

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS PECUARIAS
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ZOOTECNISTA



TESIS

**PRODUCTIVIDAD DE BIOMASA AÉREA DE ALFALFA (*Medicago sativa*
L.) DERIVADA DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA
NORMALIZADA**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ZOOTECNISTA

Presentado por el bachiller
CHUNQUE FIGUEROA FIDEL

ASESOR

Dr. Ing. JOSÉ LUIS TIEDEMANN

CO-ASESORA

Dra. Ing. MARIA JUDITH OCHOA

CAJAMARCA – PERÚ

2021



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO.
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y AGROINDUSTRIAS**

**TRABAJO FINAL DE INTENSIFICACIÓN PARA ACCEDER AL
TÍTULO DE INGENIERO ZOOTECNISTA**

**PRODUCTIVIDAD DE BIOMASA AÉREA DE ALFALFA
(*Medicago sativa* L) DERIVADA DEL INDICE DE
VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA**

Estudiante:

FIDEL CHUNQUE FIGUEROA

Director:

Dr. Ing. JOSÉ LUIS TIEDEMANN

Co Director:

Dra. Ing. JUDITH OCHOA

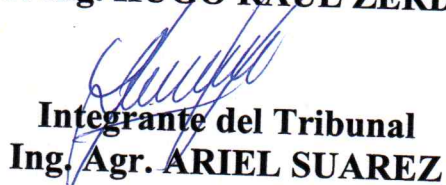
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO.
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y AGROINDUSTRIAS**

**TRABAJO FINAL DE INTENSIFICACIÓN PARA ACCEDER AL
TÍTULO DE INGENIERO ZOOTECNISTA**

Tribunal de Evaluación:



**Integrante del Tribunal
Dr. Ing. HUGO RAUL ZERDA**



**Integrante del Tribunal
Ing. Agr. ARIEL SUAREZ**

**Integrante del Tribunal
Lic. Sist. M Sc. JUANA LOPEZ**



NOTA: Fecha de Defensa de Tesis 28/11/2018



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"Norte de la Universidad Peruana"
Fundada por Ley 14015 del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS PECUARIAS
SECRETARIA ACADEMICA
RESOLUCIÓN DE CONSEJO DE FACULTAD VIRTUAL N.º 110-2021-SA/FICP-UNC



Cajamarca, 16 de septiembre del 2021

VISTO: la solicitud de fecha 30 de agosto del 2021, Bajo Registro N.º 00066-2021-SA-FICP-UNC, de fecha 06 de septiembre del 2021, suscrito por el Ex Alumno **Fidel Chunque Figueroa**, de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Pecuarias, Universidad Nacional de Cajamarca, y;

CONSIDERANDO:

Que, mediante el documento de visto, el Ex alumno **Fidel Chunque Figueroa**, quien solicita la convalidación de Tesis que fue realizada y sustentada en la Universidad de Santiago del Estero-Argentina, mediante el programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA), realizado entre los meses de agosto a diciembre del 2018;

Que, el Sr. **Fidel Chunque Figueroa** es becario del Programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA), por lo que ha realizado su Trabajo Final de Tesis en la Universidad de Santiago del Estero – Argentina, Facultad de Agronomía y Agroindustrias;

Que, la ejecución, presentación, sustentación y aprobación de la Tesis es un requisito indispensable para la Obtención del Título Profesional de Ingeniero Zootecnista;

Estando a lo expuesto, a lo acordado por el Consejo de Facultad Virtual de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Pecuarias en su Sesión Ordinaria de fecha 06 de septiembre del 2021, y de conformidad con el Artículo 11º y siguientes del Reglamento de Graduación y Titulación de la Facultad De Ingeniería en Ciencias Pecuarias, y en uso de las atribuciones conferidas por el Artículo 69º del Reglamento General de la Universidad Nacional de Cajamarca.

SE RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO. CONVALIDAR el Trabajo de Fin de Tesis del Ex Alumno, beneficiario del Programa PIMA, Sr.: **FIDEL CHUNQUE FIGUEROA**, Titulado: "PRODUCTIVIDAD DE BIOMASA AÉREA DE ALFALFA (*Medicago sativa* L.) DERIVADA DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA", llevado a cabo en la Universidad de Santiago del Estero-Argentina; en el marco al Convenio Suscrito entre la Universidad Nacional de Cajamarca y la Universidad de Santiago del Estero-Argentina.

ARTÍCULO SEGUNDO. PRECISAR, que el presente trabajo se realizó entre los meses agosto a diciembre del 2018, bajo la dirección del Dr. José Luis Tiedemann y Co-Dirigido por la Dra. Ing. Agr. María Judith Ochoa; que luego de la lectura de la parte escrita; la defensa oral se efectúa con solvencia y calidad, dando muestra de un acabado conocimiento del tema; por lo que el jurado le otorga la calificación de Muy Bueno (09-nueve) que es la calificación que asigna el jurado evaluador, tal como se indica en la correspondiente Acta que se Adjunta al Expediente.

ARTÍCULO TERCERO. FELICITAR al Sr. **FIDEL CHUNQUE FIGUEROA**, ex alumno de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Pecuarias (Escuela Académico Profesional de Ingeniería Zootecnista), por los logros obtenidos y por su eficiente desempeño, que ha dejado en alto el nombre de nuestra Facultad.

