm⁻³, valores que fueron superados en todas las observaciones y en todas las profundidades.

Un importante efecto de la compactación es la reducción de la producción de la vegetación. Peretti y Caruso (136), en un ensayo en cámara de crecimiento, observaron que la compactación del suelo afectó la producción de alfalfa, ya que el máximo rendimiento de forrajimasa se logró con una densidad de 1,35 g cm⁻³ que fue descendiendo con el aumento de la densidad, obteniendo el menor resultado con densidad de 1,6 g cm⁻³.

4.6.3. CONCLUSIONES EXPERIMENTO II

Antes del primer pastoreo las tres densidades de siembra evaluadas no presentaron diferencias significativas en la cantidad de plantas de alfalfa. Al final del primer año de aprovechamiento la población disminuyó de igual forma en las tres densidades de siembra. La cantidad de plantas disminuyó en forma significativa más de 63% desde 185 a 66 plantas m⁻².

La estabilidad de los agregados se modificó en forma significativa durante el ensayo. Antes del primer pastoreo, fue baja (menor a 10%), mejorando a regular (10-20%) y disminuyendo posteriormente a valores menores a los iniciales al final del verano.

Hasta los 10 cm de profundidad, se determinaron valores de densidad aparente que se ubicaron por encima del rango óptimo para el crecimiento de las raíces.

Los valores observados en la estabilidad de los agregados del suelo y en la densidad aparente podrían afectar la cantidad de plantas de alfalfa durante el primer año de uso.

En suelos francos del Valle de Lerma con baja estabilidad de agregados y compactación hasta 10 cm de profundidad, no se observó un aumento de la cantidad de plantas de alfalfa al primer pastoreo con el incremento de la densidad de siembra.

4.7. CONCLUSIONES

La cantidad de plantas al final del primer año de aprovechamiento podría limitar la producción de la pastura y estaría relacionada con los indicadores físicos de suelo.

La mejora en la cantidad de plantas no estaría asociada solamente a incrementos en la densidad de siembra o a la elección de la variedad, sino que, adicionalmente, se debería tener en cuenta la textura, la estabilidad de los agregados y la materia orgánica del suelo. Estos indicadores determinan el nivel de densidad aparente del suelo, la cual superó en todos los casos la densidad óptima para el crecimiento de las raíces.

La persistencia de las pasturas de alfalfa requeriría de modificaciones físicas del suelo para disminuir los niveles de densidad aparente del suelo.

Capítulo 5

Recuperación de pasturas de alfalfa con subsolado más adición de yeso en el valle de Lerma.

5.1. INTRODUCCIÓN

La compactación es la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo debido a fuerzas externas (178, 194) que exceden su resistencia (78). Soil Science Society (166) define la compactación como el proceso por el cual las partículas del suelo son reorganizadas, aumenta el contacto entre ellas, disminuye el volumen del espacio poroso que regula el movimiento del agua y el aire (170) y restringe el crecimiento de las raíces. Puede ser caracterizada por la densidad aparente y la resistencia mecánica del suelo.

Entre los factores causantes de compactación en pasturas, se menciona a los animales en pastoreo (174) y los equipos agrícolas (165). Bilotta et al. (22) afirman que los animales afectan a la pastura por daños directos sobre las plantas (defoliación, materia fecal, orina y pisoteo) e indirectos sobre el suelo a causa de la compactación que perjudica posteriormente a las plantas por modificaciones en el espacio poroso del suelo.

El aumento de la densidad del suelo durante el pastoreo (106) está en función del peso del animal, la superficie de contacto de las pezuñas, la energía cinética durante el movimiento (77), el contenido de humedad del suelo (176) y la carga animal al pastoreo (94). La humedad del suelo determina su capacidad de soporte. En suelos secos, el pisoteo no genera daños, en cambio, cuando está húmedo, comprime el suelo debajo de la pata y colapsan los poros de mayor tamaño (175).

Greenwood et al. (74) demostraron que el efecto de la carga animal sobre las propiedades físicas de los suelos es acumulativo en el tiempo y que el suelo tiende a un nivel estabilizado de densidad aparente y resistencia en el largo plazo (77).

La resistencia a la penetración y la densidad aparente son propiedades usadas para analizar la degradación del suelo por compactación debido a las actividades agropecuarias (19, 54,

75). La densidad aparente del suelo es la relación entre una masa de suelo y el volumen que ella ocupa (96). Este indicador presenta valores críticos diferentes según la textura del suelo: a medida que la textura se hace más gruesa, la densidad aparente presenta un valor crítico más alto (49).

A medida que se aumenta la densidad aparente, se reducen la porosidad total, la humedad del suelo y la conductividad del agua a través del perfil (192), por lo que los niveles críticos de densidad para los cultivos oscilan entre 1,4 y 1,7 g cm⁻³ (34). Bruand y Gilkes (31) mencionan que, con densidades del suelo superiores a 1,7 gr cm⁻³, el esfuerzo que ejercen las raíces y la baja aireación del suelo limitan el crecimiento de las pasturas (96), mientras que The Profitable Soils Group (179) indica que si la densidad aparente supera 1,6 g cm⁻³ en suelos arenosos o está por encima de 1,4 g cm⁻³ en limosos y arcillosos, la penetración de raíces es afectada por la disminución del espacio poroso (23).

Los suelos de uso agropecuario presentan amplio rango de densidades, las que están en función de la textura y el contenido de materia orgánica (108). La amplitud de valores dificulta su utilización para describir la compactación del suelo, por lo que se define la compactación relativa como el cociente entre la densidad aparente tomada a campo en una situación dada y la densidad máxima (117). Esta última se puede determinar a través del test Proctor (8) o a través de funciones de pedotransferencia.

El test Proctor (8) permite describir los cambios en la densidad del suelo sobre un rango de contenidos de agua, utilizando una cantidad constante de energía y determinando la densidad aparente máxima del suelo y el contenido de humedad a esa densidad. En este sentido, Marcolin y Klein (108) verificaron que la densidad máxima se relacionó significativamente con el contenido de materia orgánica y el de arcilla y que puede ser utilizada como un valor

de referencia para evaluar el estado de compactación de los suelos en un determinado momento, a través del índice de compactación (IC) (3). Si los valores de IC son muy elevados (cerca al 90%), significa que el suelo está muy cerca de la máxima compactación que puede admitir, con una severa disminución de los poros de mayor tamaño, lo que afecta al crecimiento de los cultivos (108).

La resistencia del suelo a la penetración es una propiedad física directamente relacionada con el crecimiento de las plantas y sirve como característica indicativa de compactación (23, 115). Se la puede definir como la resistencia del suelo a la introducción vertical de un penetrómetro, se expresa normalmente en unidades de presión y depende principalmente de la textura, la densidad aparente y el contenido de humedad (96). Diversos trabajos de investigación han demostrado considerable atención a los valores críticos de resistencia a la penetración, por encima de los cuales no se produce crecimiento de raíces (12, 23). Con valores de resistencia a la penetración superiores a 2 MPa, se reduce significativamente el crecimiento de las raíces (179) y el abastecimiento de agua y nutrientes (119), aunque Pilatti et al. (140) informaron que el valor de resistencia obtenido con penetrómetro sobreestima la resistencia del suelo en la cual cesa el crecimiento radicular e indicaron que está en función del contenido de arcilla del suelo.

Los penetrómetros son dispositivos que pueden ser introducidos en el suelo y medir la resistencia que ofrece a la penetración (193). Son capaces de detectar capas de suelo con alta resistencia a la penetración que pueden afectar el crecimiento y la distribución de las raíces (176). De esta forma, contribuyen a la evaluación indirecta de la degradación física y definen requerimientos de manejo de los suelos (179).

Existe una gran variedad de este tipo de instrumentos, cada uno con características particulares y adaptados para fines específicos, tales como el penetrómetro de impacto con cono dinámico (96). Micucci y López Menardi (116) propusieron un “sacamuestras de uso extendido” (SUE) para determinar la resistencia del suelo y, adicionalmente, obtener muestras de suelo para determinar densidad aparente.

Caruso y Miranda (38) informaron que, en una pastura de alfalfa en un tambo en el Valle de Lerma, pastoreado con cargas instantáneas de 210 vacas en ordeño ha⁻¹, la resistencia del suelo aumentó desde 0,61 Mpa antes del primer pastoreo a 3,2 Mpa después del quinto pastoreo (38). Por su parte, Pereyra et al. (137), también trabajando en pasturas similares en el Valle de Lerma, reportaron que el aumento de la resistencia del suelo es un efecto superficial que se observa hasta los primeros 7,5 cm del suelo.

5.2. RECUPERACIÓN DE PASTURAS

La cantidad, frecuencia e intensidad de las labores (44) y el pisoteo animal (193) incrementan la densidad y la resistencia mecánica del suelo (176) y disminuyen los macroporos (1), la materia orgánica (85) y el movimiento de agua y aire (33). La compactación del suelo (164) genera una espiral con retroalimentaciones negativas que afecta finalmente la producción de la pastura por disminución de la infiltración (22) (Figura 5.1).

En el Valle de Lerma, se han reportado al primer pastoreo entre 110 (137) y 147 plantas m⁻² (38), disminuyendo durante el primer año de utilización, entre 27 (137) y 19 plantas m⁻² (38). Esta caída es superior a la reportada por otros investigadores (111, 152, 153) y podría estar asociada a cambios en el suelo, fundamentalmente a modificaciones en el espacio poroso y a la estructura física de los suelos (94).

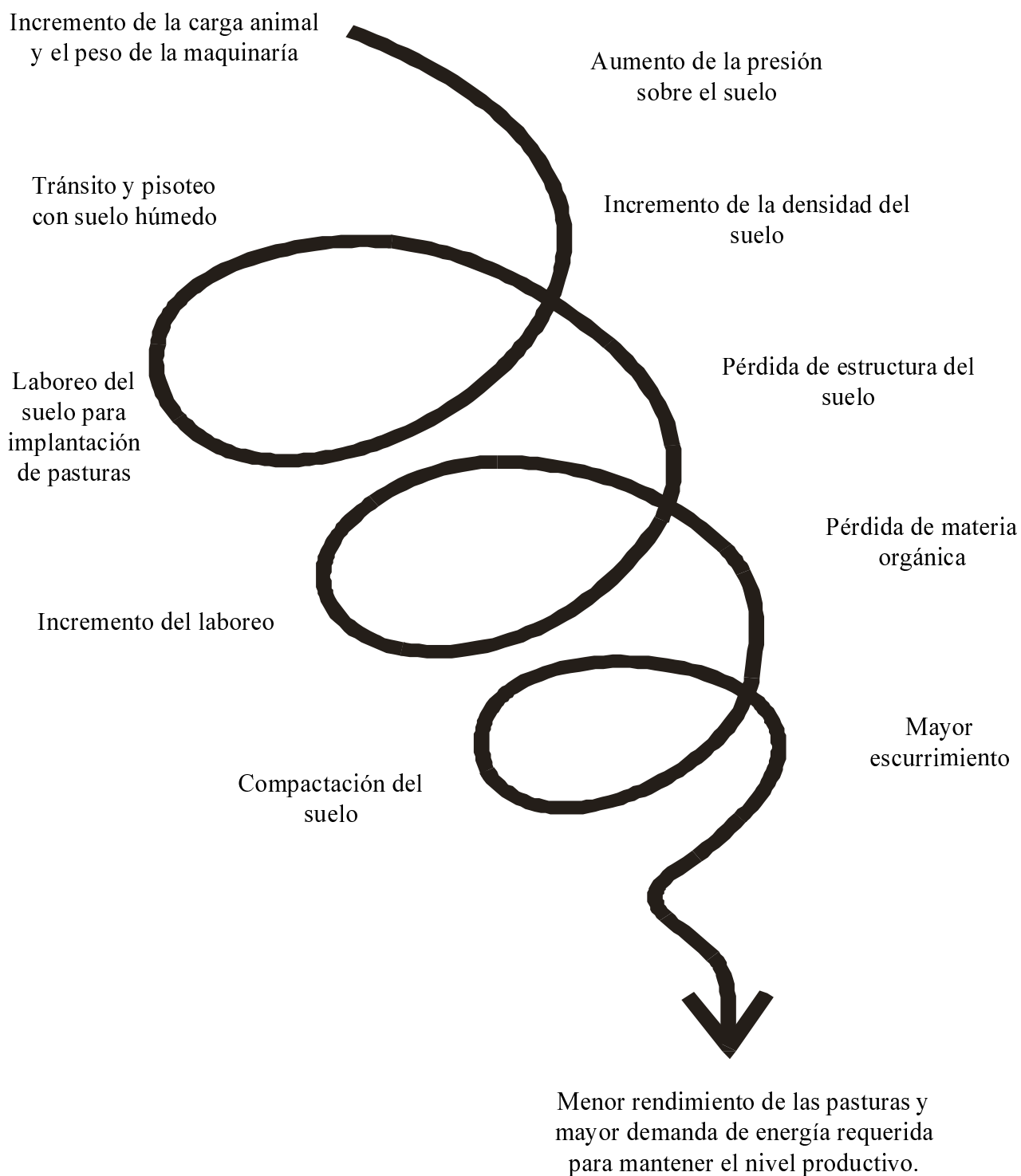


Figura 5.1. Diagrama conceptual del efecto de la compactación sobre una pastura en sistemas pastoriles. Elaboración propia en base a Sjoerd (164).

Peretti y Caruso (136) mostraron que la producción máxima de alfalfa en el Valle de Lerma se consiguió con densidad aparente del suelo de $1,35 \text{ g cm}^{-3}$, descendiendo gradualmente hasta el mínimo a $1,8 \text{ g cm}^{-3}$. Los autores indicaron que las raíces crecieron menos, fueron más finas y con ramificaciones laterales a medida que aumentó la compactación del suelo.

Pereyra et al. (137) reportaron que la densidad aparente aumentó desde $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, antes del primer pastoreo, a $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ al final del primer año de uso, en pasturas implantadas en suelos laboreados con cincel y rastra de disco en sistemas lecheros en el Valle de Lerma. Este incremento del 25% de la densidad podría estar asociado a la desaparición del efecto del laboreo del suelo para la implantación de la pastura (119) y a una pronta reconsolidación natural por migración de partículas finas, exceso de laboreo, tránsito de maquinarias y pisoteo animal (31, 78, 176).

La recuperación de las pasturas no podrá ser realizada solamente a partir de modificaciones en el manejo del pastoreo (91), sino que requerirá cambios físicos del suelo (Figura 5.2).

King y Hobbs (93) expresan que hay tres etapas principales de degradación, con umbrales entre ellas que representan barreras a la recuperación del ecosistema potencial. En la primera etapa, las limitantes de la producción primaria se pueden solucionar modificando el manejo. Si se inicia un proceso de degradación, se atraviesa el primer umbral controlado por las interacciones bióticas. El sistema todavía tiene la capacidad para la recuperación si la causa de degradación es removida. En la última etapa, los procesos bióticos se presentan con severidad disfuncional y la función abiótica presenta daños más allá de su resiliencia y requieren de manipulación para recuperarse.

Navarro et al. (125) informa que las modificaciones en los parámetros físicos y químicos del suelo adquieren importancia cuando la pastura se encuentra en un estado avanzado de degradación y con procesos erosivos.

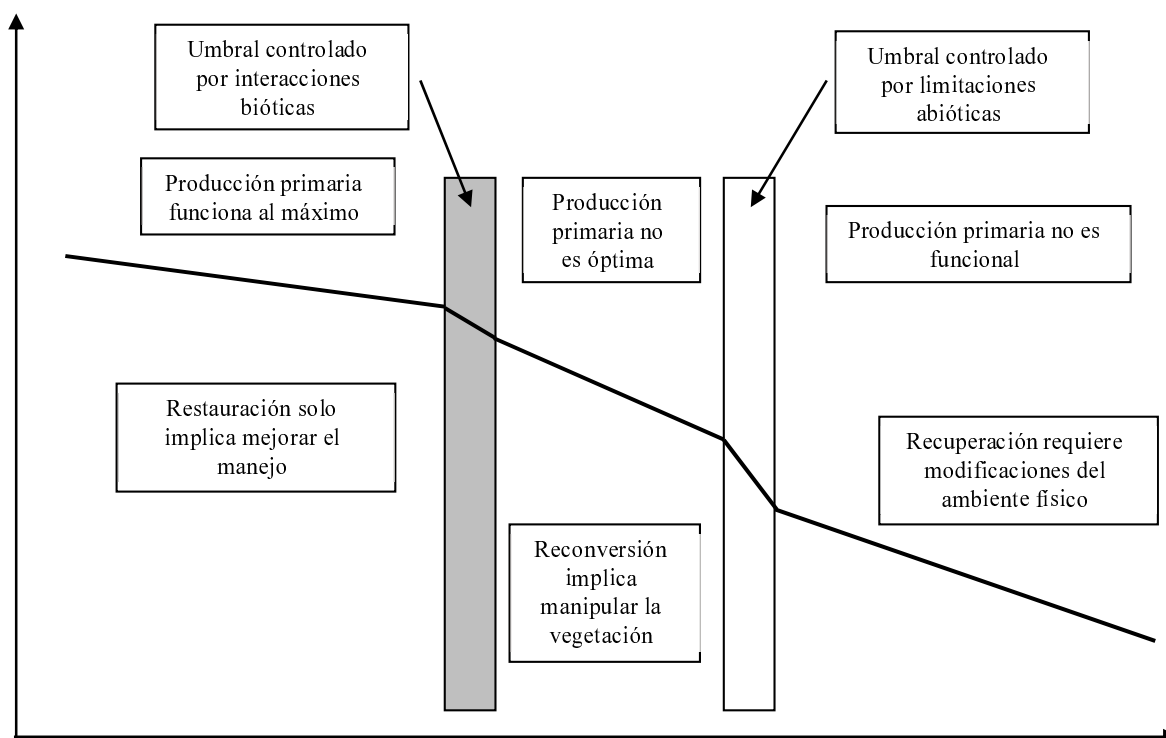


Figura 5.2. Umbrales bióticos y abióticos para pasturas en pastoreo, adaptado de King y Hobbs (93).