ARTÍCULO CUARTO. DAR a conocer la presente resolución a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Zootecnista, al Coordinador del Programa PIMA y al interesado para los fines pertinentes.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



[Handwritten signature]

Dr. Roy Florián Lescano
Decano de la FICP
Universidad Nacional de Cajamarca



[Handwritten signature]

Mg.Sc. Ing. Raúl Alberto Cáceres Cabanillas
Secretario Académico de la FICP
Universidad Nacional de Cajamarca


Distribución:
- E.A.P.I.Z.-FICP-UNC
- Coordinador PIMA
- Interesado
- Archivo
- Nancy León/secretaria FZ

ACTA TRABAJO FINAL

----- En el Aula 7 de la Facultad de Agronomía y Agroindustrias de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, sita en la ciudad de Santiago del Estero, Argentina, se reúne el Tribunal de Seguimiento y Evaluación integrado por: **Dr. Hugo Raúl Zerda, MSc. Lic. Sist. Juana López y Ing. Agr. Ariel Suarez**, designados mediante Resolución FAA N° 719/2018, para evaluar el Trabajo Final presentado por el **Sr. Fidel Chunque Figueroa, DNI N° 44.446.856, Pasaporte: 117.149.721**, alumno Becario del Programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA) y Titulado: **“Productividad de Biomasa Aérea de Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Derivada del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada”**, realizado bajo la dirección del Dr. José Luis Tiedemann y Co-Dirigido por la Dra. Ing. Agr. María Judith Ochoa. El Jurado expresa que ha realizado la lectura del trabajo escrito y que el mismo fue efectuado con solvencia y calidad, dando muestra de un acabado conocimiento del tema.-----

----- En consecuencia resuelve aprobar dicho Trabajo Final, otorgándole la calificación de **...MUY BUENO. (9: nueve)**...-----


.....
Dr. Hugo Raúl Zerda


.....
Ing. Agr. Ariel Suarez


.....
MSc. Lic. Sist. Juana Lopez

----- A los fines académicos que pudieran corresponder se expide la presente a los veintiocho días del mes de noviembre del año dos mil dieciocho.-----

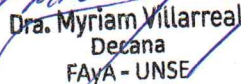
CERTIFICADO DE ESTUDIOS


----- La autoridad que suscribe **CERTIFICA** que el **Sr. Fidel Chunque Figueroa, DNI N° 44.446.856, Pasaporte: 117.149.721**, alumno Becario del Programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA), por Resolución FAA N° 524/2018, ha aprobado el trabajo final titulado: **Productividad de Biomasa Aérea de Alfalfa (*Medicago Sativa* L.) Derivada del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada**”, realizado bajo la dirección del Dr. José Luis Tiedemann y Co-Dirigido por la Dra. Ing. Agr. María Judith Ochoa; recibiendo la calificación **..... MUY BUENO ... (9: nueve).....**, según el Acta correspondiente.-----

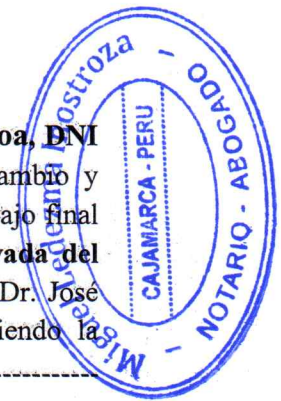

Ing. I.A.A. Alejandra Cenice
Secretaria
Vinculación, Tranf. y Extensión
FAyA - UNSE

**P/ Sec. Acad.
FAyA**




Dra. Myriam Villarreal
Decana
FAyA - UNSE


Lic. Yns Bettiana RAFAEL
SECRETARIA ACADÉMICA
UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SANTIAGO DEL ESTERO



**COPIA
BOY FE; QUE LA PRESENTE COPIA
CONCUERDA EXACTAMENTE CON SU
ORIGINAL QUE TENGO A LA VISTA
CAJAMARCA. 24 SET. 2021**

Miguel Ledezma Inostroza
NOTARIO - ABOGADO
CAJAMARCA - PERU

“2018 – Año del Centenario de la Reforma Universitaria”
Santiago del Estero, 30 de noviembre de 2018.-

RESOLUCION F.A.A. N° 888 /2018

Ref.: Acta Trabajo Final de Intensificación

Asunto: *APROBAR el Trabajo Final de Intensificación de la Carrera de Ingeniería Agronómica, del Becario PIMA Sr. Fidel Chunque Figueroa.-*

VISTO:

El Acta de la Exposición Oral y Pública del Trabajo Final de Intensificación del Sr. **Fidel Chunque Figueroa, DNI N° 44.446.856, Pasaporte N° 117.149.721**, alumno Becado del Programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA); y

CONSIDERANDO:

Que el Tribunal de Seguimiento y Evaluación designado mediante Resoluciones 719/2018, ha evaluado el trabajo presentado titulado **“Productividad de Biomasa Aérea de Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Derivada del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada”**, realizado bajo la dirección del Dr. José Luis Tiedemann y Co – Dirigido por la Dra. Ing. Agr. María Judith Ochoa.

Que el día veintiocho de noviembre de dos mil dieciocho, se ha fijado la fecha de la Exposición Oral y Pública por parte del Sr. Figueroa.

Que en la correspondiente Acta, se expresa que se llega a la instancia de defensa oral luego que el Tribunal de Seguimiento y Evaluación, efectuara la lectura del trabajo escrito y la presentación oral fue efectuada con solvencia y calidad, dando muestra de un acabado conocimiento del tema, resolviéndose por unanimidad calificar con Muy Bueno (9-nueve) la presente instancia.

Que es atribución de la Señora Decana dirigir, coordinar y supervisar la actividad académica de la Facultad, conforme lo establece el Artículo 40°, inciso 6°, del Estatuto de la UNSE. **Por ello:**

LA DECANA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA Y AGROINDUSTRIAS

RESUELVE

ARTÍCULO 1°: **APROBAR el Trabajo Final de Intensificación** de la Carrera de Ingeniería Agronómica, del alumno Becado del Programa de Intercambio y Movilidad Académica (PIMA), Sr. **Fidel Chunque Figueroa, DNI N° 44.446.856, Pasaporte N° 117.149.721**, titulado **Productividad de Biomasa Aérea de Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Derivada del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada”**, realizado bajo la dirección del Dr. José Luis Tiedemann y Co – Dirigido por la Dra. Ing. Agr. María Judith Ochoa, con la calificación de **Muy Bueno (9 – nueve)**.

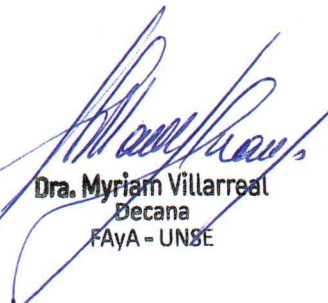
ARTÍCULO 2°: **COMUNICAR** y dar copia a Secretaría Académica de la UNSE. Notificar al Dr. Tiedemann, Dra. Ochoa y al Sr. Figueroa. Cumplido, archivar.

GNC/gnc.-
F:resfaa2018/888-18



Ing. I.A.A. Alejandra Genice
Secretaria
Vinculación, Tranf. y Extensión
FAyA - UNSE

P/Sec.Acad
FAyA



Dra. Myriam Villarreal
Decana
FAyA - UNSE

DEDICATORIA

- A Dios todo poderoso por darme vida y salud y acompañarme en mi camino para seguir cumpliendo mis objetivos.
- A mis padres por tenerlos en vida, por ser las personas más importantes que la vida me lo dio, sin su apoyo de ustedes no estaría en donde estoy ahora.
- A todos ustedes hermanos en vida. A ustedes hermanas que no les pude conocer pero yo sé que desde el cielo también cuidan de mí y también sienten una alegría por este pequeño y gran paso que doy.
- A ti hermano Jaime por uno de los que más me motivo para asumir este reto, por tus consejos y tu apoyo incondicional. A ti por estar a mi lado durante todos estos años en momentos buenos y difíciles.
- A mis compañeros y amigos presentes y pasados quienes sin esperar nada a cambio estuvieron ahí conmigo compartiendo sus conocimientos a todas esas personas que durante todo este tiempo estuvieron a mi lado apoyándome para lograr que este sueño se haga realidad.
- Nunca es grande aquel que nunca falla, si no aquel que nunca se da por vencido.

AGRADECIMIENTOS

- ✓ Siempre estoy agradecido con Dios por darme la vida y las oportunidades que él me los da en esta vida. A mis padres por tenerlos conmigo.
- ✓ A mis hermanos, amigos y familiares.
- ✓ A la coordinadora del programa PIMA Ingeniera Alejandra Cenice por su apoyo incondicional para mi estadía en Argentina.
- ✓ A mis compañeras en la materia SIG LECA Yesica y Silvia por compartir sus conocimientos.
- ✓ A la Facultad de Ingeniería en Ciencias Pecuarias de la Universidad Nacional De Cajamarca - Perú.
- ✓ A la Facultad de Agronomía y Agroindustrias por acogerme como a un alumno más en sus aulas de esta prestigiosa. Universidad Nacional Santiago Del Estero – Argentina.
- ✓ Al proyecto CICyT UNSE Cod 23B151 denominado – Productividad de primaria neta aérea de los sistemas pastoriles de alfalfa ((*Medicago sativa L*).
- ✓ A la cátedra SIG LECA FCF UNSE por aporte del *Field Scout* CM 1000 NDVI Meter
- ✓ A Don Ricardo Gómez productor de la agricultura familiar de Los Pereyra, Dpto Robles por su buena personalidad y brindarme su conocimiento en campo.
- ✓ Y un agradecimiento muy especial. A mis tutores Dr. José L. Tiedemann y Dra. Judith Ochoa por haberme guiado durante este proceso y darme la posibilidad de avanzar en mi formación profesional. Gracias por su ayuda y motivación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. HIPÓTESIS.....	19
3. OBJETIVOS.....	19
4. MATERIALES y METODOS	20
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
5.1. VALIDACIÓN DE LOS SUPUESTOS DE NORMALIDAD Y HOMOGENIDAD DE VARIANZA.....	30
5.2. PRODUCTIVIDAD DE BIOMASA FORRAJERA AÉREA.....	30
5.3. RELACIÓN NDVI – BIOMASA FORRAJERA AÉREA POR VARIEDAD....	31
5.4. MODELO LINEAL - Productividad G969 – NDVI.....	33
5.5. MODELO LINEAL - Productividad M901 – NDVI.....	34
5.6. PERFILES ESPACIALES NDVI ALFALFA	35
6. CONCLUSIONES.....	39
7. BIBLIOGRAFÍA.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del ensayo.....	20
Figura 2. Variedades de alfalfa implantadas.....	23
Figura 3. Muestreo y corte de biomasa forraje aérea del alfalfa.....	24
Figura 4. Pesaje de materia verde de muestra total y sub muestras.....	25
Figura 5. Secado de sub muestras de materia verde en horno microondas.....	26
Figura 6. Imagen del Sensor portátil <i>Field Scout CM 1000 NDVI Meter</i>	27
Figura 7. Mediciones de NDVI a 0° y 45° en variedades de alfalfa.....	28
Figura 8. Área de influencia del proyecto 23B151.Los Pereyra, Dpto. Robles.....	35
Figura 9. Corte de biomasa forrajera aérea del alfalfa testigo (T) en Los Pereyra Dpto. Robles.....	36

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Grafico 1. Precipitación y temperatura media mensual de Santiago del Estero.....	21
Grafico 2. Rendimiento en Toneladas ms de variedades de alfalfa.....	31
Grafico 3. Regresión Lineal simple PBA G969 y TI NDVI.....	33
Grafico 4. Regresión Lineal simple PBA 901 y NDVI 45°.....	34
Grafico 5. Perfil espacial del NDVI 0° de variedades G969, M901 y testigo (T).....	36
Grafico 6. Perfil espacial del NDVI 45° de variedades G969, M901 y testigo (T).....	37
Grafico 7. Perfil espacial del TI NDVI de variedades y testigo.....	38
Grafico 8. Perfil espacial de TN MS de variedades y testigo.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las variedades A) G969 y B) Magna 901.....	22
Tabla 2. Normalidad Shapiro -Wilks (modificado).....	30
Tabla 3. Prueba F para igualdad de varianzas.....	30
Tabla 4. Prueba T para muestras Independientes	30
Tabla 5. <i>Coficiente de Correlación de Pearson</i> : BFA G969 -NDVI.....	31
Tabla 6. <i>Coficiente de Correlación de Pearson</i> : BFA M901-NDVI.....	32
Tabla 7. Análisis de regresión lineal BFA G969 -NDVI.....	33
Tabla 8. Análisis de regresión lineal BFA M901-NDVI.....	34

RESUMEN

En el presente trabajo se cuantificó la productividad de biomasa forrajera aérea de un corte de las variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L) G969 (2.8 tn ms ha⁻¹) y Magna 901 (3.06 tn ms ha⁻¹). Mediante la prueba de T para muestras independientes se determinó que no hay diferencias significativas en la productividad entre variedades (T 0.99; p= 0.33). La productividad de un corte de las variedades analizadas es consistente y toma valores similares a la evaluación de las variedades comerciales del mismo grupo distribuidas en el área de riego del Río Dulce de Santiago del Estero.