La productividad de las pasturas de alfalfa declina con el tiempo por la pérdida de plantas causada por diversos factores, entre los que se encuentra la compactación del suelo (36, 80). La alfalfa puede tolerar una reducción en la cantidad de plantas antes que la pérdida de rendimiento sea evidente (181). Cuando la cantidad de plantas declina por debajo de cierto nivel, se debe tomar la decisión de mantener o remover la pastura de alfalfa, ya que la utilización de una pastura con compactación del suelo puede no ser rentable si la producción no permite maximizar la producción animal (36). Con pasturas de alfalfa deterioradas, hay

tres decisiones que se pueden implementar: continuar cosechando la producción de la población marginal de la pastura, reemplazar la pastura por cultivos de mayor ingreso económico o recuperar la pastura de alfalfa utilizando técnicas agronómicas para mejorar su productividad (36).

Los procesos naturales de recuperación de los suelos compactados, tales como ciclos de humectación-desección, congelamiento-descongelamiento, actividad biológica, generación de poros por acción de raíces, incorporación de materia orgánica por rotación de cultivos, no son suficientes (92), debido a los ciclos productivos consecutivos a los que son sometidos los suelos (141) .

Mediante la comprensión de las características del subsuelo, se puede plantear planes de renovación o manejo de las pasturas que garanticen la persistencia de las plantas y prolonguen su producción (190). La mecanización agrícola aporta distintas alternativas para el control de la degradación física del suelo generada por la compactación, dependiendo de las características del terreno, la profundidad de la zona compactada y la severidad del proceso (9).

Las mejoras en las condiciones físicas del suelo pueden ocurrir naturalmente a través de las acciones de la biota del suelo (incluidas las raíces), los procesos de humedecimiento y secado y los ciclos de congelación y descongelación (78). Cuando la pastura templada es vista como un agroecosistema y se analiza la producción por encima y por debajo del suelo, se observa que más del 80% de la producción total se procesa por microorganismos descomponedores dentro de la red alimentaria del suelo. De esta forma, los microorganismos cumplen una función biológica en el reciclado de nutrientes esenciales desde los residuos orgánicos, de las plantas y las excretas de animales. Muchas de las especies de microorganismos pueden

mejorar la estructura física de los suelos mediante la formación de agregados estables al agua que forman la estructura porosa al incorporar residuos orgánicos que se combinan con partículas de suelo (86).

La renovación de pasturas alfalfas establecidas es una herramienta de manejo utilizada desde hace tiempo en Estados Unidos y Australia para renovar y extender la vida útil de pastura de alfalfa a través del control de la compactación del suelo (50, 81, 162, 181), ya que la regeneración natural de la calidad física del suelo puede demandar muchos años (78), a través de procesos biológicos (114).

Para controlar la compactación inducida por el tránsito y laboreo de maquinaria agrícola o el pisoteo animal, suelen utilizarse cinceles o subsoladores (9), algunos de los cuales se utilizan para el establecimiento o renovación de pasturas sin invertir o modificar la superficie del suelo (50, 113, 162).

Dann (50) informa que, en cinco años de ensayos en New South Gales, Nueva Zelanda, no encontró en la mayoría de los ensayos un aumento de la producción de forraje con el laboreo profundo para la renovación de pasturas. |

En Arizona, se utilizó para la renovación de una pastura de alfalfa con baja cantidad de plantas y presencia de compactación del suelo dos pasadas de rastra de dientes y resiembra de alfalfa. Los resultados mostraron que el rendimiento de la alfalfa no fue significativamente diferente en las renovadas contra las que no recibieron laboreo. Si bien en este ensayo el rendimiento no aumentó con el laboreo, el autor indica que la renovación de la alfalfa puede ser adecuada para la competición con las malezas (181).

Farre et al. (62) mencionan que las restricciones del subsuelo como la compactación conducen a una reducción en el crecimiento de las raíces, lo que limita la capacidad de los

cultivos para acceder al agua o los nutrientes del suelo con un menor rendimiento de grano. La eliminación de la compactación puede tener efectos positivos o negativos en el rendimiento del cultivo, dependiendo del tipo de suelo, el nivel de densidad del suelo y la disponibilidad de agua. Estos autores evaluaron la respuesta de rendimiento de grano de cultivos de trigo con laboreo profundo en suelos franco y franco arenoso, con tres niveles de compactación desde nula a severa en treinta sitios en el suroeste de Australia Occidental. Los resultados mostraron que los diferentes niveles de compactación causaron una reducción significativa del 63% de la profundidad de enraizamiento y que la eliminación de las restricciones del subsuelo con laboreo profundo puede generar un rendimiento menor de grano en suelos pesados y cuando no se dispone de agua en el perfil del suelo (62).

Lawson et al. (101) evaluaron el efecto del laboreo profundo en el crecimiento de leguminosas forrajeras en suelos arenosos de Australia Occidental, con capas compactadas entre 10 y 40 cm de profundidad y baja retención de agua. Analizaron la producción de materia seca y distribución de la raíz a los 72 días después de la germinación en tres leguminosas, *Medicago litoralis*, *Ornithopus compressus* y *Trifolium subterraneum*, sembradas con labranza convencional o con uso de un subsolador profundo. El trébol subterráneo fue indiferente a la eliminación de la compactación del suelo, posiblemente debido a su crecimiento radicular superficial. El laboreo profundo tuvo un efecto significativo en la distribución de las raíces de *Médicago litoralis* y *Ornithopus compressus*. En los tratamientos con labranza convencional, solo el 11% de la primera y el 3% de la masa de raíces de la segunda se ubicó por debajo de 40 cm de profundidad. En contraste, en suelos con laboreo profundo, el 25% y el 26% respectivamente superaron las capas compactadas, lo que se reflejó en un incremento del 55% en producción de forraje de *Médicago litoralis* y un

aumento del 61% en *Ornithopus*. Los autores concluyeron que el uso del subsolador podría favorecer la producción de leguminosas forrajeras con raíces profundas.

Matthew et al. (113) realizaron un ensayo con laboreo profundo del suelo a una profundidad de 0.75 m, con un espaciamiento de 0,6 m entre los brazos de un subsolador con brazos angulados más la adición de 10000 kg ha⁻¹ de yeso inyectados como una mezcla acuosa en ensayos con riego y a secano. Las parcelas se sembraron con alfalfa (5 kg ha⁻¹) y se fertilizó con P (24 kg ha⁻¹) y K (50 kg ha⁻¹). La producción de materia seca se estimó a los 4 y 8 meses. En la primera fecha, no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento y se informó que el coeficiente de variación fue de 33%, debido a fallas en el establecimiento que podrían haber enmascarado los resultados. En la segunda cosecha, no encontraron diferencias en el ensayo a secano. Sin embargo, en el ensayo con riego, el laboreo profundo (9330 kg MS ha⁻¹) y el laboreo profundo más el yeso (10210 kg MS ha⁻¹) aumentaron significativamente la producción de materia seca con respecto al testigo sin laboreo (4790 kg MS ha⁻¹), sin observarse diferencias en el rendimiento entre el laboreo profundo y el laboreo profundo más yeso (113).

La compactación del suelo puede ser reducida mediante rotaciones de cultivos y pasturas perennes, control del tráfico de maquinarias y animales o por el laboreo del suelo (185), utilizando implementos de labranza profunda como el descompactador (4), formado por timones o brazos con un ángulo 45° que trabajan por debajo de 30 cm y levantan suavemente el suelo, fracturándolo a lo largo de sus planos naturales de debilidad (106), aumentando el crecimiento y penetración de las raíces sin modificar la cobertura del suelo y manteniendo los residuos de la superficie (21) .

5.3. CONTROL DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO

Para la solución de restricciones mecánicas del suelo, se pueden utilizar soluciones mecánicas o de tipo biológico (139). Dentro de las primeras, se puede incluir al laboreo profundo (119), mientras que en las segundas se puede usar las raíces de gramíneas (182). El subsolado tiene como finalidad disminuir la compactación del suelo aumentando su porosidad (26). Entre las herramientas que realizarían este tratamiento del suelo, se menciona los descompactadores de rejas aladas y con timones angulados, también conocidos como Paratill (79). Greenwood et al. (77) recomiendan descompactar el suelo en profundidad para mejorar la producción de cultivos y pasturas en siembra directa, especialmente los de textura fina sometidos a ciclos productivos continuos.

Cuando la reja del subsolador inicia el laboreo, se forma una zona abultada semicircular que se comporta como una cuña de tierra, actuando como si fuera parte integrante de la reja del implemento (26). El suelo es desplazado hacia adelante, arriba y lateralmente, bajo el patrón de fallas crecientes, donde se producen fracturas a lo largo de planos definidos desde la punta de la reja hacia la superficie, con un ángulo aproximado de 45° (141). En condiciones de suelo firme, compactado y seco, el laboreo del subsolador produce una disminución de la densidad aparente del suelo, aumentando el espacio poroso para almacenar agua (9).

Los suelos con estructura degradada son muy susceptibles a la reconsolidación natural, desapareciendo rápidamente el efecto del subsolado (119). Spoor (170) afirma que el subsolado debe disminuir la compactación del suelo y mantener capacidad portante para minimizar los procesos de recompactación posterior por tránsito de maquinarias o animales, e indican que, para lograr persistencia de la descompactación, el laboreo debe generar fisuras verticales que favorezcan el drenaje y el desarrollo de raíces a través de las zonas

compactadas sin remover el suelo, para evitar la recompactación posterior. Mon (119) informa que el laboreo del suelo con subsolado produce un mejoramiento de las propiedades físicas y, cuando se combina con yeso, presenta los mejores resultados productivos. Mullins et al. (122) controlaron la compactación subsuperficial en cultivos de algodón con subsolado y la aplicación de óxido de calcio hasta 38 cm de profundidad. Radcliffe et al. (147) aplicaron yeso en superficie para incorporarlo al subsuelo por lixiviación en un suelo con impedimento para el crecimiento de raíces e informaron que disminuyó la resistencia del suelo. Observaron mayor crecimiento de las raíces en los tratamientos con movimiento de suelo con yeso que en los que recibieron el yeso sin laboreo.

En base a los conceptos enunciados, se deduce que los suelos compactados presentan capas endurecidas y pueden tener menor estabilidad de los agregados del suelo y presentar restricciones al movimiento de agua y aire, y que, en pasturas de alfalfa, se puede presentar disminución de la producción por reducción de la cantidad de plantas.

Las propiedades físicas del suelo que se relacionan con la productividad de los cultivos son la resistencia a la penetración, la densidad aparente y la disponibilidad de agua del suelo (64). Taboada (176) expresa que el cambio en estas propiedades físicas del suelo, de manera indirecta, tiene una gran importancia sobre la productividad de las pasturas y, subsecuentemente, en los animales que se alimentan de estos recursos.

De tal forma, los altos niveles de densidad aparente y de resistencia mecánica del suelo promueven la degradación de la pastura en el corto tiempo, de manera que conocer el grado de deterioro que presenta una pastura, mediante el uso de variables cuantificables a campo, puede resultar en prácticas de recuperación adecuadas.

No se encontró en la bibliografía suficiente información local sobre las formas como se podría evitar los cambios que se producen en la pastura de alfalfa asociados a modificaciones en la calidad física del suelo.

5.4. PLANTEO DE OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El objetivo general es evaluar el efecto del laboreo profundo y la adición de yeso sobre el rendimiento de pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma, Provincia de Salta, Argentina.

Se plantea como hipótesis que el uso conjunto de un descompactador con timones angulados y la aplicación de yeso incrementa la producción de forraje de la pastura de alfalfa al mejorar, en forma sostenida, las condiciones físicas del suelo. Esta hipótesis se probará si se cumplen los siguientes supuestos: a) la cantidad de plantas de alfalfa al inicio del experimento no afecta la producción de forraje, b) la densidad aparente y la resistencia del suelo alcanzan valores óptimos para la producción de la pastura, c) la estabilidad de los agregados del suelo se incrementa en forma duradera y d) no se generan modificaciones en el pH y la conductividad eléctrica del suelo. Los objetivos específicos son: A) Analizar el efecto del subsolado con la adición de yeso durante dos años sobre: 1) La población de alfalfa, 2) La producción de la pastura y 3) Los indicadores físicos y químicos de suelo.

5.5. MATERIALES Y MÉTODOS.

5.5.1. Ubicación del ensayo

La evaluación se desarrolló en el centro de la provincia Salta, en el Valle de Lerma, en cercanías de la localidad de Cerrillos, departamento del mismo nombre. Se ubicó dentro de la estación experimental agropecuaria Cerrillos del INTA, sobre RN N° 68, a 16 km de la

ciudad de Salta, en la región agroeconómica de los valles de producción intensiva, con coordenadas 24°53'39,67''S y 65°28'14,60''O.

5.5.1.1. Datos climáticos registrados durante la evaluación

Las temperaturas medias del Valle de Lerma son superiores a 20°C para el mes más cálido y cercanas a 11°C para el mes más frío (18). Los sistemas de serranías que delimitan el valle tienen rumbos submeridianos y ejercen una marcada influencia sobre los factores climáticos, especialmente las precipitaciones. En general, estas se producen entre los meses de diciembre y marzo (19), debiendo recurrir en el resto de los meses al uso de agua de riego, lo que permite compensar las deficiencias de agua en la época invierno-primaveral (128) para mantener la producción de las pasturas a lo largo del año.

Los valores registrados desde la aplicación de los tratamientos hasta julio de 2016 para precipitaciones y temperaturas máximas y mínimas promedio se muestran en el Cuadro 5.1. Se observa que las precipitaciones se concentraron entre noviembre y abril, totalizando 663.7 mm (21). Las precipitaciones entre julio 2016 y julio 2017 se ubicaron en el registro histórico, pero presentaron una disminución entre diciembre de 2016 y febrero de 2017, asociada a un incremento de la temperatura mínima durante todo el periodo evaluado, con pico en marzo de 2017.

Dado que las precipitaciones se concentran fundamentalmente entre los meses de noviembre a abril, es necesario el uso de agua de riego el resto de los meses para disponer de forraje a lo largo del año (138, 174). Según Yáñez (196), la alfalfa en el Valle de Lerma tiene una necesidad de agua de 1159 mm para todo el ciclo de producción, a lo que se le debe restar la

precipitación promedio de 719 mm, quedando una necesidad neta de riego de 550 mm, lo que se repartiría en cinco riegos de 110 mm distribuidos entre mayo y octubre.

Cuadro 5.1. Valores de precipitación media (pp), temperatura promedio (T media), temperatura media máxima (T media max) y temperatura media mínima (T media min), registrados entre julio de 2016 y julio de 2017 en la localidad Cerrillos (Valle de Lerma, Pcia. de Salta). Fuente: EEA INTA Cerrillos, Salta.

	2016					2017							
	jul	ago	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	Jul
pp (mm)**	2,6	0,0	0,0	31,7	20,4	58,2	98,3	58,7	106,7	15,5	5,1	2,3	0,8
T media (°C)	11,0	14,5	15,4	18,9	19,3	21,8	23,4	21,8	19,9	16,1	13,2	11,7	13,5
T media máx (°C)	19,9	25,2	26,1	29,2	27,0	26,1	30,8	29,0	25,4	21,9	18,9	21,0	20,1
T media mín (°C)	3,8	7,2	17,5	21,3	20,0	20,0	17,4	16,9	16,2	11,8	9,2	5,4	7,3

5.5.2. Pastura evaluada

Se analizó una pastura de alfalfa de tres años de la variedad Armona, grupo de latencia 8, ubicada en la EEA Cerrillos del INTA.

La especie más utilizada en la cadena forrajera de los tambos del Valle de Lerma es la alfalfa (130, 174). Se utiliza pura o en mezcla con otras especies templadas (139), ya que es un recurso fundamental por su calidad nutritiva, producción de forraje y época de crecimiento.

5.5.3. Descripción del implemento utilizado

El laboreo profundo se realizó con un subsolador de arrastre que poseía control hidráulico de la profundidad de laboreo y dos brazos angulados separados a 90 cm (Figura 5.3 y 5.4).

El subsolador poseía cuchillas abresurcos tipo raviolera delante de los timones para cortar la superficie del suelo y facilitar la labor sin que se acumulen restos vegetales. La profundidad

de labor se ajustó entre 30 y 40 cm sin que se produzca remoción superficial del suelo (Figura 5.5), mientras que la humedad gravimétrica fue de 10% al momento de la operación.



Figura 5.3. Detalle del subsolador profundo de arrastre.



Figura 5.4. Subsolador profundo de arrastre con dos brazos angulados.



Figura 5.5: Laboreo con subsolador profundo.

5.5.4. Yeso agrícola peleteado

Se utilizó yeso agrícola peleteado marca Profertil-INTA, Argentina, con 23,3% de calcio. La adición de yeso puede ser efectuada para modificar el pH del suelo o para mejorar la estructura al estabilizar arcillas (119). En el primero de los casos, se reemplazan miliequivalentes de sodio, por lo que se utilizan cantidades importantes de yeso. Para el segundo de los casos, no hay información disponible, por lo que, se utilizó la dosis media de mantenimiento sugerida por distintos fabricantes de yeso agrícola, que fluctúa entre 80 y 400 kg ha⁻¹. El yeso contiene iones Ca⁺⁺ que promueven la floculación de las arcillas y partículas húmicas, necesarias para la formación y estabilización de los agregados del suelo (119), favoreciendo la aireación, la infiltración del agua, la penetración de las raíces y la actividad biológica simbiótica fijadora del nitrógeno atmosférico (157).

5.5.5. Diseño del experimento

Se evaluó el efecto de dos factores, laboreo profundo y yeso, a través de un diseño en bloques completamente aleatorizados con arreglo de parcelas divididas y medidas repetidas en el tiempo. El factor laboreo se asignó a parcelas principales con 5 repeticiones. Los niveles de yeso se asignaron a las subunidades. Quedaron determinadas 30 unidades experimentales, cada una de 3 m x 5 m, sobre las que se evaluó el laboreo en dos niveles, Sin Laboreo (SL) y Con Laboreo (CL), y el yeso en tres dosis: 0 kg ha⁻¹ (D0), 100 kg ha⁻¹ (D100), 200 kg ha⁻¹ (D200). El laboreo profundo se realizó con un subsolador de dos brazos angulados, distanciados a 90 cm y a 40 cm de profundidad, el 9/5/2016. El yeso se aplicó el 22/6/2016 con yeso agrícola peleteado al voleo sobre la superficie del suelo (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2. Diseño del experimento de subsolado con adición de yeso.

Bloque1	Sin Laboreo 100	Sin Laboreo 0	Sin Laboreo 200	Con Laboreo 100	Con Laboreo 200	Con Laboreo 0
Bloque2	Con Laboreo 0	Con Laboreo 100	Con Laboreo 200	Sin Laboreo 0	Sin Laboreo 100	Sin Laboreo 200
Bloque3	Con Laboreo 200	Con Laboreo 0	Con Laboreo 100	Sin Laboreo 200	Sin Laboreo testigo	Sin Laboreo 100
Bloque4	Sin Laboreo 200	Sin Laboreo 100	Sin Laboreo 0	Con Laboreo 200	Con Laboreo 100	Con Laboreo 0
Bloque5	Sin Laboreo 0	Sin Laboreo 200	Sin Laboreo 100	Con Laboreo 200	Con Laboreo 0	Con Laboreo 100

Dentro de cada unidad experimental se determinó un punto fijo a partir del cual se estimó el cambio en número de plantas, producción de forraje, densidad aparente, estabilidad de agregados, materia orgánica, pH y fosforo.

5.5.6. Variables analizadas

Se analizaron la densidad de plantas y la producción de materia verde sobre la pastura, mientras que en el suelo se estudiaron indicadores físicos y químicos. Dentro de los primeros, se evaluó densidad aparente, resistencia mecánica, estabilidad de los agregados y tamaño de partículas, mientras que en los segundos se estudió materia orgánica, pH y conductividad eléctrica.

Los dos primeros se determinaron directamente en las parcelas, mientras que el resto se cuantificaron en laboratorio sobre muestras compuestas obtenidas en cada unidad experimental.

5.5.6.1. Densidad de plantas

La densidad de plantas (n° de plantas) se determinó contando el número de coronas sobre el suelo (161), dentro de un marco de 0,25 m² apoyado sobre el punto fijo en la unidad experimental (38, 137). En cada unidad experimental, se cuantificó la densidad de plantas el 25/7/16 y el 9/5/17.

5.5.6.2. Producción de materia seca

En cada unidad experimental, se realizó el corte a 2 cm por encima del suelo de todas las plantas contenidas dentro de un marco de 1 m² apoyado sobre el punto fijo de la parcela. El material recolectado de cada corte se pesó en fresco, se obtuvo una alícuota que se colocó en bolsas de polietileno y se las rotuló para su posterior traslado a laboratorio. Una vez allí, se secó para determinar el porcentaje de materia seca y calcular finalmente el peso seco en

función del peso fresco. El rendimiento se estimó antes de nueve cortes: 25/7/2016, 12/9/16, 24/10/16, 14/12/16, 14/2/2017, 2/3/17, 9/5/17, 2/10/17, 17/11/17.

5.5.6.3. Densidad aparente del suelo

En cada unidad experimental, se sacaron muestras no disturbadas de 0 a 5 cm de profundidad y de 0 a 10 cm con cilindro de 4 cm de diámetro (184) para obtener la densidad aparente 0-5 cm (dap 0-5) y 5-10 cm (dap 5-10), de acuerdo a lo señalado en el Capítulo 3. En cada unidad experimental, se determinó densidad del suelo el 25/7/16 y el 9/5/17.

Para las determinaciones de dap de 10 a 30 cm de profundidad, se utilizó el “sacamuestra de uso extendido” (SUE) (99, 116). El SUE permite determinar tanto resistencia a la penetración como dap, porque en su interior se encuentran ubicados tres tubos portamuestras de PVC de 10 cm³ cada uno, los que permiten, luego de haber sido hincado el equipo en el suelo, extraer las muestras de los tubos y estimar la densidad aparente. Esta determinación se realizó en diciembre de 2017, después de finalizar con todas las estimaciones de la pastura.

Se determinó la densidad relativa (DR) como el cociente entre la densidad del suelo y la densidad máxima (DMax). Esta última se obtuvo a partir de la ecuación ajustada por Marcolin y Klein (108) para suelos con amplio rango de arcilla y materia orgánica:

$$D_{Max} = 2.03133855 - (0.00320878 * MO) - (0.00076508 * \text{arcilla})$$

Dónde: DMax: densidad máxima

MO: contenido de materia orgánica (%)

arcilla: contenido de arcilla (%)

Mientras que la densidad relativa se determina por la siguiente ecuación:

$$DR = \left(\frac{dap}{DMax} \right) * 100$$

Dónde: dap: densidad del suelo en una situación dada

DMax: densidad máxima

5.5.6.4. Estabilidad de los agregados del suelo

La estabilidad de los agregados del suelo (EAS) se determinó utilizando la metodología desarrollada por Corvalán et al. (44) para agregados entre 1 y 2 mm, descrita en el Capítulo 3.

5.5.6.5. Materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo (MO) se determinó mediante la técnica de Walkley y Black (127, 133), de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 3.

Adicionalmente, se estimó el índice materia orgánica (IMO) como el cociente entre el contenido de materia orgánica (MO) y el contenido de limo más el de arcilla.

$$IMO = \left(\frac{MO}{limo+arcilla} \right) * 100$$

Donde MO= materia orgánica del suelo (%)

Limo= cantidad de limo (%)

Arcilla= cantidad de arcilla (%)

5.5.6.6. *pH del suelo*

Se utilizó el método potenciométrico en suspensión de suelo en agua destilada en relación 1:2,5 de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 3.

5.5.6.7. *Conductividad eléctrica del suelo*

Se determinó la conductividad eléctrica del suelo de acuerdo a la técnica descrita en el capítulo 3, utilizando las muestras preparadas para la estimación de pH, con una dilución de suelo en agua de 1:2,5.

5.5.6.8. *Resistencia Mecánica del suelo*

Al final del experimento y luego de todas las evaluaciones, se determinó la resistencia mecánica del suelo (RM), utilizando el “sacamuestras de uso extendido” (SUE), construido de acuerdo a la propuesta de Micucci y López Menardi (116). Posteriormente, se calculó la resistencia mecánica a la penetración, de acuerdo a la ecuación ajustada por Larocca (99) y Filgueira et al. (65).

$$RM = \left(\frac{M}{M+m} \right) * \left(\frac{Mg*H}{A*\Delta z} \right)$$

Donde: RM: resistencia mecánica en MPa

M: peso de la maza de golpeo (4000 g)

m: masa del resto del penetrómetro (6000 g)

g: aceleración de la gravedad (9,8 m*s⁻²)

H: altura de caída de la maza de golpeo (1 m)

A: el área transversal de la boquilla (10 cm²)

Az: profundidad de penetración en cada golpe

5.5.7. Tamaño de partículas del suelo

Se utilizó el método de Bouyoucus modificado (73), de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 3. La determinación de la textura del suelo o análisis granulométrico consiste en la separación y cuantificación de las partículas de arena, limo y arcilla de una muestra de suelo y en la consulta del triángulo de texturas para obtener la clase textural del mismo. La cuantificación de las partículas minerales puede hacerse por el método de los tamices y por el método de sedimentación de las partículas. Este último se fundamenta en la Ley de Stokes para partículas sólidas que caen dentro de un fluido viscoso.

5.5.8. Análisis estadísticos

Para el análisis de densidad de plantas, producción de materia seca, densidad aparente, estabilidad de los agregados del suelo, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica, se utilizó un diseño en bloques con arreglo de medidas repetidas en el tiempo, para lo cual se determinó primero la simetría compuesta de los datos a través del test de Mauchly y, posteriormente, se realizó un análisis de parcelas divididas (split-plot), con tiempo como efecto dentro de la parcela. A continuación, se propusieron modelos lineales generales y mixtos con distintas estructuras de covarianza, correlación residual, heteroscedasticidad residual y efectos aleatorios. Se consideró como efecto fijo el laboreo, la dosis de yeso, el tiempo y sus interacciones. Mediante criterios de verosimilitud (AIC y BIC) y pruebas de cociente de verosimilitud restringida, se eligió el modelo que mejor describió la estructura de covarianza de los datos. Se realizó la comparación de medias para los efectos fijos utilizando la prueba LSD Fisher y se plantearon contrastes ortogonales para analizar las interacciones entre variables.

La dap 10 – 30 cm y la resistencia a la penetración del suelo se determinaron al final de la evaluación. A través de una prueba de t apareada, se probaron las diferencias entre los tratamientos con o sin laboreo. Se utilizó el paquete estadístico R e Infostat para los análisis estadísticos.

5.6. RESULTADOS

5.6.1. Análisis del tamaño de partículas del suelo

La primera evaluación consistió en controlar si existía uniformidad en el tipo de textura en el área donde se ubicarían las unidades experimentales.

Roberts y Henry (149) proponen analizar intensamente un área homogénea de suelo a través de muestreos sucesivos para cuantificar los cambios físicos de suelo y reducir la variabilidad del muestreo, mostrando una mejor imagen de las modificaciones en el tiempo. Las diferencias en suelo no pueden generalizarse, sino que deben ser estudiadas comparando suelos de similar textura. El criterio de agrupamiento por textura fue similar al empleado en el capítulo 3 de acuerdo a lo propuesto por Corvalán et al. (45).

El término “textura” se usa para representar la composición granulométrica del suelo y describe la distribución relativa de las partículas minerales del suelo, tomando como base su diámetro equivalente, por lo que representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo: arena, limo y arcilla (108), y cada clase textural corresponde a una determinada composición cuantitativa de estos elementos y se representa de manera gráfica en un diagrama triangular que representa los valores de las tres fracciones.

Los resultados del análisis de gravimetría del suelo de las parcelas experimentales mostraron que poseen en promedio 45% limo, 40% arena y 15% arcilla, es franco (Cuadro 5.3.), de

textura media, con elevado contenido de partículas finas de limo y arcilla (60%), con máximos y mínimos que no modificaron la clase textural de cada una de las unidades experimentales del experimento, ya que se presentó un coeficiente de variación entre 3.38% en limo, 4.07% en arena y 10.7% en arcilla

Cuadro 5.3. Composición granulométrica del suelo de las parcelas donde se evaluó el subsolado profundo con adición de yeso.

Variable	n	Media	CV	Mínimo	Máximo
Arena	10	39,8 ± 0,51	4,07	38	43
Limo	10	45,1 ± 0,48	3,38	43	47
Arcilla	10	15,3 ± 0,52	10,7	12	17

5.6.2. Modelos estadísticos

De acuerdo con los valores de AIC y BIC, se escogió un modelo auterregresivo continuo de orden 1 y varianzas residuales homogéneas en el tiempo para el análisis de la densidad de plantas y la producción de materia seca. Se seleccionó un modelo sin estructura y varianzas residuales homogéneas en el tiempo para el análisis de densidad aparente del suelo, estabilidad de los agregados, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica.

Se utilizó la prueba DGC de Infostat para realizar las pruebas de comparación de medias.

5.6.3. Cambios en la pastura

5.6.3.1. Densidad de plantas

Se observaron diferencias significativas en la cantidad de plantas asociadas con el tiempo ($p < 0,0007$) y en la interacción Laboreo*Dosis*tiempo ($p = 0,0130$). La densidad de plantas disminuyó en forma significativa, 15,2% entre 2016 y 2017, sin ser afectada por el laboreo ($p = 0,3721$) ni a la aplicación de yeso ($p = 0,2441$) en forma independiente. Inmediatamente

a la asignación de los tratamientos (25/7/2016), no se observaron diferencias significativas asociadas al laboreo ($p=0,3721$), dosis ($p=0,2441$), Laboreo*Dosis ($p=0,1622$), Laboreo*Tiempo ($p=0,1756$) y Dosis*Tiempo ($p=0,2254$),

En base al modelo estadístico auterregresivo continuo de orden 1 y varianzas residuales homogéneas, se analiza la interacción Laboreo*Dosis*Tiempo ($p=0.0130$) para encontrar diferencias en la densidad de la pastura a través de contrastes ortogonales al inicio (2016) y al final de la evaluación (2017) con prueba de comparación de medias. Solamente los tratamientos SL 0 y CL 200 permitieron mantener la densidad de plantas de alfalfa, modificándose en forma significativa en las otras combinaciones de laboreo y encalado (Cuadro 5.4).

Cuadro 5.4. Pruebas de hipótesis de los contrastes para el análisis de los cambios en la densidad de plantas en 2016 y 2017 en cada combinación Laboreo*Dosis.

Contraste	E.E.	Grados libertad	F	p
CL 0 2016 vs CL 0 2017	1,42	1	2,8421	0,0383
CL 100 2016 vs CL 100 2017	1,42	1	5,0526	0,0292
CL 200 2016 vs CL 200 2017	1,42	1	1,2632	0,2666
SL 0 2016 vs SL 0 2017	1,42	1	<0,0001	>0,9999
SL 100 2016 vs SL 100 2017	1,42	1	5,0526	0,0292
SL 200 2016 vs SL 200 2017	1,42	1	15,4737	0,0003

Referencias. CL = Con Laboreo, SL= Sin Laboreo, 0= 0 kg yeso ha, 100= 100 kg ha⁻¹, 200= 200 kg yeso ha⁻¹. Valores de $p < 0,05$ indican diferencias significativas.

La prueba de comparación de medias mostró que no se modificó la densidad de plantas en los tratamientos sin laboreo y sin agregado de yeso ($p=0,999$) y con laboreo más 200 kg ha⁻¹ de yeso ($p=0,2666$) (Cuadro 5.5) en el periodo evaluado, lo que confirmó el análisis de contrastes previo.

En el Valle de Lerma, se informan menores cantidades de plantas al primer pastoreo. Al final del primer año, la cantidad de plantas podría afectar la producción de forraje. La recuperación de pasturas con esta cantidad de plantas debería ser analizada.

Cuadro 5.5. Prueba de comparación de medias de la densidad de plantas (n° de plantas) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha⁻¹).

	Dosis	n° de plantas (plantas m ⁻²)	
		2016	2017
SL	0	20,0 _± 2,7 Aa	20,0 _± 2,5 Aa
	100	16,0 _± 2,7 Aa	12,8 _± 2,6 Bb
	200	16,8 _± 2,7 Aa	11,2 _± 2,5 Bb
CL	0	15,2 _± 2,7 Aa	12,8 _± 2,5 Bb
	100	12,8 _± 2,7 Aa	9,6 _± 2,6 Bb
	200	16,8 _± 2,7 Aa	18,4 _± 2,5 Aa

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos. Los valores son media \pm error estándar.

El agregado de 200 kg ha⁻¹ de yeso permitió mantener la densidad de plantas de alfalfa cuando se realizó el laboreo profundo con subsolador (Figura 5.6), lo que podría hacer viable esta práctica para la renovación de pasturas deterioradas.

La alfalfa es una pastura longeva, pero, por su escasa resiembra natural, su persistencia depende de la supervivencia de las plantas originales (104). Independientemente de la cantidad de semilla que se siembre, habrá raleo de plantas durante su utilización (15). La disminución de la población de alfalfa se relaciona con factores bióticos y abióticos, como la densidad de siembra, el manejo del pastoreo (37), la fertilidad del suelo (61), la presencia de capas compactadas (38, 137) y el lento escurrimiento o el agua estancada sobre la superficie.

En Rafaela, Santa Fe, un número de 250 plantas al primer pastoreo permite obtener producciones de forraje adecuadas (112). Con menos de 30 plantas m^{-2} se afectaría negativamente la producción de forraje (152).

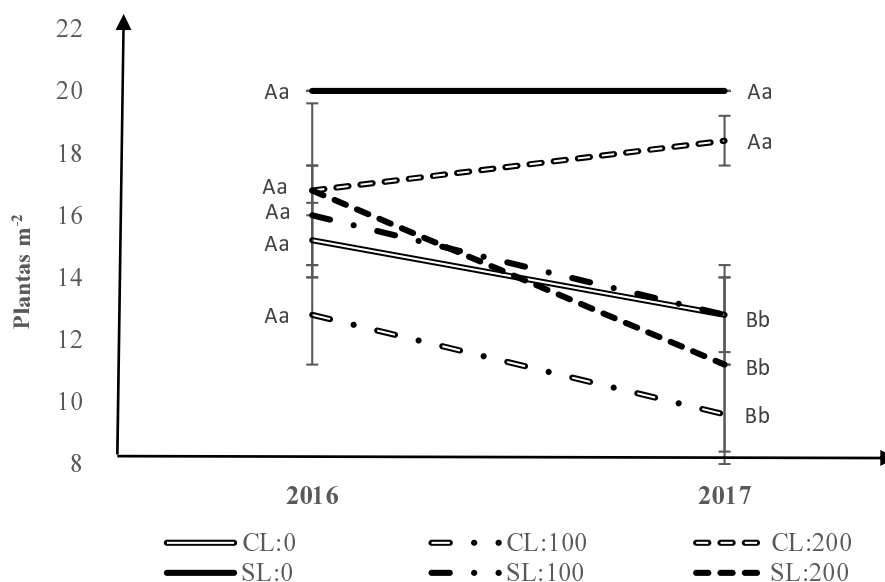


Figura 5.6. Cambios en la densidad de alfalfa (n° de plantas) para la interacción Dosis *Laboreo. Bock plot con error estándar para cada combinación de tratamientos en cada fecha. Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos. Los valores son media \pm error estándar.