La productividad (tn ms ha⁻¹) de ambas variedades fue relacionada con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, tomado en relación a las disposición espacial de las alfalfas a 0° (NDVI 0°), 45° (NDVI 45°) y su integración temporal (TI NDVI). Se encontraron fuertes y significativas relaciones inversas entre la productividad de la G968 y el TI NDVI (r -0.73; p 0.04) y fuertes y significativas relaciones directas entre la productividad de la M901 y el NDVI 45° (r 0.73; p 0.04). En base a estas relaciones fueron generados dos modelos lineales de productividad-NDVI para cada variedad. Los modelos son los siguientes: Tn ms ha⁻¹ (G969) = -2.85 * TI NDVI + 7.09 (R² 0.53; R²Aj 0.45; p 0.03) y Tn ms ha⁻¹ (M901) = 4.67 * NDVI 45° - 1.05 (R² 0.53; R²Aj 0.45; p 0.04). En base a estos resultados, la productividad de biomasa forrajera aérea de alfalfa puede ser estimada y modelada mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada – NDVI.

Mediante perfiles espaciales fue comparado el comportamiento, productivo (BFA) y espectral (NDVI 0°, NDVI 45° y TI NDVI) de las variedades G969, M901 con una pastura de alfalfa testigo (T) a campo. La variedad T tuvo un mayor valor de NDVI 0° y productividad de BFA que las variedades G969 y M901. Mientras que en la comparación de variación del NDVI 45° y TI NDVI la variedad M901 fue la que tuvo mayor valor con

respecto a las otras dos variedades. Los valores de NDVI de las pasturas de alfalfa fueron moderadamente afectados por la distribución espacial del follaje, siendo el NDVI 45° el más afectado por el efecto suelo.

1. INTRODUCCIÓN

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es la principal especie forrajera del país y la base de la producción de carne y leche en la Región Pampeana. La difusión del cultivo se apoya en sus altos rendimientos de materia seca ha-1, su excelente calidad forrajera y su gran adaptabilidad a diversas condiciones ambientales (suelo, clima y manejo). Por otro lado, tiene una gran capacidad para la fijación del Nitrógeno atmosférico (Bacigalup, 2007).

Santiago del Estero ha sido por tradición productora de alfalfa, debido a las condiciones Semiáridas que caracterizan climáticamente a la provincia y a las necesidades de agua del cultivo, la superficie implantada de alfalfa se concentra principalmente en las zonas de Riego. A partir de datos obtenidos por distintas fuentes, se estimó que la superficie actual implantada en la provincia es de aproximadamente 37.600 ha, siendo los distritos Fernández y San Martín, son los más importantes en superficie cultivada de alfalfa (Cornacchione, 2015).

Las características espectrales de la vegetación verde captadas por sensores remotos y cercanos, que oscila en las regiones del espectro solar entre 0,4 μm y 2,5 μm , posibilita inferir propiedades biofísicas de la vegetación verde, como contenido de pigmentos presentes en la planta, densidad del follaje proyectado y contenido de agua en el follaje (Tucker, 1979). Las relaciones entre dos o más regiones del espectro, en especial la roja e infrarroja, son ampliamente conocidas como Índices de Vegetación (Bannari et al., 1995).

El primero en reportar un Índice de Vegetación fue Jordan (1969) quien utilizó la simple relación NIR/R (0,800 μm /0,675 μm) para estimar biomasa e índices de área foliar de bosques tropicales. Posteriormente Pearson & Miller (1972) desarrollaron un espectrómetro de mano para estimar biomasa de pasturas, ellos utilizaron el índice RVI

(*Ratio Vegetation Index*) de baja sensibilidad a las condiciones de iluminación, pero alta sensibilidad a las propiedades ópticas del suelo. Entre los índices más difundidos de este tipo se encuentra el *Ratio Vegetation Index* (Rouse *et al.*, 1974) y el *Transformed Vegetation Index* (Deering *et al.*, 1975), entre otros.

El Índice de Vegetación más utilizado para el monitoreo de vegetación fue el desarrollado por Rouse *et al.* (1974) y es ampliamente conocido como Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada – NDVI. Este índice fue utilizado para determinar el índice de área foliar (Tucker & Sellers, 1986), la radiación fotosintéticamente activa absorbida a nivel global (Dye & Goward, 1993) y la tasa fotosintética y concentración de clorofila (Tucker, 1979). En su relación con los parámetros físicos, el NDVI fue utilizado para el monitoreo y comportamiento de la vegetación ante las fluctuaciones climáticas a escala global (Townshend *et al.*, 1985; Kogan, 2001), continental (Tucker *et al.*, 1985; Justice *et al.*, 1985) y regional (Ravelo & Rotondo, 1987; Nicholson *et al.*, 1990; Wang *et al.*, 2003). Así mismo, fue utilizado para la detección temprana, monitoreo y valoración de sequías (Tucker & Choudhury, 1987; Ravelo, 2000; Ji & Peters, 2003; Ravelo & Pascale, 2004). La gran utilidad del NDVI para el monitoreo de sequías y sus relaciones con las precipitaciones se debe a la estrecha relación que existe entre el vigor de la vegetación verde y la disponibilidad de humedad del suelo, especialmente en zonas áridas y semiáridas (Tucker *et al.*, 1985; Nicholson *et al.*, 1990; Ji & Peters, 2003).

A nivel local, mediante series temporales de NDVI derivado del sensor VEGETATION, Tiedemann (2011) y Zerda & Tiedemann (2010) determinaron la dinámica espacial y temporal del NDVI del bosque y pastizal natural en la Provincia de Santiago del Estero, Argentina.

La productividad primaria neta terrestre es la integración temporal del incremento positivo de biomasa de la vegetación terrestre por unidad de superficie y tiempo (Field et al., 1995; Fensholt et al., 2006). Representa el nuevo carbono fijado como biomasa en tallos, hojas y raíces de todas las plantas en el ecosistema (Fensholt et al., 2006).