Pereyra et al. (137), en evaluaciones de una pastura de alfalfa bajo condiciones reales de producción durante el primer año de utilización, consumidas en forma directa con carga instantánea de 240 vacas en ordeño ha^{-1} , informan una producción de 11131 kg MS $ha^{-1} año^{-1}$, con una población inicial de 110 plantas m^{-2} al primer pastoreo, la que cae al final del primer año de aprovechamiento a 27 plantas m^{-2} . Los autores indican que esta caída estaría asociada con incrementos en la densidad aparente y resistencia mecánica del suelo, que alcanzaron valores críticos del suelo y habrían restringido el crecimiento de raíces.

Caruso y Miranda (38), en un ensayo de adición de enmienda cálcica a la siembra de una pastura de alfalfa, con pastoreo directo con cargas superiores a las 220 vacas ordeñe ha⁻¹, reportan una producción hasta 7150 kg MS ha⁻¹ durante el primer año de utilización e indican que la población promedio al primer pastoreo fue de 159 plantas m⁻², las que cayeron al final del primer año de uso a 13 plantas m⁻², con incrementos significativos de la densidad del suelo desde 1,3 a 1,6 g cm⁻³. La resistencia del suelo con valores superiores a 2 MPa podría estar asociada a cambios en el suelo, fundamentalmente a modificaciones en el espacio poroso y a la estructura física de los suelos.

5.6.3.2. Producción de materia seca

La producción de materia seca se analiza en el Cuadro 5.6. El rendimiento de forraje se evaluó en nueve cortes a lo largo de dos años (2016 y 2017). El ANOVA de la producción de materia seca indicó diferencias significativas en Laboreo ($p=0,0032$), Tiempo ($p<0,0001$), Laboreo*Dosis ($p=0,0123$), Dosis*Tiempo ($p=0,0409$), Laboreo*Tiempo ($p=0,0010$) y Laboreo*Dosis*Tiempo ($p=0,0017$). Sin diferencias significativas en dosis ($p=0,5776$).

La interacción triple de laboreo, dosis y tiempo resultó significativa, por lo que se analizaron los rendimientos de forraje de cada combinación de laboreo y yeso en cada fecha de corte (tiempos). Se observaron diferencias altamente significativas en el corte del 25/07/16, sin observar diferencias en el resto de las fechas (Cuadro 5.6).

Para analizar qué tratamiento presentó diferencias significativas en el corte realizado el 25/07/16, se plantean contrastes ortogonales entre el testigo y cada una de las combinaciones de los tratamientos (Cuadro 5.7).

En el corte de julio de 2016, se observaron diferencias significativas en todos los tratamientos con respecto al testigo sin laboreo y sin agregado de yeso luego de la aplicación de los tratamientos.

Cuadro 5.6. Producción de materia seca de alfalfa (Producción de MS) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha⁻¹).

Laboreo		Producción de MS (g m ⁻²)									
		yeso	2016					2017			
			julio	setiembre	octubre	diciembre	febrero	marzo	mayo	octubre	noviembre
SL	0	132±15Ba	118±25Ba	141±18Ba	259±22Aa	60±18Ca	80±9Ca	29±5Da	117±18Ba	89±27Ba	
	100	66±15Cb	164±25Ba	112±18Ba	247±22Aa	72±17Ca	70±9Ca	20±5Da	119±18Ba	95±29Ba	
	200	46±15Cb	120±24Ba	123±15Ba	215±19Aa	72±16Ca	47±7Ca	27±5Da	154±15Ba	102±29Ba	
CL	0	35±15Dc	112±25Ba	116±17Ba	249±21Aa	79±17Ca	52±8Ca	18±5Da	148±17Ba	104±29Ba	
	100	31±15Cd	159±25Ba	93±17Ba	213±21Aa	78±17Ca	47±8Ca	16±5Da	105±17Ba	92±26Ba	
	200	44±15Cb	141±25Ba	105±18Ba	230±22Aa	64±18Ca	57±9Ca	21±5Da	128±18Ba	98±27Ba	

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos. Los valores son media \pm error estándar.

Las diferencias observadas en julio de 2016 se debieron al laboreo profundo, que pudo haber afectado el sistema radicular de las plantas de alfalfa y, dado que los distintos niveles de encalado se aplicaron sobre parcelas con y sin laboreo, podría haber influido en los tratamientos con enmienda, efecto que desapareció posteriormente.

Cuadro 5.7. Contrastes de la diferencia de la producción de materia seca (MS) para el análisis de la interacción Laboreo*Dosis en el corte de julio 2016 bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha⁻¹).

Contrastes laboreo*dosis*Tiempo	Diferencias producción de MS		F	P
	(g m ⁻²)			
SL 0 vs SL 100	65,76±	20,56	10,23	0,0016
SL 0 vs SL 200	83,75 ±	21,06	15,81	0,0001
SL 0 vs CL 0	97,26 ±	20,47	22,57	<0,0001
SL 0 vs CL 100	100,94 ±	20,34	24,63	<0,0001
SL 0 vs CL 200	88,00 ±	20,56	18,32	<0,0001

Para analizar la producción de forraje de los tratamientos, se comparan los rendimientos en las cortes en los que no se observaron diferencias, excluyendo del análisis los rendimientos en julio de 2016 (Cuadro 5.8). Es similar a lo informado por Tickes (181), quien realizó un experimento en Arizona, Estados Unidos, de renovación de una pastura de alfalfa de dos años con una rastra de dientes y comunicó que no encontró diferencias significativas en el rendimiento entre los tratamientos con y sin laboreo y no observó efecto del laboreo sobre la producción de alfalfa en suelos francos, en cambio Frost (68) reportó que el laboreo sobre suelos francos redujo en forma significativa la producción de raigrás perenne. Ambos autores mencionan que la ausencia de efecto del efecto del laboreo sobre la producción se debería a la compactación previa del suelo.

En base a la prueba de comparación de medias, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. Esto es similar a lo reportado por Matthew et al. (113), quienes informaron que, en Queensland, Australia, no encontraron diferencias significativas en el rendimiento de materia seca de parcelas sembradas con alfalfa a las que se realizó previo a la siembra un laboreo profundo con el agregado sobre la superficie de yeso. Indican también

un elevado coeficiente de variación en el rendimiento (33%), que puede haber enmascarado los resultados.

Cuadro 5.8. Prueba de comparación de medias para la producción de materia seca (Producción MS) en ocho cortes representativos durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha⁻¹).

laboreo	dosis	Producción MS (g m ⁻²)	
SL	100	1183 ± 7,52	A
SL	0	1156 ± 7,52	A
CL	200	1124 ± 7,52	A
SL	200	1115 ± 7,52	A
CL	0	1096 ± 7,52	A
CL	100	1031 ± 7,52	A

Letras mayúsculas distintas para cada combinación de laboreo y yeso, indican diferencias significativas (p<0,05). Los valores son media ± 1 error estándar.

En los meses con mayores producciones de materia seca (setiembre y diciembre 2016 y en octubre de 2017) no se registraron diferencias entre los tratamientos con y sin laboreo (Figura 5.7).

La pastura presentó crecimiento estacional con diferencias significativas en la combinación laboreo y dosis en al menos una fecha. Esta distribución en el crecimiento es similar a la reportada por Pereyra et al. (137), quienes indicaron para el primer año de aprovechamiento de una pastura de alfalfa en el Valle de Lerma diferencias significativas en la producción entre cortes, alcanzando la máxima producción entre septiembre y febrero, con mínimos entre los meses de abril y julio, alcanzando una producción total de 11331 Kg MS ha⁻¹ distribuida en seis cortes.

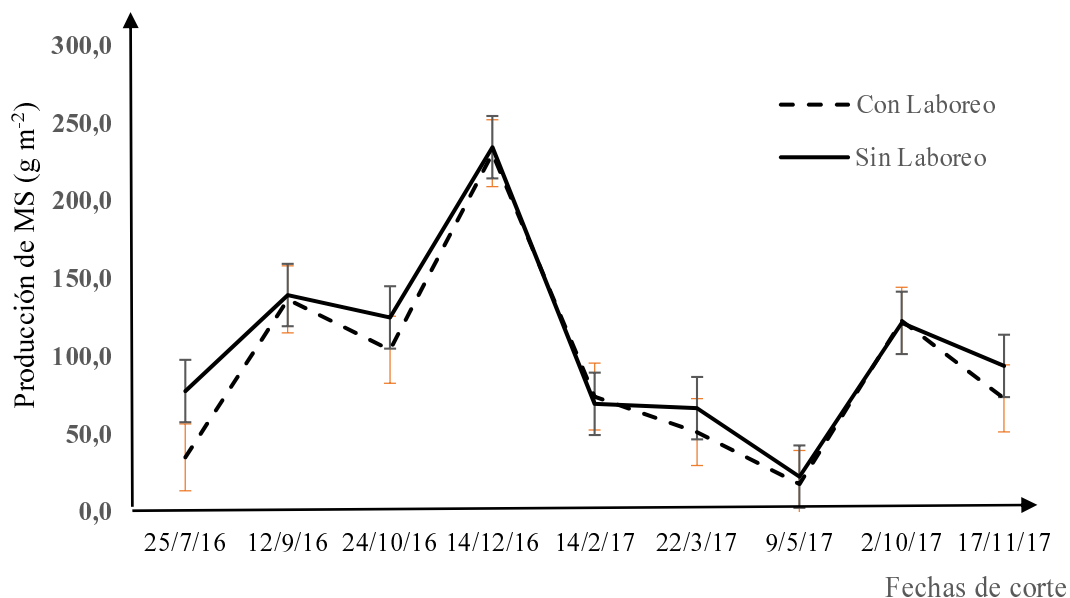


Figura 5.7. Producción de materia seca (Producción de MS) para la interacción Laboreo*Tiempo durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha⁻¹). Bock plot con error estándar para cada laboreo en cada fecha.

La densidad inicial de plantas de la pastura se ubicó entre 13 y 20 plantas m⁻² (julio 2016), sin diferencias significativas en ninguna de las combinaciones de laboreo y yeso. Se detectaron diferencias significativas al final de la evaluación (noviembre 2017). La combinación de laboreo profundo con adición de 200 kg ha⁻¹ de yeso pudo mantener la densidad de plantas del testigo al final del periodo evaluado. Sin embargo, esta mejora en la densidad de plantas no se reflejó en modificaciones en la producción de forraje de la pastura. Se postula que la ausencia de respuesta de los tratamientos sobre la producción de forraje estaría asociada a la cantidad inicial de plantas. Esta fue menor al umbral de 30 plantas m⁻², lo que afectaría la producción de forraje (134, 153) y limitaría la expresión de los tratamientos.

5.6.4. Cambios en el suelo

5.6.4.1. Indicadores físicos

5.6.4.1.1. Densidad aparente de 0 a 5 cm (dap 0-5)

Posteriormente a la elección del modelo estadístico más adecuado, se realizó el análisis de la varianza de los tratamientos. A través del ANOVA, se encontraron diferencias significativas solo en la interacción Laboreo*Tiempo ($p=0,0153$) (laboreo $p=0,9618$, Dosis $p=0,8181$, Tiempo $p=0,185$, Laboreo*Dosis $p=0,1867$, Dosis*Tiempo $p=0,0538$, Laboreo*Dosis*Tiempo $p=0,2515$), por lo que se analiza las diferencias de la densidad del suelo asociadas con el laboreo, después de la asignación de los tratamientos y a los doce meses, el 25/7/16 y el 9/5/17 (Cuadro 5.9).

Cuadro 5.9. Prueba de comparación de medias de dap 0-5 durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Laboreo profundo	Año	dap 0-5 (g cm ⁻³)	
CL	2017	1,67 ± 0,03	A
SL	2016	1,64 ± 0,03	A
SL	2017	1,62 ± 0,03	A
CL	2016	1,59 ± 0,03	B

Letras mayúsculas distintas para cada laboreo profundo indican diferencias significativas ($p<0,05$). Los valores son media ± 1 error estándar.

En este ensayo, el laboreo profundo del suelo permitió una disminución inicial del 4% de la dap 0-5, igualándose posteriormente con los tratamientos sin laboreo a los 12 meses de haber sido realizado el laboreo. Esto es coincidente con lo planteado por Greenwood (77), quien indica que, en sistemas en pastoreo, el suelo tiende a un nivel estabilizado de densidad

aparente y resistencia mecánica en el largo plazo, desapareciendo los efectos de laboreo sobre la densidad del suelo.

El suelo analizado en este ensayo, con 45% limo, 15% arcilla y 40% arena, tendría un umbral de densidad entre 1,45 y 1,55 g cm⁻³. De esta forma, durante el periodo evaluado, la densidad superó el umbral que afectaría el crecimiento de la pastura, podría estar compactado y se habría perjudicado el crecimiento de las raíces. Kruger et al. (96) establecen como principal causa de la degradación de pasturas la disminución de la circulación de agua por el aumento de la densidad aparente que reduce la porosidad total del suelo.

Jones (90) estudia el nivel de densidad del suelo a partir del cual se afecta el crecimiento de las raíces y afirma que la textura del suelo se correlaciona con el valor de densidad óptimo para el crecimiento máximo de las plantas. El autor determina que la densidad óptima para el desarrollo máximo de las raíces es inversa a la suma entre el contenido de arcilla y de limo y propone una relación lineal en la que se observa que su crecimiento es óptimo con porcentajes bajos de partículas finas. Daddow y Warrington (49) establecen una relación entre la textura del suelo y el nivel de compactación del suelo que afecta el crecimiento de las plantas. Indican que el efecto de la compactación se observa por encima de un umbral de densidad de suelo que está en función del contenido de arena, limo y arcilla.

5.6.4.1.2. Densidad aparente de 5 a 10 cm (dap 5-10)

Luego de la elección del modelo estadístico más adecuado, se realizó el análisis de la varianza de los tratamientos. A través del ANOVA se observaron diferencias significativas en dap 5-10 para el Laboreo (p=0,0129); Sin diferencias significativas en: Dosis (p=0,6724),

Tiempo ($p=0,2583$), Laboreo*Dosis ($p=0,0784$), Laboreo*Tiempo ($p=0,4934$), Dosis*Tiempo ($p=0,5936$), Laboreo*Dosis*Tiempo ($p=0,4934$).

El subsolado disminuyó en forma permanente un 4% la densidad del suelo (Cuadro 5.10), aunque, desde el inicio de la evaluación y en todos los tratamientos, los valores observados se ubicaron por encima del umbral de densidad que habría afectado el crecimiento radicular (49, 90).

Greenwood et al. (77) observaron incrementos en la densidad del suelo en ensayos de pastoreo en Nueva Zelanda hasta los 5 cm de profundidad, mientras que Donkor et al. (56) informaron modificaciones hasta los 10 cm de profundidad. Por su parte, Pereyra et al. (137), analizando los cambios de suelo en pasturas del Valle de Lerma, observaron que la densidad aparente aumentó a medida que se incrementó la profundidad desde $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ a 10 cm de profundidad hasta $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ a los 20 cm, lo que podría estar asociado con factores propios del suelo, migración de partículas finas (119), fuerzas ejercidas por los animales en pastoreo (22) o la maquinaria agrícola (1) .

En este ensayo, se observaron valores de densidad del suelo que indicarían la presencia de capas endurecidas desde el inicio de la evaluación como resultado de la compactación provocada por el uso anterior del suelo. En este sentido, Greenwood et al. (75, 78) expresan que el efecto del pastoreo es acumulativo en el tiempo y que la densidad tiende a un estado estacionario en el largo plazo. Por otro lado, Mon (119) indica que los efectos del laboreo profundo son de corta duración y que los suelos con estructura degradada son muy susceptibles a una pronta reconsolidación natural, desapareciendo rápidamente el efecto de la labranza.

Cuadro 5.10. Prueba de comparación de medias dap 5-10 para el efecto Laboreo durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Laboreo profundo	dap 5-10	
SL	1,79±0,02	A
CL	1,72±0,02	B

Letras mayúsculas distintas para cada laboreo profundo indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Los valores son media \pm 1 error estándar.

5.6.4.1.3. Densidad aparente 10 a 30 cm (dap 10-30)

La densidad aparente de 10-30 fue determinada con “sacamuestra de uso extendido” en el mismo momento que se determinó la resistencia a la penetración en diciembre de 2017. Se realizaron cinco determinaciones sobre parcelas con laboreo y cinco sobre parcelas sin laboreo, las que se compararon a través de prueba de t apareada (Cuadro 5.11).

No se observaron diferencias entre tratamientos para ninguna de las dos profundidades y se detectó una continuidad de los valores encontrados entre 5 y 10 cm. Esto es similar a lo reportado por Pereyra et al. (137), quienes indicaron en alfalfa en el Valle de Lerma evaluada a lo largo de un año valores de densidad de suelo entre 10 y 20 cm de profundidad entre 1.7 y 1.8 g cm⁻³. Según los autores, esto indicaría la presencia de capas endurecidas desde el inicio de la evaluación como resultado de la compactación provocada por el uso anterior del suelo, ya que el efecto del pastoreo es acumulativo en el tiempo, alcanzando la densidad un estado similar en el largo plazo (77).

En pasturas con elevada compactación, se puede observar disminución de los macroporos. Oosterheld y León (130) estudiaron la diferencia de densidad del suelo en pasturas de distinta edad. Observaron aumentos en la densidad del suelo hasta los diez años, momento en el que las especies implantadas disminuyen su población y en el que la densidad del suelo comienza

a disminuir, sin un aumento de la producción de la pastura implantada remanente. Para estos autores, este proceso se debe a que, en las pasturas más jóvenes, hay una alta proporción de macroporos producida por el laboreo y, en las maduras, una alta proporción de microporos, generada por la actividad de los organismos sin una mejora en el movimiento de agua y aire del suelo.

Cuadro 5.11. Prueba t apareada para la densidad aparente 10-20 y 20-30 al final del experimento (2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 kg ha⁻¹).

Profundidad	CL	SL	P
10-20	1,8	1,7	0,4226
20-30	1,7	1,8	0,1835

5.6.4.1.4. Densidad relativa

La expresión de la densidad en forma relativa a la densidad máxima o compactación relativa ha sido sugerida para evitar la limitante de comparar valores de densidad de suelos con diferente textura (3). Para el cálculo de la compactación relativa en cada unidad experimental, primero se determinó la densidad máxima (DMax) utilizando la ecuación propuesta por Marcolin y Klein (108) en función del contenido de materia orgánica y arcilla y se estimó posteriormente la densidad relativa (DR). La DMax calculada fue igual a 2 g cm⁻³ en todas las parcelas evaluadas. Este valor es coincidente al informado por Pereyra et al. (137), quienes determinaron densidades máximas entre 1.9. y 1,93 g cm⁻² en suelos con igual contenido de arcilla en el Valle de Lerma utilizando el Test Proctor (8).

La comparación entre tratamientos de la compactación relativa entre 0 y 5 cm de profundidad se presenta en el Cuadro 5.12.

El laboreo profundo permitió reducir inicialmente la compactación relativa entre 0-5 cm densidad a 79%, mientras que el tratamiento sin laboreo se ubicó entre 87% y 92% y podría haber presentado inconvenientes al desarrollo de los cultivos al acercarse o superar el 90% de la densidad máxima (148).

El uso del subsolador pudo reducir en forma significativa la compactación relativa entre 5-10 cm, aunque con valores elevados de densidad del suelo, mientras que los tratamientos sin laboreo se acercaron al 90% de la densidad máxima (Cuadro 5.13).

Cuadro 5.12. Densidad relativa 0 a 5 cm (DR 0-5) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo)

Laboreo profundo	Año	DR 0-5 (%)		
CL	2017	83 ± 1,3	A	
SL	2016	82 ± 1,7	A	
SL	2017	81 ± 1,3	A	
CL	2016	79 ± 1,7		B

Letras mayúsculas distintas para cada laboreo profundo, indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Los valores son media \pm 1 error estándar.

El análisis de la densidad relativa muestra la presencia de capas de suelo compactadas (205), que habrían sido controladas inicialmente hasta los 5 cm con el laboreo profundo, restableciéndose posteriormente los niveles de densidad del suelo del testigo.

La densidad aparente del suelo puede caracterizar las posibles restricciones al crecimiento radical (90). El suelo analizado (arena=40%, limo=45%, arcilla=15%) tiene un umbral crítico de densidad aparente para el crecimiento de las raíces, que se ubica entre 1,45 y 1,55 g cm⁻³ según Daddow y Warrington (49) o entre 1,40 y 1,45 g cm⁻³ según De Orellana y Pilatti (52). Los valores de densidad superaron el umbral propuesto por ambos modelos. Por

debajo de los 5 cm de profundidad, la densidad relativa fue igual a 90%, indicando que el suelo se encuentra compactado, muy cercano a la densidad máxima y con serias restricciones físicas. El subsolado no modificó la compactación generada por el uso anterior del suelo. A su vez, la compactación se reflejó en el aumento de la resistencia mecánica del suelo. El suelo se opone a la deformación que ejercen las raíces en su crecimiento.

Cuadro 5.13. Densidad relativa 5 a 10 cm (DR 5-10) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Laboreo profundo	DR 5-10 (%)	
SL	89 ± 1,7	A
CL	84 ± 1,7	B

Letras mayúsculas distintas para cada laboreo profundo indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Los valores son media \pm 1 error estándar.

5.6.4.2. Resistencia mecánica del suelo

La resistencia del suelo fue determinada con “sacamuestra de uso extendido” en el mismo momento en que se determinó densidad aparente del suelo de 10 a 30 cm, en diciembre de 2017. Se realizaron cinco determinaciones sobre parcelas con laboreo y cinco sobre parcelas sin laboreo, las que se compararon a través de prueba de t apareada (Cuadro 5.14).

No se observaron diferencias en la resistencia del suelo en cada profundidad entre tratamientos con y sin laboreo. La resistencia se incrementó a medida que aumenta la profundidad, alcanzando 2 MPa, que limitaría el crecimiento de las raíces a los 10 cm de profundidad.

Cuadro 5.14. Prueba t apareada para la resistencia mecánica del suelo (RM) durante el final de la evaluación (2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Profundidad (cm)	RM (MPa)		p
	CL	SL	
5	1,3 ± 0,3	1,4 ± 0,4	0,4766
10	2,0 ± 0,6	2,2 ± 1,0	0,7316
15	2,5 ± 0,7	3,2 ± 1,3	0,3380
20	2,8 ± 1,1	3,2 ± 0,9	0,6350
25	3,3 ± 0,8	4,0 ± 1,6	0,5492
30	4,4 ± 0,6	4,8 ± 1,0	0,4778

Las raíces se expanden a través de huecos preexistentes u horadando la matriz del suelo. Para la primera alternativa, el diámetro de los poros debe ser mayor que la piloriza y la conectividad entre esos huecos debe carecer de angostamientos. En la segunda opción, la penetración del suelo depende de la impedancia mecánica que éste opone. Esta se denomina resistencia mecánica crítica cuando la elongación radical se detiene (140) .

Wilson et al. (192) plantean que valores de resistencia del suelo menores a 2 MPa constituyen el límite para un óptimo crecimiento del sistema radical. La compactación afecta el desarrollo de las raíces al aumentar la resistencia mecánica del suelo, la que se determinó cada 5 cm hasta los 30 cm de profundidad (Figura 2), sin observar diferencias significativas entre los tratamientos de laboreo en ninguna de las profundidades evaluadas: 5cm (p=0,477), 10 cm (p=0,732), 15 cm (p=0,334), 20 cm (p=0,635), 25 cm (p=0,543) y 30 cm (p=0.478). Los tratamientos no generaron valores óptimos de resistencia mecánica del suelo, que aumentó a medida que se incrementa la profundidad. Se observó que el valor de 2 MPa, que limita el crecimiento de las raíces, fue alcanzado a partir de los 10 cm de profundidad (Figura

5.8). En el suelo evaluado, con 16% de arcilla, el crecimiento de las raíces se detendría con valores superiores a 4 MPa, lo que se observó entre 25 y 30 cm (140).

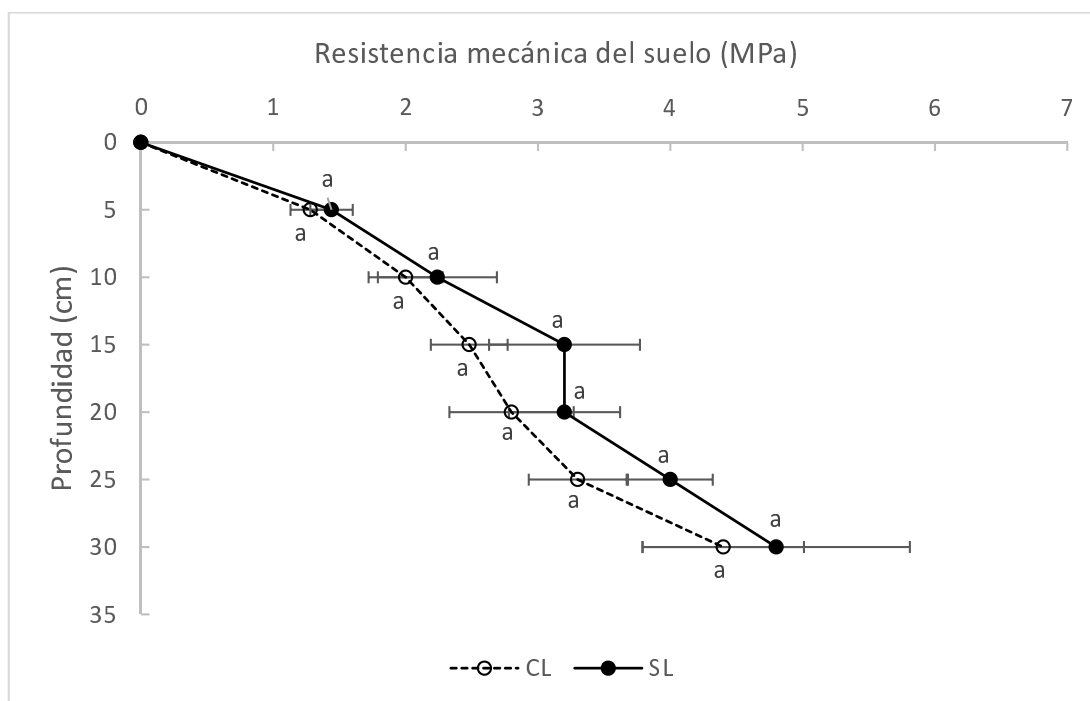


Figura 5.8. Resistencia mecánica del suelo durante el año 2017 bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo). Letras minúsculas distintas para cada profundidad indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$). Los valores son media \pm error estándar.

5.6.4.3. Estabilidad de los agregados del suelo

Luego de la elección del modelo estadístico más adecuado, se realizó el análisis de la varianza de los tratamientos. A través del ANOVA, se observaron diferencias significativas en laboreo ($p < 0,0001$), tiempo ($p < 0,0001$) e interacción laboreo*tiempo ($p = 0,0238$). No se observaron diferencias en Dosis ($p > 0,9999$), Laboreo*Dosis ($p > 0,9999$), Dosis*Tiempo ($p = 0,8321$) y Laboreo*Dosis*Tiempo ($p = 0,8657$).

Utilizando los valores de referencia propuestos por Corvalán et al. (45), se advierte que durante todo el periodo evaluado la estabilidad de los agregados del suelo fue regular (20-

40% EAS). Después del laboreo con el subsolador, se observó una mejora promedio de 8% con respecto al tratamiento sin laboreo, no registrándose diferencias posteriormente entre los distintos tratamientos a los 12 meses de haber realizado el laboreo (Cuadro 5.15).

Cuadro 5.15. Cambios en estabilidad de los agregados del suelo (EAS) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Laboreo profundo	EAS (%)	
	2016	2017
SL	26,20±0,09 Bb	36,53±0,09 Aa
CL	28,80±0,09 Ba	34,40±0,09 Aa

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre laboreo. Los valores son media \pm error estándar.

Pilatti et al. (139) mencionan que las labores profundas son expansivas y pueden incrementar temporalmente la macroporosidad, pero el efecto puede ser efímero, errático o nulo, mientras que la utilización de gramíneas con raíces fasciculadas podría incrementar la estabilidad de los agregados del suelo en el largo plazo, promoviendo el crecimiento de hifas fúngicas sobre los residuos de raíces e impulsando la asociación entre las partículas minerales y orgánicas en el suelo por medio de procesos físicos y la producción de agentes cementantes (33).

Los agregados más estables son el resultado de la descomposición de restos vegetales, la presencia de hongos encargados de la descomposición y el aumento del humus del suelo (61). En Esperanza, Santa Fe, los incrementos en la estabilidad de los agregados del suelo se lograron con aumentos en la materia orgánica, en pasturas no pastoreadas, sin pisoteo y con el retorno de toda la biomasa aérea producida al suelo (139).

La estabilidad de los agregados está muy relacionada con el contenido de materia orgánica (69), fundamentalmente la fracción lábil (83), la que, al unir las partículas minerales formando agregados, tiene efecto cementante (146). Su modificación tiene influencia en el crecimiento de las plantas debido a que el arreglo de las partículas en agregados determina la presencia de poros que favorecen el crecimiento de raíces, el almacenamiento y transporte de agua y aire (33), y la menor densidad del suelo (163). En este ensayo, los cambios de la estabilidad de los agregados estarían asociados con la reconsolidación del suelo por procesos de humedecimiento y secado, que habría acercado las partículas del suelo y podría ser transitoria por el bajo contenido de materia orgánica (110). Esto coincide con Varela et al. (188), quienes, en un ensayo de cultivo de cobertura en suelos franco limosos de la región pampeana, encontraron variaciones temporales significativas de la estabilidad de los agregados por la generación de macroporosidad en respuesta a mecanismos abióticos asociados al humedecimiento y el secado.

La baja estabilidad de los agregados ocasiona poros poco estables y podría estar relacionada con el aumento de la densidad del suelo por arriba del valor crítico para este tipo de suelo (139). La EAS cuantifica los agregados mayores de 250 μm , que son los responsables de la estructura estable del suelo, y refleja el deterioro de la calidad física del suelo y una baja resiliencia para recuperar su estructura original. Los niveles de EAS observados mostraron que los agregados tienden a fragmentarse en agregados de menor tamaño. Pulido Moncada et al. (143) observaron una relación lineal entre la estabilidad de los agregados y el contenido de materia orgánica. La materia orgánica aumenta las fuerzas de cohesión entre las partículas de suelo y hace a los suelos más resistentes a la compactación.

5.6.5. Indicadores químicos del suelo

5.6.5.1. Materia orgánica del suelo

Luego de la elección del modelo estadístico más adecuado, se realizó el análisis de la varianza de los tratamientos. A través del ANOVA, se observaron diferencias significativas en Laboreo ($p=0,0008$), Tiempo ($p=0,0008$) e interacción Laboreo*Tiempo ($p=0,0294$). No se observaron diferencias significativas en Dosis ($p=0,9463$), Laboreo*Dosis ($p=0,8549$), Dosis*Tiempo ($p=0,9530$) y Laboreo*Dosis*Tiempo ($p=0,8723$).

El contenido de materia orgánica en todas las combinaciones de laboreo profundo y yeso, durante todo el periodo evaluado fue bueno a regular (131) y se incrementó al final del periodo evaluado, siendo menor el aumento en el tratamiento con laboreo (Cuadro 5.16). La labor profunda podría haber facilitado la descomposición de los compuestos orgánicos por un incremento del oxígeno en el suelo y una mayor disponibilidad de compuestos orgánicos para los microorganismos (5), por una disminución de la protección física por ruptura de macroagregados (163).

Cuadro 5.16. Cambios en la materia orgánica del suelo (MO) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Laboreo	MO (%)	
	2016	2017
SL	2,24±0,6 Ba	2,56±0,6 Aa
CL	2,18±0,6 Aa	2,25±0,6 Ab

Letras mayúsculas distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre fechas. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre tratamientos. Los valores son media \pm error estándar.

Los niveles de materia orgánica pueden ser variables y estar relacionados con la textura (155) y el manejo del suelo (4). Un nivel particular de materia orgánica puede resultar alto, medio o bajo, dependiendo de la textura del suelo y cómo está retenida por la fracción inorgánica del suelo. Para ajustar esta variabilidad, se ha elaborado el índice materia orgánica (IMO), que relaciona el tenor de materia orgánica con el contenido de partículas finas, $IMO = [MO / (\text{limo} + \text{arcilla})] * 100$ (146). Una relación 5 de IMO es considerada como el umbral entre suelos severamente degradados y suelos con distinto grado de riesgo (186). En suelos de la región semiárida pampeana, con buen manejo y prácticas agronómicas adecuadas, el valor del IMO se ubica por encima de 5 (187). Valores menores a este umbral significan la pérdida de materia orgánica en relación a la suma de arcilla más limo del suelo (186). Vanzolini et al. (187) analizaron tres situaciones contrastantes en establecimientos del Partido de Villariño, Provincia de Buenos Aires, lotes de uso mixto ganadero-agrícola, potreros con pasturas y monte. Concluyen que los suelos de manejo ganadero-agrícola presentaron IMO menor a 5, lo que evidenció un deterioro en la calidad de suelo asociado al laboreo del suelo y al tránsito de animales y maquinarias. Vankeirsbilck et al. (186), comparando diez lotes con maíz contra diez con pasturas en el oeste de Buenos Aires, encontraron que dos lotes de maíz para silo tenían valores de IMO menores a 5 y que nueve de los diez los lotes que provienen de dos o más años de maíz para silo tenían valores de IMO más bajos que los de pastura. Concluyen que el IMO resultó ser un indicador más sensible que la materia orgánica como valor absoluto, ya que valores por debajo de 5 dan indicio de algún problema de manejo del lote.

En este ensayo, los valores de IMO se ubicaron por debajo de 4, por lo que se podría asumir que el contenido de materia orgánica podría afectar la dinámica del agua, el aire y los

nutrientes (146), haciendo al suelo más susceptible a la compactación (4). Este indicador estaría mostrando que el proceso de reconstrucción de la estructura del suelo demandaría prolongados períodos de tiempo si se minimizan los efectos negativos sobre los agentes formadores de agregados (110).

La ruptura de los macroagregados por fuerzas compactantes expone a la descomposición materia orgánica, afectando las fuentes productoras de agentes enlazantes y sustancias adhesivas orgánicas. En contraste, los microagregados no son alterados por presiones externas. La disminución de agentes de enlace de origen orgánico contribuye con la pérdida de estabilidad de los macroagregados, facilita la ruptura de éstos por humedecimiento e incrementa el contenido de microagregados con aumentos de la densidad del suelo. Esto estaría relacionado con los valores registrados del indicador IMO, a través de los cuales se determinó que la materia orgánica es baja con respecto al contenido de limo y de arcilla con menor cantidad de materia orgánica particulada o fresca, lo que haría a estos suelos más susceptibles a la reconsolidación después del laboreo.

Cabe entonces preguntarse, frente a un aumento de la resistencia a la penetración de las raíces, de qué medios se dispone para lograr mejoras en la estabilidad de los agregados en suelos francos con baja cantidad de materia orgánica en relación a las partículas finas. Una de las vías posibles es la creación de bioporos originados en canales de raíces. El sistema radicular de las gramíneas podría aumentar la macroporosidad y entrelazar las partículas de suelo (13). Taboada et al. (175) encontraron mayor número de agregados de mayor tamaño y más estables cuando se combinaban ciclos de humedecimiento-secado con la presencia de raíces de gramíneas forrajeras.

5.6.5.2. pH del suelo

Luego de la elección del modelo estadístico más adecuado, se realizó el análisis de la varianza de los tratamientos. A través del ANOVA, se observaron diferencias significativas en tiempo ($p < 0,0001$). No se observaron diferencias en Laboreo ($p = 0,0738$), Dosis ($p = 0,7224$), Laboreo*Dosis ($p = 0,8099$), Laboreo*Tiempo ($p = 0,0718$), Dosis*Tiempo ($p = 0,7839$) y Laboreo*Dosis*Tiempo ($p = 0,8540$).