La estrecha relación lineal existente entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (Asrar et al., 1984; Goetz & Prince, 1996) posibilitó el uso de los Índices de Vegetación como potenciales indicadores de la productividad fotosintética a diferentes escalas (Nouvellon et al., 2000). La relación entre la Producción de Biomasa Aérea (PBA) y el NDVI se realizó a través del modelo empírico de Monteith (1977) basado en la eficiencia en el uso de la energía (Nouvellon et al., 2000; Fensholt., 2003). Al respecto, fueron desarrollados una gran cantidad de trabajos, como el de Field et al. (1995) quienes propusieron un simple modelo de Productividad Primaria Neta Global, combinando principios ecológicos con datos derivados de satélites para estimar la productividad global. Los autores se basaron en la amplia relación existente entre los principios ecológicos, los recursos climáticos, las características de las especies y la PPN.

Tiedemann (2015) mediante NDVI MODIS y con el fin de aportar información local sobre la dinámica estacional y la respuesta ante estrés ambiental de los sistemas pastoriles del Dpto. Moreno, Santiago del Estero, Argentina, determinó los parámetros fenológicos, modeló las estaciones de crecimiento, cuantificó la productividad primaria neta aérea de los sistemas pastoriles de *Panicum maximum* y relacionó su respuesta con anomalías de la precipitación media en el período 2008-2014.

La disponibilidad de información local derivada del NDVI, obtenidos mediante sensores remotos y cercanos, procesados e integrados mediante sistemas de información geográfica, sumado a la disponibilidad de información de rendimientos que puede ser

cotejada con los resultados de la red de cultivares de INTA, el presente trabajo se convierten en una invaluable herramienta para monitoreo de productividad de forrajeras a nivel local a diferentes escalas espaciales y temporales. Adicionalmente, los resultados obtenidos en este trabajo facilitaran la toma de decisiones, fundamentalmente para ajustar cargas o presiones de pastoreo o confección estratégica de reservas forrajeras. En base a lo antes expuesto, se formula la hipótesis de trabajo y objetivos específicos.

2. HIPÓTESIS

- La productividad de biomasa aérea de alfalfa (*Medicago sativa* L.) puede ser estimada mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada derivado de sensores cercanos.

3. OBJETIVOS

- Cuantificar la productividad de biomasa aérea de dos variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.)
- Relacionar y modelar la productividad de biomasa aérea con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
- Comparar mediante perfiles espaciales, el comportamiento, productivo y espectral (NDVI) de las variedades de alfalfa del ensayo con una pastura de alfalfa testigo (T) de Los Pereyra, Dpto. Robles

4. MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se desarrolló en el marco del proyecto denominado – “Productividad primaria neta aérea de los sistemas pastoriles de alfalfa (*Medicago sativa* L.) De predios de la agricultura familiar de Los Pereyra, Dpto. Robles y su relación con Índices de Vegetación derivados de sensores remotos y cercanos” (COD 23B151 CICyT FCF UNSE). Las pasturas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) fueron implantadas en el Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques, de la Facultad de Ciencias Forestales, UNSE, ubicado en el Zanjón, Dpto. Capital, Provincia de Santiago del Estero, Argentina (Figura 1).



Figura 1. Facultad de Ciencias Forestales, Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques y ubicación del ensayo (círculo rojo). Fuente: *Google Earth*

La precipitación media en la Provincia de Santiago del Estero es de 550 mm, la evapotranspiración anual se ubica entre los 900-1.100 mm, con déficit hídrico todo el año. La temperatura media anual es de 27.7°C, (Boletta, 2006) (Grafico 1).

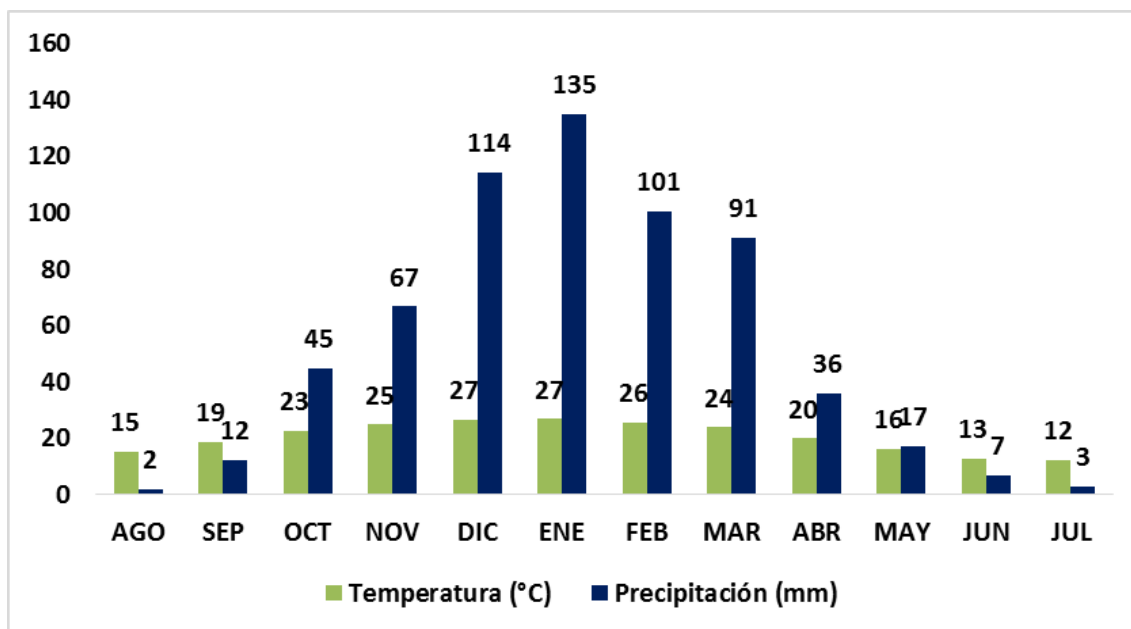


Grafico 1. Precipitación y temperatura media mensual de Santiago del Estero.

Fuente SMN, 2018.

El tipo de suelo donde fueron implantadas las pasturas (Zanjón) es provisto de materia orgánica, no salino y ligeramente sódico en profundidad, el perfil se ha desarrollado sobre sedimentos fluviales de textura franco arenosa, con horizontes A1, AC, C1 y IIC (Angueira, 2015).