Se observan solo diferencias significativas entre años, no asociadas a los tratamientos de laboreo ni yeso (Cuadro, 5.17.).

Cuadro 5.17. Prueba de comparación de medias para el pH durante dos años (2016-2017).

Año	pH	
2016	$6,97 \pm 0,04$	B
2017	$7,19 \pm 0,03$	A

Letras mayúsculas distintas para Tiempo indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Los valores son media \pm 1 error estándar.

Tanto en 2016 como en 2017 los valores de pH no presentaron limitaciones para la pastura de alfalfa. El pH observado en este ensayo se ubicó dentro del rango ideal para la alfalfa, que varía entre 6,8 y 7,5 (70, 131) y no se modificó por la adición de yeso.

5.6.5.3. Conductividad eléctrica del suelo

Luego de la elección del modelo estadístico más adecuado, se realizó el análisis de la varianza de los tratamientos. Del análisis de la varianza de la conductividad eléctrica, solo se observa diferencias significativas en la fuente de variación Tiempo ($p < 0,0001$), no se observaron diferencias significativas en Laboreo ($p = 0,2857$), Dosis ($p = 0,6594$),

Laboreo*Dosis ($p=0,7228$), Laboreo*Tiempo ($p=0,1630$), Dosis*Tiempo ($p=0,6931$) y Laboreo*Dosis*Tiempo ($p=0,7515$).

Cuadro 5.18. Prueba de comparación de medias de la conductividad eléctrica (mmhos cm) durante dos años (2016-2017).

Año	CE (mmhos cm)	
2016	$0,40 \pm 0,01$	B
2017	$0,60 \pm 0,01$	A

Letras mayúsculas distintas para cada Tiempo, indican diferencias significativas ($p<0,05$). Los valores son media \pm error estándar.

Tanto en 2016 como en 2017 los valores de conductividad eléctrica no presentaron limitaciones para la pastura de alfalfa (Cuadro 5.17) (133), ya que fueron menores a 2 mmhos cm, y se caracterizarían como muy buenos sin limitaciones (69). La cantidad de yeso adicionado no modificó el contenido de sales del suelo.

5.7. CONCLUSIONES

En relación con la hipótesis planteada, el uso conjunto de un descompactador y la adición de yeso no incrementó la producción de forraje de la pastura, ni tampoco mejoró la condición física del suelo.

El subsolador con brazos angulados separados a 90 cm y hasta 40 cm de profundidad no modificó la densidad inicial de 20 plantas m^{-2} de alfalfa. El efecto conjunto del laboreo profundo y la aplicación de yeso en alta dosis (200 kg ha^{-1}) pudo mantener la densidad de plantas de alfalfa en pasturas del Valle de Lerma, pero, sin esto reflejarse en una mayor producción de forraje. Con una población menor al umbral de 30 plantas m^{-2} , habría ausencia de respuesta a los tratamientos sobre la producción.

El uso del subsolador redujo solo inicialmente la densidad entre 0 y 5 cm de profundidad, y, en forma permanente, la densidad entre 5-10. A los 17 meses del laboreo, no se encontraron diferencias en la densidad por debajo de los 10 cm de profundidad. Los valores de densidad aparente fueron superiores al umbral de densidad crítica hasta los 30 cm de profundidad. La resistencia mecánica del suelo fue superior a 2 MPa, y limitaría el crecimiento de las raíces a partir de los 10 cm de profundidad. En el suelo evaluado (con 16% de arcilla), el crecimiento de las raíces se detendría con valores superiores a 4 MPa, lo que se observó entre 25 y 30 cm. No se detectó efecto residual sobre la resistencia mecánica a los 18 meses de realizada la labor, lo que se asociaría con la ausencia de efecto de los tratamientos sobre la producción de la pastura.

De acuerdo con el coeficiente de uniformidad y la distribución del tamaño de partículas, el suelo analizado es no uniforme, inestable con tendencia a la reorganización y susceptible a la compactación. La adición de yeso no estabilizó las partículas finas, no modificó el pH ni la conductividad eléctrica.

El suelo presentó restricciones físicas que no fueron solucionadas con el laboreo profundo ni con la aplicación de yeso. La cantidad de materia orgánica no sería suficiente para regenerar la estructura del suelo ni para formar agregados estables.

Persiste la necesidad de información acerca de estrategias de manejo para incrementar la población de pasturas de alfalfa, y que favorezcan la persistencia productiva de la pastura, como la aplicación de fertilización fosforada y/o la incorporación de gramíneas forrajeras.

El presente trabajo aporta información novedosa acerca de los indicadores físicos de suelo en pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma, los cuales no mejoraron haciendo uso del laboreo profundo con subsolador o aplicación de yeso para estabilizar las partículas finas del suelo.

Capítulo 6

Discusión general

El proyecto original de esta tesis tenía por objetivo evaluar el efecto del laboreo profundo más la adición de yeso en pasturas de alfalfa del Valle de Lerma, los que son abordados en el capítulo 5. En cambio, los capítulos 2, 3 y 4 representan una ampliación del objetivo inicial y fueron incluidos para generar y ampliar la información local disponible, con la que se mejoró el análisis y la discusión de la tesis.

La alfalfa es la principal especie forrajera de los sistemas ganaderos del Valle de Lerma. Se desarrolló una metodología para estimar la superficie ocupada con alfalfa analizando la variación de índices de vegetación (IVN) obtenidos de imágenes satelitales. Los potreros con alfalfa presentan valores de IVN entre 0,41 y 0,85 con picos y valles asociados a los aprovechamientos. Este patrón de la serie temporal de IVN permitió determinar que la alfalfa totalizó 2197 has distribuidas en 275 potreros, mientras que en el mismo periodo de 2019, alcanzó 1953 has en 213 potreros.

En esta tesis, se determinó a nivel regional una población promedio de 105 plantas m^{-2} al primer pastoreo, que disminuyó en promedio a 36 plantas m^{-2} al final del primer año de utilización, con una disminución significativa superior al 65%. Este comportamiento fue similar en los 10 sitios analizados simultáneamente y, al final del primer año de uso, se acercaría al umbral mínimo de 30 plantas m^{-2} , lo que podría afectar la producción de la pastura. La población observada al primer pastoreo y al final del primer año de uso fue menor a la reportada en otras regiones del país en el mismo momento. Las prácticas de manejo de la pastura de alfalfa se deberían ajustar a la población y a los sistemas de producción del Valle de Lerma.

Se encontró relación entre los indicadores de suelo: estabilidad de los agregados, porcentaje de arcilla, porcentaje de limo e índice de materia orgánica con la densidad de plantas y la

densidad aparente del suelo; por lo que podrían ser utilizados para caracterizar las pasturas en esta región.

Se plantearon dos experimentos para mejorar la población de la pastura (Capítulo 4). En el experimento 1 se analizó la cantidad de plantas en relación con tres variedades de alfalfa. Se observaron diferencias significativas en la cantidad de plantas desde el primer pastoreo hasta el final de la evaluación, tendencia que fue similar en las tres variedades y en las tres fechas analizadas. La densidad de plantas m^{-2} al primer pastoreo se ubicó entre 127 y 134 plantas m^{-2} y al final del primer año de uso la población de sitio entre 18,6 y 32 plantas m^{-2} . Esta disminución del 75% del número de plantas de alfalfa no estaría asociada a la variedad, sino, a los cambios en los indicadores físicos de suelo: densidad aparente y estabilidad de agregados. Esta última disminuyó 48 unidades porcentuales después del verano, mientras que la densidad alcanzó valores críticos entre 1,6 y 1,7 $g\ cm^{-3}$ al final del primer año de uso. Por su parte, en el experimento 2, se estudió el efecto de la densidad de siembra sobre la cantidad de plantas de la pastura. No se observó un aumento de la cantidad de plantas de alfalfa al primer pastoreo con el incremento de la densidad de siembra, la que se ubicó entre 165 y 185 plantas m^{-2} al primer pastoreo, disminuyendo un 63%, entre 61 y 66 plantas m^{-2} después de primer año de uso. Paralelamente, la estabilidad de agregados fue menor a 10% después del verano y la densidad aparente fue superior a 1,6 $g\ cm^{-3}$ durante toda la evaluación. En ninguno de los experimentos se logró superar la población inicial reportada en el capítulo 3, observando una caída similar al final del primer año de uso en ambos casos. La elección de la densidad de siembra o la variedad no fue efectiva para aumentar la población inicial de la pastura de alfalfa.

Estos suelos con porcentajes mayores al 50% de limo y al 10% de arcilla están débilmente estructurados y son fácilmente compactables por su dificultad para formar macroporos, estando esto asociado a su baja cantidad de materia orgánica. Por lo tanto, son muy susceptibles a presentar niveles de densidad del suelo por encima de los valores críticos para el crecimiento de las raíces.

La disminución de la materia orgánica merma las sustancias enlazantes y adhesivas que unen a los agregados, contribuye con la pérdida de estabilidad de los macroagregados, facilita la ruptura de éstos por humedecimiento e incrementa el contenido de microagregados con aumentos de la densidad del suelo. Esto estaría relacionado con los valores registrados del indicador IMO, a través de los cuales se determinó que la materia orgánica fue baja con respecto al contenido de limo y de arcilla y haría a estos suelos más susceptibles a la reconsolidación después del laboreo.

En pasturas con niveles críticos de densidad aparente, se modifica la distribución del tamaño de agregados, los microagregados aumentan y decrecen los macroagregados, La estabilidad de los agregados (EAS) cuantifica los agregados mayores de 250 μm , que son los responsables de la estructura estable del suelo, y refleja un deterioro de su calidad física y una baja resiliencia para recuperar su estructura original. Los niveles de EAS observados mostraron que los agregados tendieron a fragmentarse en agregados de menor tamaño, con tendencia a la reorganización y aumento de la compactación del suelo.

Para disminuir los niveles de densidad del suelo, se realizó en forma conjunta, laboreo profundo y aplicación de yeso, los cuales no modificaron inicialmente la densidad de plantas, que se ubicó entre 13 y 20 plantas m^{-2} (julio 2016), sin diferencias significativas entre tratamientos. Se detectaron diferencias significativas en la población al final de la

evaluación (noviembre 2017). La combinación de laboreo profundo con adición de 200 kg ha⁻¹ de yeso pudo mantener la cantidad de plantas del testigo al final del periodo evaluado. Sin embargo, esto no se reflejó en mejoras en la producción de forraje de la pastura. Se postula que la ausencia de respuesta a los tratamientos sobre la producción de forraje estaría asociada a la cantidad inicial de plantas, que fue menor al umbral de 30 plantas m⁻², la que limitaría la producción de forraje.

El laboreo profundo no modificó los valores de densidad aparente, que fueron superiores al umbral de densidad crítica hasta los 30 cm de profundidad. En cuanto a la resistencia mecánica del suelo, ésta alcanzó valores superiores a 2 MPa, que limitarían el crecimiento de las raíces a partir de los 10 cm de profundidad. La adición de yeso no estabilizó las partículas finas, ni modificó el pH ni la conductividad eléctrica, ubicándose en el rango superior para este cultivo.

El subsolado fue expansivo sin efecto residual sobre la densidad aparente ni sobre la resistencia mecánica. Los niveles de densidad relativa mostraron la presencia de capas del suelo compactadas, que no fueron solucionadas con el laboreo profundo y la aplicación de yeso. El coeficiente de uniformidad y la cantidad de limo fino (2 – 20 µm), determinaron que la distribución del tamaño de partículas del suelo fue no uniforme, inestable con tendencia a la reorganización y susceptible a la compactación. La cantidad de materia orgánica no sería suficiente para regenerar la estructura del suelo y formaría agregados poco estables.

Las técnicas usadas para recuperar la población y el rendimiento de pasturas de alfalfa no fueron efectivas. Los suelos presentan distribución del tamaño de partículas y materia orgánica que los hacen inestables y susceptibles a perder estructura. Se debería seguir

evaluando formas de incrementar el rendimiento de las pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma con la aplicación de fertilización fosforada y/o la incorporación de gramíneas forrajeras.

Capítulo 7

Bibliografía

- 1 Alakukku, L. 2012. Soil compaction. En Jacobsson, C. (Ed.). Sustainable Agriculture. Baltic University Press. Uppsala. pp. 217-221.
- 2 Altobelli, F. 2008. Diagnóstico del manejo del agua en cuencas tabacaleras del Valle de Lerma. Salta, Argentina. Tesis de grado (Ing. Rec. Naturales y Medio Ambiente). Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina. 115 p.
- 3 Alvarez, C.R. 2012. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: caracterización, génesis y manejo. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 193 p.
- 4 Alvarez, C.R.; Taboada, M.A.; Bustingorri, C.; Gutierrez, B.; y Flavio, H. 2006. Descompactación de suelos en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Ciencia del Suelo* 24(1): 1-10.
- 5 Alzugaray, C.; Vilche, M.S. y Petenello, C. 2008. Labor profunda en siembra directa: Efecto sobre la condición biológica del suelo. *Ciencia e Investigación Agraria*. 35(3): 265-276.
- 6 Anderson, B.E.; Holman, T.I.; Baltenspeger, D.D.; y Volesky, J.D. 2010. Reseeding or thickening thin alfalfa stands. University of Nebraska–Lincoln Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources. p. 3.
- 7 Arias, M. y Bianchi, A.R. 1996. Estadísticas climatológicas de la Provincia de Salta. GPS-INTA. Salta, Argentina. 189 pp.
- 8 ASTM. 1992. Standard test methods for moisture relations using a 5,5 lb (2,5 kg) hammer and 12 inch (304,8 mm) drop. In ASTM (American Society for Testing Materials), Standards in Building Codes (Ed.). ASTM. Philadelphia, EEUU. pp. 836-842.
- 9 Balbuena, R.H.; Botta, G.F. y Rivero, E.R.D. 2009. Herramientas de Labranza para la Descompactación del Suelo Agrícola. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires. Argentina. 216 pp.
- 10 Balzarini, M.; Gonzalez, L.A.; Tablada, M.; Casanoves, F.; Di Rienzo, J.A. y Robledo, C.W. 2008. InfoStat, software estadístico. Manual del usuario. Brujas, Córdoba. Córdoba, Argentina. 216 pp.
- 11 Balzarini, M.; Bruno, C.; Córdoba, M. y Teich, I. 2015. Herramientas en el Análisis Estadístico Multivariado. Escuela Virtual Internacional CAVILA. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. 200 pp.
- 12 Barrios, M.B. 2009. Efecto del sistema de manejo de suelo en el desarrollo de raíces, absorción de agua y productividad en una rotación soja trigo en la Pcia. Buenos Aires, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba. Córdoba, España. 219 p.
- 13 Barthes, B. y Roose, E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47(2): 133-149.
- 14 Bartholomew, P. 2005. Comparison of conventional and minimal tillage for low-input pasture improvement. *Plant management network*. 3: 1-14.
- 15 Basigalup, D.H. y Rossanigo, R. 2007. Panorama actual de la alfalfa en Argentina. En Basigalup, D.H. (Ed.), El cultivo de la alfalfa en la Argentina. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. pp. 13-26.
- 16 Baudino, G. 1996. Hidrogeología del valle de Lerma. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina. 158 p.
- 17 Berti, R. 1993. Alfalfa. Ensayos comparativos de rendimiento de forraje periodo 1992-1993. El Quebrachal y Cerrillos. INTA-EEA Salta. Salta, Argentina. p. 106.
- 18 Bianchi, A.R. 2000. Temperatura media estimada para la región noroeste de Argentina. EEA Cerrillos, INTA. Salta, Argentina. 14 pp.
- 19 Bianchi, A.R. y Bravo, G.C. 2008. Ecorregión Norandina. Ediciones INTA. Salta, Argentina. 20 pp.

- 20 Bianchi, A.R.; Yañez, C.E. y Acuña, L.R. 1992. Las precipitaciones en el Noroeste Argentino. EEA Cerrillos, INTA. Salta, Argentina. 383 pp.
- 21 Bigham, Brother. 2017. Operator's & Repair Parts Manual. Manual operator, Bigham Brothers. Lubbock, Texas, EEUU. p. 32.
- 22 Bilotta, G.S.; Brazier, R.E. y Haygarth, P.M. 2007. The impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands. *Advances in Agronomy* 94: 237-280.
- 23 Blanco Sepúlveda, R. 2009. La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*. 43: 231-239.
- 24 Bonadeo, E.; Hampp, E.R.; Bongiovanni, M.D.; Moreno, I.S. y Odorizzi, A. 2006. Relaciones entre propiedades físicas y químicas del suelo y raíces de alfalfa (*Medicago sativa* L.) afectada por «manchoneo». *Ciencia del Suelo*. 24(2): 101-107.
- 25 Bossuyt, H.; Deneff, K.; Six, J.; Frey, S.D.; Merckx, R. y Paustian, K. 2001. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology* 16(3): 195-208.
- 26 Botta, G. y Dagostino, C. 2001. Maquinarias para el laboreo del suelo. *Agro Medios Argentina SRL*. Buenos Aires, Argentina. 96 pp.
- 27 Bouton, J.H. 2012. Breeding lucerne for persistence. *Crop and Pasture Science*. 63(2): 95-106.
- 28 Bravo, G.; Bianchi, A.; Volante, J.; Alderete Salas, S.; Semproni, G.; Vicini, L.; Lipshitz, H.; y Piccolo, A. 1999. Regiones agroeconómicas del Noroeste Argentino. Proyecto de relevamiento de cultivos del NOA. EEA INTA Cerrillos, Salta, Argentina. Salta, Argentina. p. 20.
- 29 Bray, R.H. y Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science Society of America Journal* 59(1): 39-46.
- 30 Bronick, C.J. y Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124(1-2): 3-22.
- 31 Bruand, A. y Gilkes, R. 2002. Subsoil bulk density and organic carbon stock in relation to land use for a Western Australian sodosol. *Australian Journal of Soil Research* 40: 999-1010.
- 32 Burnett, V.; Butler; Hirth, J. y Mitchell, M. 2020. Lucerne (*Medicago sativa* L.) persistence remains unchanged under variable cutting regimes. *Agronomy*. 10(6): 844-857.
- 33 Cabria, F.; Calandrone, M. y Monterubbianesi, G. 2002. Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Ciencia del Suelo* 20(2): 69-79.
- 34 Campbell, D.J. y Henshall, J.K. 1991. Bulk density. In Smith, K.A. y Mullins, C.E (Ed.), *Soil and environmental analysis. Physical methods*. Marcel Decker Inc. New York, USA. pp. 329-366.
- 35 Candotti, J. 1984. Estudio descriptivo de los establecimientos lecheros en la cuenca del Valle de Lerma. Convenio INTA - COSALTA., EEA INTA Cerrillos, Salta, Argentina. Salta, Argentina. p. 48.
- 36 Canevari, M. y Putnam, D.H. 2007. Managing depleted alfalfa stands: overseeding and other options. University of California. Oakland, California, EEUU. p. 14.
- 37 Cangiano, C.A. 2002. Implantación. En Cangiano, C.A.; Abdelhadi, L. (Ed.), *Manual de alfalfa*. Ediciones INTA. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. pp. 18-44.
- 38 Caruso, H. y Miranda, S. 2013. Efecto del encalado sobre la producción y persistencia de alfalfa en pastoreo. *Revista Argentina de Producción Animal*. 33(1): 259.
- 39 Caruso, H.; Camardelli, M. y Miranda, S. 2012. Efecto del método de desmonte sobre los indicadores de calidad del suelo y la condición de las pasturas en el Chaco semiárido salteño. *Agriscientia*. 29(2): 99-105.
- 40 Comeron, E. 1999. Carga animal en pasturas de alfalfa. INTA, E.E.A. Rafaela. p. 3.
- 41 Comeron, E.A. 2007. Eficiencia productiva de los sistemas lecheros en zonas templadas (con especial referencia a América Latina y Argentina). *Archivo Latinoamericano Producción Animal*. 15(1): 141-143.

- 42 Conti, M. 2014. Principios de edafología. Con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires. Argentina. 430 pp.
- 43 Coruh, I. y Tan, M. 2008. Lucerne persistence, yield and quality as influenced by stand aging. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 51(1): 39-43.
- 44 Corvalán, E.; Franzoni, A.; Huidobro, D. y Arzeno, J. 2000. Método de microtamices para la determinación de la estabilidad de los agregados del suelo entre 1 y 2 mm. En actas del XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina. pp. 35-39.
- 45 Corvalán, E.; Arzeno, J.; Huidobro, D.; Arias, P.; Franzoni, A.; y Matta, A. 2004. Impacto del cultivo orgánico de granos evaluados con indicadores químicos de calidad de suelos. En actas del 19º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. Argentina. p. 328.
- 46 Corvalán, E.; Sánchez, D.; Visentini, E.; Cabrera, P.; Osinaga, R.; y Arzeno, J. 2014. Estado y dinámica de atributos químicos y fisicoquímicos de suelos en dos zonas productivas de salta. En actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional sobre materia orgánica y sustancias húmicas. Bahía Blanca. Buenos Aires. Argentina. p. 5.
- 47 Crespo, G. 2008. Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 42(4): 329-335.
- 48 Cueto, O.G.; Coronel, C.E.I. y Suárez, M.H. 2009. Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 18(2): 57-63.
- 49 Daddow, R.L. y Warrington, G.E. 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. *USDA Forest Service*. Colorado, EEUU. p. 17.
- 50 Dann, P. 1985. Deep tillage research on the southern tablelands of NSW. In *Proceeding 3rd Australian Agronomy Conference*. Australian Society of Agronomy. Tasmania Hobart, Australia. p. 2.
- 51 De Gruijter, J.J.; Bierkens, M.F.P.; Brus, D.J. y Knotters, M. 2006. *Sampling for natural resource monitoring*. Springer. Berlin, Alemania. 334 pp.
- 52 De Orellana, J.A. y Pilatti, M.A. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del Suelo* 12: 75-80.
- 53 Di Rienzo, J.A.; Cazanoves, F.; Balzarini, M.; Gonzalez, L.A.; Tablada, M. y Robledo, C.W. 2008. *Infostat (software estadístico)*.
- 54 Di Rienzo, J.A.; Machiavelli, R. y Casanoves, F. 2012. *Modelos lineales mixtos: aplicaciones en Infostat*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Córdoba, Argentina. 248 pp.
- 55 Díaz, R.O. 2007. *Utilización de pastizales naturales*. Editorial Brujas. Córdoba, Argentina. 456 pp.
- 56 Donkor, N.T.; Gedir, J.V.; Hudson, R.J.; Bork, E.W.; Chanasyk, D.S. y Naeth, M.A. 2002. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science* 82(1): 1-8.
- 57 Doran, J.W. y Zeiss, M.R. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied soil ecology* 15(1): 3-11.
- 58 Drewry, J.J. 2006. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114(2-4): 159-169.
- 59 Dunn, M. 2013. *Stocking system effects on cattle performance, forage, and soil properties of cool-season pastures*. Master of Science. Iowa State University. Iowa, EEUU.

- 60 Duval, M.; Galantini, J.; Martinez,; López, F. y Wall, L. 2016. Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality. *Soil & Tillage Research*. 159: 9-22.
- 61 Eiza, M.J.; Studdert, G.A.; Fioriti, N. y Dominguez, G.F. 2006. Estabilidad de agregados y materia organica total y particulada en Molisoles de Balcarce. En actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Salta, Argentina. p. 5.
- 62 Farre, I.; Bowden, B.; Davies, S. y Van Gool, D. 2010. Removal of a subsoil constraint - When does it pay?. In *Proceedings of the 15th Australian Agronomy Conference*. Australian Society of Agronomy. Lincoln, New Zeland. p. 6.
- 63 Ferrary Laguzzi, F.; Osinaga, R.; Arzeno, J.L.; Becker, A.R. y Rodriguez, T. 2014. Fraccionamiento y mineralización de la materia orgánica en distintos sistemas de labranza en un Inceptisol en Salta. *Ciencia del Suelo*. 32(1): 63-72.
- 64 Ferreras, L.; Magra, G.; Besson, P.; Kovalevski, E. y García, F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*. 25(2): 159-172.
- 65 Filgueira, R.R.; Soracco, C.G.; Sarli, G.O. y Fournier, L.L. 2006. Estimación de propiedades hidráulicas de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio. *Ciencia del Suelo*. 24(1): 39-48.
- 66 Fontanetto, H.; Keller, O.; Gambaudo, S.; Albrecht, J.; y Boschetto, H. 2010. Fertilización balanceada para la alfalfa en la región centro-este de Santa Fe. AAPRESID, 2010, Planteos Ganaderos.: 86-87.
- 67 Formoso, F. 2007. Manual para la siembra directa. Hemisferio Sur S.R.L. Montevideo, Uruguay. 148 pp.
- 68 Frost, J.P. 1988. Effects on Crop Yields of Machinery Traffic and Soil Loosening Part 1. Effects on Grass Yield of Traffic Frequency and Date of Loosening. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 39: 301-312.
- 69 Gabioud, E.A.; Wilson, M.G. y Sasal, M.C. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del Suelo*. 29(2): 129-139.
- 70 Gambaudo, S. 2006. Calidad del yeso natural para uso agrícola. Información Técnica de Cultivos de Verano., INTA, E.E.A. Rafaela. Santa Fe, Argentina. pp. 110-113.
- 71 Garcia, W. y Sanchez, S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*. 35(2): 125-137.
- 72 Gastaldi, L.; Litwin, G.; Maekawa, M.; Centeno, A.R.; Engler, P.L.; Cuatrin, A.; Chimizc, J.; Ferrer, J.L. y Suero, M.M. 2015. El tambo argentino: una mirada integral a los sistemas de producción de leche de la Región Pampeana. INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. p. 10.
- 73 Gee, G.W. y Bauder, J. 1986. Particle-size analysis. In Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy/Soil Science Society of America. Madison. Wisconsin. USA. pp. 383-411.
- 74 Greenwood, K.; Hutchinson, K.; MacLeod, D.; y Scott, J. 1995. Stocking rate affects soil moisture under pasture.
- 75 Greenwood, K.L. 1996. Soil physical properties under pastures after long-term grazing by sheep. Tesis Doctoral. University of New England. New South Wales, Australia. 178p.
- 76 Greenwood, K.L. y McKenzie, B.M. 2001. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Animal Production Science*. 41(8): 1231-1250.
- 77 Greenwood, K.L.; MacLeod, D.A. y Hutchinson, K.J. 1997. Long-term stocking rate effects on soil physical properties. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 37(4): 413.

- 78 Greenwood, K.L.; MacLeod, D.A.; Scott, J.M. y Hutchinson, K.J. 1998. Changes to soil physical properties after grazing exclusion. *Soil use and Management*. 14(1): 19-24.
- 79 Guecaimburú, J.M.; Introncasi, R.; Vázquez, J.M.; Rojo, R. y Reposo, G. 2014. Persistencia de la descompactación del suelo realizada con escarificadores de montantes angulados en sistemas de siembra directa. *Chilean Journal Agriculture Animal Science*. 30(2): 109-115.
- 80 Hakl, J.; Santrucek, J.; Kocourkova, D. y Fuksa, P. 2007. The effect of the soil compaction on the contents of alfalfa root reserve nutrients in relation to the stand density and the amount of root biomass. *Soil and Water Resource*. 2: 54-58.
- 81 Hall, J.A. 1983. Comparison of tillage and herbicide treatments for alfalfa renovation. Tesis of Master of Science in Agronomy. Montana State University. Bozeman, Montana, EEUU. 91 p.
- 82 Hamza, M.A. y Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems. *Soil and Tillage Research*. 82(2): 121-145.
- 83 Haynes, R.J. 2005. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. *Advances in Agronomy*. 85: 221-268.
- 84 Hopkins, A.; Gilbey, J.; Dibb, C.; Bowling, P.J. y Murray, P. 1990. Response of permanent and reseeded grassland to fertilizer nitrogen. 1. Herbage production and herbage quality. *Grass and Forage Science*. 45: 43-55.
- 85 Huidobro, J. y Pérez Brandán, C. 2012. Niveles de glomalina y estabilidad de agregados del suelo, en distintos sistemas de manejo de tabaco en el Valle de Lerma, Salta. En actas II Congreso Nacional de Ecología y Biología de Suelos. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. p. 3.
- 86 Hutchinson, K y King, K. 2005. The soil food-web and its biological role in temperate pastures. *Newsletter Grassland Asociation*. 20(4): 6-10.
- 87 INDEC. 2003. Censo Nacional Agropecuario 2002.
En: <http://www.indec.mecon.ar>. Accedido: 25/07/2018.
- 88 INDEC. 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas.
En: <http://estadisticas.salta.gov.ar/web/level2/1/1/101>. Accedido: 16/09/2018.
- 89 INDEC. 2021. Censo Agropecuario Nacional 2018.
En: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-8-87>. Accedido: 28/05/2022.
- 90 Jones, C.A. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Science Society of America Journal*. 47: 1208-1211.
- 91 Jones, P. y Burrows, W.H. 1994. A state and transition model for the mulga zone of south-west Queensland. *Tropical Grasslands*. 28: 279-283.
- 92 Jorajuria, D. 2005. Jorajuría Collazo, D. Compactación del suelo agrícola por tráfico vehicular. Una revisión. Reología del suelo bajo tráfico. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires. Argentina. Buenos Aires. Argentina. pp. 39-55.
- 93 King, E.G. y Hobbs, R.J. 2006. Identifying linkages among conceptual models of ecosystem degradation and restoration: Towards an integrative framework. *Society for Ecological Restoration International*. 14(3): 369-378.
- 94 Kloster, A. y Zaniboni, A. 2007. Manejo y utilización de pasturas de alfalfa en producción de carne. En Basigalup, D. (Ed.). *El cultivo de alfalfa en Argentina*. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. pp. 277-301.
- 95 Kloster, N.; Azcarate, M.; Babinec, F. y Bono, A. 2008. Comparación de técnicas de medición del pH del suelo: pH en pasta de saturación y en relación suelo:agua 1:2,5. En Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Potrero de Los Funes, San Luis, Argentina. p. 6.
- 96 Krüger, H.R.; Venanzi, S. y De Sá Pereira, E. 2008. Efecto del pastoreo sobre la resistencia mecánica del suelo en sistemas de producción bajo siembra directa continua. *Ciencia del Suelo*. 26(2): 211-217.

- 97 Kuelh, R.O. 2001. Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. International Thomson Editores S.A. México. 666 pp.
- 98 Kumar, R.; Singh Rawat, K.; Singh, J.; Singh, A. y Rai, A. 2013. Soil aggregation dynamics and carbon sequestration. *Journal of Applied and Natural Science*. 5(1): 250-267.
- 99 Larocca, F. 2006. Desarrollo y ajuste de un sistema para monitorear el efecto ocasionado por el tránsito de maquinaria de cosecha en suelos de plantaciones forestales. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Concepción del Uruguay. Concepción del Uruguay, Entre Ríos. 125 p.
- 100 Laurenson, S. y Houlbrooke, D. 2016. Identifying critical soil water thresholds to decrease cattle treading damage risk. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 59(4): 444-451.
- 101 Lawson, A.; Kelly, K.; Phyland, G.; Byrne, L.; y Nankivell, M. 2003. Impact of renovation on production of irrigated pasture in northern Victoria. In *Proceedings 11th Agronomy Conference Australian Society of Agronomy*. Geelong, Victoria, Australia. p. 3.
- 102 Leach, G.J. 1979. Lucerne survival in south-east Queensland in relation to grazing management systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 19: 208-215.
- 103 Livingston, S. y Bade, D.H. 1996. Paratill Renovations of Pastures and Hayfields. Texas Agricultural Extension Service, Texas A & M University System.
- 104 Lodge, G.M. 1991. Management practices and other factors contributing to the decline in persistence of grazed lucerne in temperate Australia: a review. *Animal Production Science*. 31(5): 713-724.
- 105 Lozano, F. 2004. Nuevos conceptos y estrategias para la renovación de praderas degradadas en el trópico alto colombiano. En *actas de la primera reunión de la red temática de recursos forrajeros*. Corpoica. Tibaitata, Colombia. pp. 1-13.
- 106 Lunt, I.D. 2005. Effects of Stock Grazing on Biodiversity Values in Temperate Native Grasslands and Grassy Woodlands in SE Australia: A Literature Review. Technical report N°18. Environment ACT. Camberra, Australia. p. 66.
- 107 Marble, V.L. 1990. Factors to optimize alfalfa production in the 1990's.-20th California alfalfa symposium. Visalia, California, EEUU. pp. 4-45.
- 108 Marcolin, C.D. y Klein, V.A. 2011. Determinacao da densidade relativa do solo por uma funcao de pedotransferencia para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum Agronomy*. 33(2): 349-354.
- 109 Martínez Rubin de Celis, E.; Rivas Robles, E.; Martínez Corral, L.; Frías Ramírez, J.; Orozco Vidal, J. y Segura Castruita, S. 2011. Producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en suelo compactado a varias intensidades bajo condiciones controladas. *Phyton. Revista Internacional de Botánica Experimental*. 80(2): 189-192.
- 110 Martino, D. 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. Diaz Rosello, R. (Ed.), *Siembra directa en el Cono Sur*. INIA, Las Brujas. Montevideo, Uruguay. pp. 225-257.
- 111 Mattera, J. y Romero, L. 2013. Claves para una buena implantación de alfalfa. Área de Investigación en Producción Animal. EEA INTA Rafaela. Santa Fe, Argentina. p. 3.
- 112 Mattera, J.; Romero, L.A.; Cuatrin, A.L.; Cornaglia, P.S. y Grimoldi, A.A. 2013. Yield components, light interception and radiation use efficiency of lucerne (*Medicago sativa* L.) in response to row spacing. *Europ. J. Agronomy*. 45: 87-95.
- 113 Mattew, P.L.; Sands, J.W.; Wijara, E.R. y Mursahid, A. 1985. The effect of deep ripping and gypsum application on sodic duplex soils for pasture production. In *Proceeding of the 3rd Australian Agronomy Conference*. Australian Society of Agronomy. Hobart, Tasmania, Australia. p. 1.