El ensayo comprende dos variedades comerciales del grupo de latencia invernal nueve: A) GAPP 969 y B) MAGNA 901. Las características de las variedades utilizadas se presentan en la Tabla 1, la información está disponible en las páginas de los semilleros.

<p style="text-align: center;">GAPP 969 http://www.gapp.com.ar</p>	<p style="text-align: center;">MAGNA 901 https://www.forrattec.com.ar</p>
<ul style="list-style-type: none"> -Alfalfa del grupo sin latencia (9) de alto rendimiento forrajero -Gran adaptación a las cuencas lecheras de Santa Fe y Córdoba. -Variedad de mejor comportamiento para el norte de la región pampeana. -Excelente perfil fitosanitario. -Semilla tratada con STP (Sistema Tecnológico de Protección). - Porte de planta. Erecto - Corona. Amplia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alfalfa del grupo sin latencia (9) - Alto rendimiento y calidad forrajera - Alfalfa agresiva de muy alto rendimiento - Seleccionada bajo severa presión de enfermedades y nematodos - Persistente en suelos pesados - Porte de la planta. Erecto hoja ancha. - Corona. Baja y alta.

Las variedades fueron implantadas al voleo en la primera quincena de abril de 2018 en parcelas de 18 m² por variedad, logrando una densidad de plantas efectivas de 400 pl m² variedad⁻¹ (Figura 2). Las parcelas fueron fertilizadas previo a la siembra con 50 kg de DAP (18-46-0), e irrigadas artificialmente para la siembra. Se efectuaron riegos mensuales (~50 mm riego-1).



Figura 2. Variedades de alfalfa implantadas. Izq. G969 y Der. M901

De cada parcela se obtuvieron, mediante muestreo aleatorio simple, 8 muestras de biomasa forrajera aérea verde de 1m^2 (Figura 3). Los cortes fueron realizados entre los estados fenológicos de prefloración a 1% de floración, a una altura superior a los 10 cm del suelo preservando brotes basales (Gardner, 1974).



Figura 3. Muestreo y corte de biomasa forrajera aérea de la alfalfa

La biomasa forrajera verde de cada variedad fue pesada y de cada una de ellas se extrajo una sub muestra de ~50 gr para determinar la biomasa forrajera seca (Figura 4).



Figura 4. Pesaje de materia verde de la muestra total (arriba) y pesaje de sub muestras (abajo)

El porcentaje de humedad fue determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ HUM} = [(PV - PS)/PV] \times 100. \quad (\text{Gardner, 1974}).$$

Mientras que el porcentaje de materia seca mediante la ecuación $\% \text{ MS} = 100 - \% \text{ HUM}$

Las sub muestras de materia verde fueron secadas en horno microondas mediante la metodología desarrollada por Crespo *et al.* (2007) (Figura 5). La materia seca fue expresada en toneladas por hectárea.



Figura 5. Secado de sub muestras de materia verde en horno microondas

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada – NDVI, desarrollado por Rouse *et al.* (1973) se derivó de la siguiente manera:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Siendo NIR ($\lambda \mu\text{NIR} = 0,725 \mu\text{m} - 1,1 \mu\text{m}$) la fracción Infrarroja cercana y Red ($\lambda \text{RED} = 0,58 \mu\text{m} - 0,68 \mu\text{m}$) la fracción Roja del espectro electromagnético. El NDVI fue obtenido mediante el sensor portátil *Field Scout CM 1000 NDVI Meter (Spectrum*

Technologies Inc), los valores del NDVI oscilan en el rango de 0 y 1, siendo cero suelo desnudo y 1 vegetación verde (Figura 7).



Figura 6. Imagen del sensor portátil *Field Scout CM 1000 NDVI Meter*.

Equipo perteneciente a la Cátedra SIG LECA FCF UNSE

Se realizaron tres mediciones de NDVI m² en cada repetición de alfalfa variedad⁻¹ (Figura 7), cada quince días, mediante muestreo aleatorio simple, a 1 m de distancia del follaje, a 0° y 45° de inclinación, al medio día solar y en día libre de nubes (Baret & Guyot, 1991). Los valores de NDVI m² de cada variedad de alfalfa fueron promediados y temporalmente integrados. En las mediciones del NDVI a 45°, se obtuvo un porcentaje de valores significativamente bajos (Ej. NDVI 45° 0.16), por cuanto se tomó como parámetros de referencia el valor medio de NDVI del suelo húmedo y seco o línea de suelo, dando un valor de NDVI = 0.30. Los valores inferiores a la línea de suelo no fueron considerados en los análisis.



Figura 7. Mediciones de NDVI a 0° y 45° en variedades de alfalfa del ensayo (arriba) y alfalfa testigo T en Los Pereyra (abajo).

La producción de biomasa aérea (PBA) de las variedades, fue temporalmente integrada y expresada en toneladas de materia seca por hectárea (tn ms ha^{-1}). La comparación de medias (esperanzas) de productividad entre variedades (distribuciones) fue evaluada mediante la prueba de T para muestras independientes (Balzarini *et al.*, 2008).

En donde $H_0: E(X_1) = E(X_2)$; versus $H_1: E(X_1) \neq E(X_2)$

Se verificaron los supuestos de normalidad mediante Shapiro-Wilks (modificado) y la prueba de F para igualdad de varianzas (Balzarini *et al.*, 2008).