- 114 McKenzie, D.C. 2000. Soil assessment for pasture production that considers both physical and chemical factors in the topsoil and subsoil. In Proceeding of the 20th Annual conference of Grassland Society of NSW. Orange, Australia. pp. 26-30.
- 115 Medina, C. 2016. Effects of soil compaction by trampling of animals in soil productivity. Remediations. Revista Colombiana de Ciencia Animal. 8(1): 88-93.
- 116 Micucci, C. y Lopez Menardi, A. 2004. Propuesta tentativa para un saamuestra dinámico de uso extendido (S.U.E.). En Filgueira, R. y Micucci, F. (Eds), Metodologías Físicas para la investigación del Suelo: penetrometría e infiltrometría. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina. p. 180.
- 117 Micucci, F. 2012. Aptitud física de suelos de la Pampa Ondulada para ser manejados con siembra directa continua. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. p. 118.
- 118 Minetti, J. 2012. El clima del Noroeste Argentino. Magna Publicaciones. Tucuman, Argentina. 410 pp.
- 119 Mon, R. 2008. Ampliación del perfil de suelos erosionados y compactados mediante subsolado con enmienda calcica profunda. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. Instituto Universitario de Xeoloxía. La Coruña. España. p. 164.
- 120 Moot, D.J.; Pollock, K.M. y Lewis, B. 2012. Plant population, yield and water use of lucerne sown in autumn at four sowing rates. Proceedings of the New Zealand Grassland Association. pp. 97-102.
- 121 Moro, E.C.; Venialgo, C.A.; Gutierrez, N.C.; Drganc, D.; Asselborn, A. y Oleszczuk, J.D. 2004. Efecto de las labranzas y rotaciones sobre la compactación de suelos en distintos sistemas productivos de la Provincia del Chaco-República Argentina. Agrotecnia 12: 3-8.
- 122 Mullins, G.L.; Burmester, C.H. y Reeves, D.W. 1997. Cotton response to inrow subsoiling and potassium fertilizer placement in Alabama. Soil and Tillage Research. 40: 145-154.
- 123 Murcia Contreras, G.A. y Camacho Tamayo, J.H. 2011. Capacitación en maquinaria para el establecimiento y manejo de praderas. Federación Colombiana de Ganaderos. Servicio Nacional de Aprendizaje. 24 pp.
- 124 Nadir, A. y Chafatinos, T. 1990. Los suelos del NOA (Salta y Jujuy). Tomo 2. Universidad Nacional de Salta. Salta, Argentina. 123 pp.
- 125 Navarro, G.; Balocchi, O.; López, I.; Clunes, J. y Dorner, J. 2012. Efecto de la aplicación de tres estrategias de mejoramiento de praderas degradadas sobre las propiedades hidráulicas del suelo. Agrosur. 40(1): 9-19.
- 126 Nelson, D.W. y Sommers, L.E. 1980. Total nitrogen analysis of soil and plant tissues. En Sparks, D. (Ed.), Journal Association Oficial Analyze. Chemical methods. SSSA. Madison. Wisconsin. USA. pp. 770-780.
- 127 Nelson, D.W. y Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. En Sparks, D (Ed.), Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. SSSA. Madison. Wisconsin. USA. pp. 961-1010.
- 128 Nieto, D.; Quintana, J.; y Scala, E. 2007. Análisis de las Cuencas Lecheras de Trancas (Tucumán) y Valle de Lerma (Salta), identificación de las problemáticas y evaluación de alternativas de desarrollo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – Argentina. Buenos Aires, Argentina. p. 32.
- 129 Odorizzi, A.S. 2015. Parámetros genéticos, rendimiento y calidad forrajera en alfalfas (Medicago sativa.) extremadamente sin reposo con expresión variable del carácter multifoliolado obtenidas por selección fenotípica recurrente. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Córdoba, Argentina. p. 150.

- 130 Oesterheld, M. y León, R.J.C. 1993. Cambios en la compactación del suelo durante el envejecimiento de pasturas implantadas. *Revista Argentina de Producción Animal*. 13(2): 149-153.
- 131 Ortega, A. y Corvalán, E. 2001. Diagnóstico de suelos. INTA. EEA Salta. Salta, Argentina. p. 5.
- 132 Osuna Cejas, E.; Garibaldi Marquez, F. y Garcia Hernández, R. 2019. Desempeño de un subsolador integral biomimético para laboreo sustentable de suelos agrícolas. *Acta Universitaria*. 29: 1-14.
- 133 Page, A.L. 1982. *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties*. ASA. SSSA. Madison. Wisconsin. USA. 1159 pp.
- 134 Palmer, T.P. y Wynn-Williams, R.B. 1976. Relationships between density and yield of lucerne. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*. 4(1): 71-77.
- 135 Pascale, A. y Damario, E. 2004. *Bioclimatología agrícola y agroclimatología*. Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires, Argentina. 550 pp.
- 136 Peretti, J. y Caruso, H. 2014. Producción de pasturas templadas en relación a la densidad aparente del suelo (Comunicación). *Revista Argentina de Producción Animal* 34(1): 579.
- 137 Pereyra, S.; Caruso, H. y Miranda, S. 2011. Relación entre la compactación del suelo y la producción de forraje de alfalfa. Comunicación. *Revista Argentina de Producción Animal* 31(1): 507.
- 138 Piccolo, A.; Georgetti, M. y Chavez, D. 2008. Zonas agroecológicas homogéneas de Salta y Jujuy. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. 115 pp.
- 139 Pilatti, M.A.; Priano, L.J.J. y De Orellana, J.A. 1987. Modificaciones producidas en el suelo por plantas forrajeras. *Ciencia del Suelo*. 5(2): 150-157.
- 140 Pilatti, M.A.; De Orellana, J.; Imhoff, S. DEL C. y Da Silva, Á.P. 2012. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. *Ciencia del Suelo* 30(1): 09-21.
- 141 Ponce, M.; Mur, M.; Palancar, T.; Vazquez, J.; Gulino, F.; Merani, V. y Balbuena, R. 2016. Eficiencia energética de distintas alternativas de descompactación. En *Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Rio Cuarto, Cordoba, Argentina. p. 18.
- 142 Primavesi, A. 1984. *Manejo ecológico del suelo*. El Ateneo. Buenos Aires, Argentina. 499 pp.
- 143 Pulido-Moncada, M.A.; Lobo-Luján, D. y Lozano-Pérez, Z. 2009. Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia* 43(3): 221-230.
- 144 Putnam, D.; Mueller, S.; Frate, C.; Canevari, M. y Orloff, S. 2012. Key practices for alfalfa stand establishment. In *Proceeding of California Alfalfa and Grain Symposium*. Sacramento, California, EEUU. p. 12.
- 145 Quiñonez, A.G.; Dalla Fontana, L.A. y Mollo, A.J. 2003. Respuesta de la alfalfa al agregado de fósforo, boro y calcio. *Revista FAVE, Sección Ciencias Agrarias*. 2(1-2): 47-54.
- 146 Quiroga, A.; Funaro, D.; Noellemeyer, E. y Peinemann, N. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 90(1-2): 63-68.
- 147 Radcliffe, D.E.; Clark, D.E. y Summer, M.E. 1986. Effect of gypsum and deeprooting perennials on subsoil mechanical impedance. *Soil Science Society of America Journal*. 50: 1566-1570.
- 148 Reichert, J.; Sanchez Susuki, L.; Reinert, D.; Horn, R. y Håkansson, I. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*. 102(2): 242-254.
- 149 Roberts, T.L. y Henry, J.L. 2000. El muestreo de suelos: los beneficios del buen trabajo. *INPOFOS Cono Sur*. 8: 7-10.

- 150 Roesner, L. 2003. Lucerne sowing rate and its effects on plant density and productivity. *Proceeding of the Joint conference of GSV*. Albury, Australia. p. 97.
- 151 Rojas García, A.; Torres Salado, N.; Joaquín Cancino, S.; Hernández Garay, A.; Maldonado Peralta, M. y Sánchez Santillan, P. 2017. Componentes del rendimiento en variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Agrociencia*. 51: 697-708.
- 152 Romero, L.A.; Bruno, O.A.; Fossati, J.L. y Quaino, O.R. 1991. Densidad de siembra de alfalfa cv. CUF-101: Número de plantas y producción. *Revista Argentina de Producción Animal*. 11: 411-417.
- 153 Romero, L.A.; Mattera, J. y Cuatrin, A. 2006. Efecto de la distancia y la densidad de siembra sobre la producción de materia seca y la persistencia de la alfalfa. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 26: 171-172.
- 154 Romero, L.A.; Mattera, J. y Cuatrin, A. 2008. Efecto del tipo de siembra sobre la producción y el número de plantas en pasturas de alfalfa en el año de implantación. *Revista Argentina de Producción Animal*. 28: 505-506.
- 155 Sánchez, D.C.; Arzeno, J.L. y Corvalán, E.R. 2008. Validación de modelos de estimación de la materia orgánica en base a textura para suelos del departamento de Anta, Salta. *En actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Potrero de Los Funes, San Luis, Argentina. p. 6.
- 156 Sánchez Flores, J.M. 2014. Efecto de tres sistemas de labranza en la compactación del suelo. Tesis de grado (Ingeniero Mecánico Agrícola). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento Maquinaria Agrícola. Saltillo, Coahuila, México. p. 73.
- 157 Sardiña, C.; Barraco, M.; Vankeirsbilck, I.; Diez, M. y Ottaviano, C. 2015. Fertilización con calcita y yeso en alfalfa (*Medicago sativa* L.). *EEA INTA General Villegas, Área de Producción Animal*. Buenos Aires, Argentina. p. 7.
- 158 Seifu, W. y Elias, E. 2018. Soil quality attributes and their role in sustainable agriculture: A review. *International Journal of Plant y Soil Science*. 26(3): 1-26.
- 159 Sevilla, G.H.; Pasinato, A.M. y García, J.M. 2002. Producción de forraje y densidad de plantas irrigadas comparando distintas densidades de siembra. *Archivo Latinoamericano Producción Animal*. 10(3): 16-170.
- 160 Shah, A.N.; Tanveer, M.; Shahzad, B.; Yang, G.; Fahad, S.; Ali, S.; Bukhari, M.A.; Tung, S.A.; Hafeez, A. y Souliyanonh, B. 2017. Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(11): 10056-10067.
- 161 Shi, N. 1991. Demographic changes and genetic variation of an alfalfa (*Medicago sativa* L.) population. Tesis of Master of Science. The Univerity of Arizona. EEUU. p. 89.
- 162 Shovelton, J. 1985. The response of pastures to deep tillage and superphosphate in NE Victoria. *In proceeding of the 3rd Australian Agronomy Conference*. Australian Society of Agronomy. Hobart, Tasmania, Australia. p. 2.
- 163 Six, J.; Bossuyt, H.; Degryze, S. y Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*. 79(1): 7-31.
- 164 Sjoerd, W.D. 2004. Effects of soil compaction. College of Agricultural Sciences. Agricultural Research and Cooperative Extension. Pennsylvania State University. Pennsylvania, USA. p. 12.
- 165 Soane, B.D.; Dickson, J.W. y Campbell, D.J. 1982. Compaction by agricultural vehicles: A review III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil and Tillage Research*. 2(1): 3-36.

- 166 Soil Science Society of America (SSSA). 2018. Glossary of Soil Science Terms. En: <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>. Accedido: 02/10/2018.
- 167 Sosa, O.; Martín, B.; y Zerpa, G. 1997. Efecto del pisoteo de bovinos sobre la evolución del stand de plantas de una pastura consociada. *Archivo Latinoamericano de Producción Animal*. 5(1): 33-35.
- 168 Soto, K. y López, T. 1986. Dosis de siembra en variedades de alfalfa (*Medicago sativa*). *Agricultura Técnica (Chile)*. 46(4): 1-20.
- 169 Soto, P. 1990. Técnicas agronómicas para el cultivo de la alfalfa. Adaptación y establecimiento. En Soto, P. (Ed.), *Producción y utilización de alfalfa. Zona centro-sur y sur*. INIA. Estación experimental Quilamapu, Chillán. Chile. pp. 15-33.
- 170 Spoor, G. 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use Manage*. 22: 113-122.
- 171 Steel, R.G.D. y Torrie, J.H. 1985. *Bioestadística: Principios y Procedimientos*. Mc Graw-Hill Latinoamericana S.A. Bogotá, Colombia. 622 pp.
- 172 Stelzer, H. y Welker, J.M. 2006. Modeling the effect of photosynthetic vegetation properties on the NDVI-LAI relationship. *Ecology*. 87(11): 2765-2772.
- 173 Suárez, V. y Martínez, M. 2015. Características generales de los tambos. Características y problemáticas productivas sanitarias de la lechería del Valle de Lerma, Salta. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. p. 63.
- 174 Taboada, M.A. 2007. Efecto del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa. En *Actas del 4° Simposio de Ganadería en Siembra Directa*. AAPRESID. Potrero de Los Funes, San Luis, Argentina. pp. 71-83.
- 175 Taboada, M.A. y Micucci, S.N. 2009. Respuesta de las propiedades físicas de tres suelos de la Pampa deprimida al pastoreo rotativo. *Ciencia del suelo*. 27(2): 147-157.
- 176 Taboada, M.A.; Rubio, G.; Chaneton, E.J.; Hatfield, J.L. y Sauer, T.J. 2011. Grazing Impacts on Soil Physical, Chemical, and Ecological Properties in Forage Production Systems. In Hatfield, J.L. and Sauer, T.J. (Eds.), *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture*. Soil Science Society of America. USA. pp. 301-320.
- 177 Taylor, R.W. y Barczewaski, R. 1998. *Pasture renovation*. Agronomy Facts Series AF-08. University of Delaware. Cooperative Extension. Delaware, USA. p. 5.
- 178 Tesouro, O.; Romito, A.; D'Amico, J.; Roba, M.; y Pollacino, J. 2013. Labranza vertical: Efecto sobre un suelo compactado y el rendimiento de un ciclo trigo - maíz. Informe técnico N° 22. Instituto de Ingeniería Rural - CIA - CNIA - INTA Castelar., INTA. Castelar, Buenos Aires, Argentina. p. 32.
- 179 The Profitable Soils Group. 2009. Northern Australia GRDC Subsoils Project Physical constraints. *Subsoil manual*. pp. 51-54.
- 180 Tian, F.; Brandt, M.; Liu, Y.; Verger, A.; Togesson, T.; Diouf, A.; Rasmussen, K.; Mbow, C.; Wang, Y. y Fensholt, R. 2016. Remote sensing of vegetation dynamics in drylands: Evaluating vegetation optical depth (VOD) using AVHRR NDVI and in situ green biomass data over West African Sahel. *Remote Sensing of Environment*. 17: 265-276.
- 181 Ticks, B. 1992. *Renovación alfalfa. Forage and Grain*. A College of Agriculture Report. University of Arizona. 1992: 6-7.
- 182 Torres Guerrero, C.; Etchevers, J.; Fuentes Ponce, M.; Govaerts, B.; León González, F. y Herrera, J. 2013. Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana*. 31(1): 71-84.
- 183 Undersander, D.; Grau, C.; Casgrove, D.; Doll, J.; y Martín, N. 1998. Alfalfa stand assessment: Is this stand good enough to keep? Cooperative Extension Publications, University of Wisconsin-Extension. USA. p. 4.

- 184 USDA. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de Agricultura. Servicio de Investigación Agrícola. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Instituto de Calidad de Suelos, INTA Castelar. USA. p. 82.
- 185 Vallejos, A.; Kees, M.; Bondía, P.; Echeverría, N.; Silenzi, J.; Zajac, C.; y De Lucia, M. 2014. Subsulado en siembra directa: efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja. *Ciencia del Suelo*. 32(2): 291-300.
- 186 Vankeirsbilck, M.I.; Barraco, M. y Maekawa, M. 2015. Materia orgánica y textura en suelos de sistemas lecheros de la cuenca oeste de la provincia de Buenos Aires. Memoria técnica. INTA, EEA General Villegas. 2014-2015.: 57-59.
- 187 Vanzolini, J.; Zubiaga, L.; Storniolo, R.; Dunel, L.; Ombrosi, D.; Cuello, S.; Alvarez, C. y Quiroga, A. 2015. Evaluación expeditiva del estado de la calidad de suelos con manejo agrícola en el área de secano del partido de Villarino. En actas de la Jornada: Día Internacional del suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. FAUBA, Buenos Aires. Argentina. p. 6.
- 188 Varela, M.F.; Fernández, P.L.; Rubio, G. y Taboada, M.A. 2011. Cultivos de cobertura: efectos sobre la macroporosidad y la estabilidad estructural de un suelo franco-limoso. *Ciencia del Suelo*. 29(1): 99-106.
- 189 Viglizzo, E.F.; Pordomingo, A.J.; Castro, M.G.; Lertora, F.A. y Bernardos, J.N. 2004. Scale-dependent controls on ecological functions in agroecosystems of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 101: 39-51.
- 190 Watts, B. 2000. Using soil assessment for pasture production that considers both physical and chemical factors in the topsoil and subsoil. In *Proceeding of the 20th Annual Conference of the Grassland Society of NSW Inc*. Orange, Australia. pp. 29-30.
- 191 Williams, J. y Chartres, C.J. 1991. Managing the soil resource. *Tropical Grasslands*. 25: 73-84.
- 192 Wilson, M.; Sasal, M. y Caviglia, O. 2013. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma*. 192: 354-361.
- 193 Wirsch, I. y Caruso, H. 2012. Modificación del suelo en pasturas de Gatton panic bajo pastoreo. Comunicación. *Revista Argentina de Producción Animal* 32: 321.
- 194 Wolkowski, R. y Lowery, B. 2008. Soil compaction: causes, concerns, and cures. University of Wisconsin. Wisconsin, EEUU. p. 8.
- 195 World Commission on Environment and Development. 1987. Our common future. Oxford University Press. London. p. 400.
- 196 Yañez, C. 2003. Necesidades de agua y riego para 20 localidades de Salta y Jujuy. En: http://anterior.inta.gov.ar/f/?url=http://anterior.inta.gov.ar/prorenea/info/resultados/nec_agualluvia/index.htm. Accedido: 10/05/2018.
- 197 Zinck, J.A.; Berroterán, J.L.; Farshad, A.; Moameni, A.; Wokabi, S. y Van Ranst, E. 2005. La sustentabilidad agrícola: un análisis jerárquico. *Gaceta Ecológica*. 76: 53-72.

Agradecimientos

Al Estado Nacional por implementar el Programa Doctorar en Agronomía, a través del cual obtuve una beca para la realización de este posgrado.

A la Universidad Nacional de Salta por permitirme desarrollar esta actividad de perfeccionamiento y por haberme brindado los medios para desarrollar la tesis.

A la Universidad Nacional del Litoral por acogerme en el Doctorado en Ciencias Agrarias.

A mi director, Jorge Gieco, por sus aportes permanentes para el desarrollo de este proyecto.

A los productores del Valle de Lerma, en cuyos campos realizamos muestreos de las pasturas y del suelo. Gracias por permitir el ingreso a sus establecimientos.

A los directivos y personal de la EEA INTA Cerrillos, por permitirme desarrollar uno de los ensayos y algunos análisis de laboratorio en sus instalaciones.

A los alumnos de la Práctica de Formación III de la Carrera de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta. Gracias por su participación en las actividades de campo.

A mis amigos “Coyita” Mirabal y Pablo Pardo por su colaboración y apoyo constante.

A Daniela, mi esposa, y a María Luján, mi hija, por sus correcciones y aportes para la redacción de la tesis.