La PBA fue relacionada con el NDVI medio/ m^2 mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r). El modelo de regresión lineal simple ($\alpha 0.05$) utilizado para la observación del tratamiento i en la parcela j , es $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon$ donde Y_{ij} son las observaciones del tratamiento i en la parcela j ; τ_i es el efecto del tratamiento i y ε el término de error aleatorio asociado a la observación Y_{ij} . La variable dependiente (y) es la PBA acumulada de cada variedad y la regresora (x) el NDVI medio/ m^2 . Los modelos lineales fueron evaluados en base al mejor ajuste del coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Aj}) y mediante gráficos de dispersión (residuos vs. predichos) (Balzarini *et al.*, 2008)

Las pasturas de alfalfa implantadas en Los Pereyra, Dpto. Robles fueron identificadas a partir del conocimiento previo de la zona y seleccionadas mediante mapas de NDVI derivados del sensor Sentinel 2 (*Earth Observing Systems – NASA*). Los perfiles espaciales de NDVI medio/ m^2 fueron generados de manera similar a las del ensayo.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. VALIDACIÓN DE LOS SUPUESTOS DE NORMALIDAD Y HOMOGENEIDAD DE VARIANZA

Tabla 2. Normalidad Shapiro-Wilks (modificado)

Variabes	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
RDUO_Tn ms ha	16	0.00	0.50	0.96	0.7666
RDUO_TI NDVI	16	0.00	0.10	0.92	0.3514
RDUO_NDVI 0°	16	0.00	0.01	0.90	0.1500
RDUO_NDVI 45°	16	0.00	0.10	0.92	0.3190

En estos casos no hay evidencias para rechazar el supuesto de distribución normal ($p > 0.05$).

Tabla 3. Prueba de F para igualdad de varianzas

Variable	Grupo(1)	Grupo(2)	n(1)	n(2)	Var(1)	Var(2)	F	p	prueba
Tn ms ha	{901}	{G969}	8	8	0.33	0.21	1.53	0.5860	Bilateral
TI NDVI	{901}	{G969}	8	8	0.01	0.01	0.62	0.5472	Bilateral
NDVI 0°	{901}	{G969}	8	8	9.8E-05	3.4E-04	0.29	0.1212	Bilateral
NDVI 45°	{901}	{G969}	8	8	0.01	0.01	0.57	0.4761	Bilateral

Los valores ($p > 0.05$) indica que se acepta la hipótesis de homogeneidad de varianzas

5.2. PRODUCTIVIDAD DE BIOMASA FORRAJERA AÉREA

Tabla 4. Prueba T para muestras Independientes

Variable	G1	G2	n(1)	n(2)	Media (1)	Media (2)	T	p-valor	prueba
Tn ms ha	{M901}	{G969}	8	8	3.06	2.80	0.99	0.3378	Bilateral

De la prueba de T se determina que no hay diferencias en la productividad de biomasa aérea (tn ms ha⁻¹) entre variedades ($p > 0.05$). La media de la variedad Magna 901 es de 3.06 tn ms ha⁻¹, mientras que la G969 de 2,8 tn ms ha⁻¹.

En el gráfico 2, las barras oscuras son los rendimientos obtenidos de las dos variedades de alfalfa en el ensayo, mientras que las barras claras son rendimientos de

alfalfas (de similares características a las del ensayo) obtenidos por la red de cultivares EEA INTA SDE 2016-2017. Los rendimientos de las variedades G969 y M901 se encuentran dentro de los valores normales al resto de las alfalfas implantadas en el área de riego de SDE.

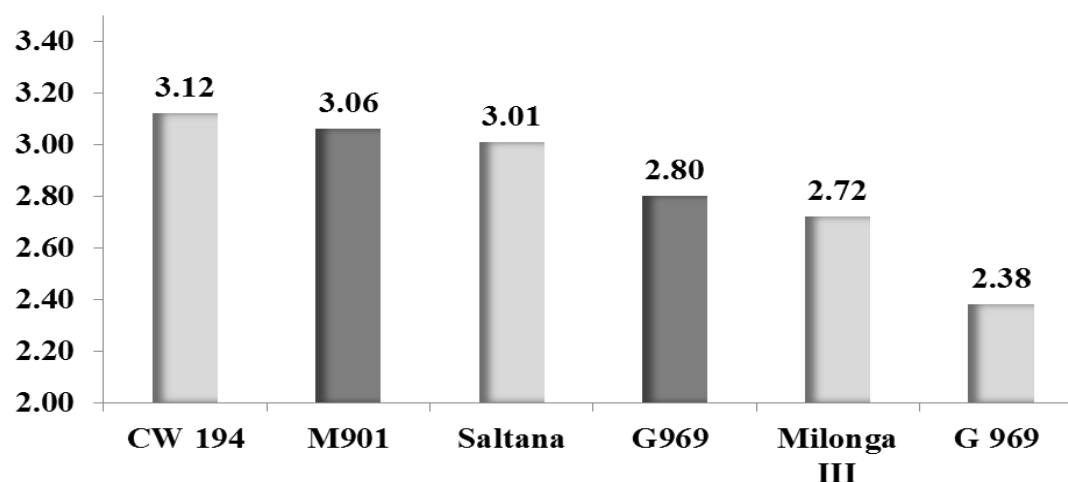


Grafico 2. Rendimiento en toneladas de materia seca de variedades de alfalfa (Grupo 9).

Fuente: Red de cultivares EEA INTA SDE 2016-2017

5.3. RELACIÓN NDVI – BIOMASA FORRAJERA AÉREA POR VARIEDAD

Tabla 5. *Correlación de Pearson: VARIEDAD G969 - NDVI*

	Tn 969	969 NDVI 0°	969 NDVI 45°	TI NDVI 969
Tn 969	1.00	0.28	0.05	0.04
969 NDVI 0°	0.44	1.00	0.57	0.79
969 NDVI 45°	-0.70	-0.24	1.00	2.1E-05
TI NDVI 969	-0.73	-0.11	0.98	1.00

En la Tabla 5, se observa fuerte (-0.73) y significativa ($p < 0.05$) relación inversa entre el TI NDVI y la BFA de la G969.

Tabla 6. Correlación de Pearson: *VARIEDAD M901 - NDVI*

	Tn 901	901 NDVI 0°	901 NDVI 45°	TI NDVI 901
Tn 901	1.00	0.97	0.04	0.06
901 NDVI 0°	-0.01	1.00	0.41	0.29
901 NDVI 45°	0.73	0.34	1.00	3.5E-07
TI NDVI 901	0.68	0.43	0.99	1.00

En la Tabla 6, se observa fuerte (0.73) y significativa ($p < 0.05$) relación directa entre el NDVI 45° y la BFA de la M901.

Similares resultados obtuvo Tiedemann (2018) quien relacionó la productividad de biomasa forrajera aérea de alfalfa cv G969 (*Medicago sativa L*) con datos de reflectancia superficial derivados de sensores *reflex*, encontrando significativas relaciones inversas entre la productividad de biomasa forrajera aérea (tn ms ha^{-1}) y la banda Roja ($r = 0.91$; $R^2_{Aj} = 0.81$; $p < 0.01$).

La estrecha relación lineal existente entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (Asrar *et al.*, 1984; Goetz & Prince, 1996) posibilitó el uso de los Índices de Vegetación como potenciales indicadores de la productividad fotosintética a diferentes escalas (Nouvellon *et al.*, 2000). La relación entre la Producción de Biomasa Aérea (PBA) y el NDVI se realizó a través del modelo empírico de Monteith (1977) basado en la eficiencia en el uso de la energía (Nouvellon *et al.*, 2000; Fensholt., 2003).

5.4. MODELO LINEAL - Productividad G969 - NDVI

Considerando las mejores relaciones entre BFA y NDVI de cada variedad fueron generados modelos lineales.

Tabla 7. Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² _{Aj}	ECMP	AIC	BIC
Tn 969	8	0.53	0.45	0.18	9.16	9.39

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.79	1	0.79	6.84	0.0398
TI NDVI	0.79	1	0.79	6.84	0.0398
Error	0.69	6	0.12		
Total	1.49	7			

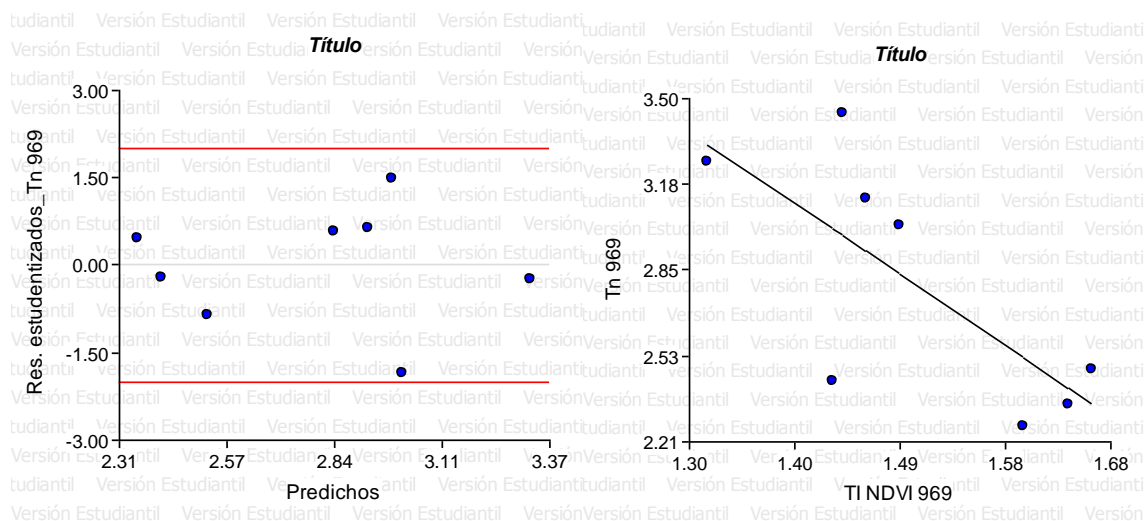


Gráfico 3. Análisis de regresión Lineal simple entre PBA G969 y TI NDVI

El modelo lineal obtenido entre BFA G969 y NDVI presenta un buen poder explicativo, con un $R^2 = 0.53$ ($p = 0.03$). Los residuos estudentizados vs predichos (Gráfico 3, izq) presentan patrones aleatorios confirmando el ajuste del modelo obtenido.

La productividad de BFA de la variedad GAPP 969 derivado de NDVI es el siguiente:

$$Tn \text{ ms ha}^{-1} \text{ G969} = -2.85 * TI \text{ NDVI} + 7.09$$

5.5. MODELO LINEAL - Productividad M901 - NDVI

Tabla 8. Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² _{Aj}	ECMP	AIC	BIC
Tn 901	8	0.53	0.45	0.33	12.68	12.91

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1.20	1	1.20	6.69	0.0414
NDVI 45°	1.20	1	1.20	6.69	0.0414
Error	1.08	6	0.18		
Total	2.28	7			

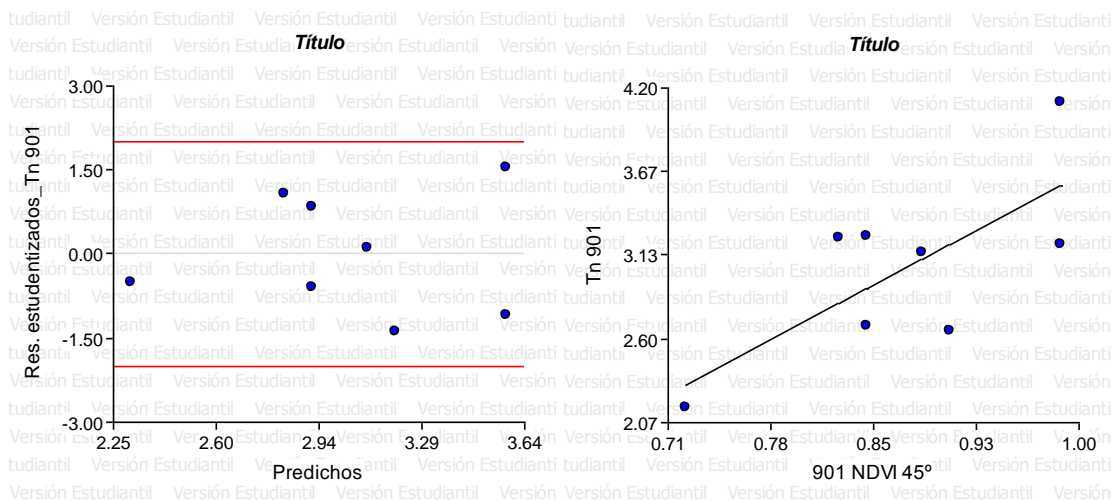


Gráfico 4. Análisis de regresión Lineal simple entre PBA 901 y NDVI 45°

El modelo lineal obtenido entre BFA M901 y NDVI presenta un buen poder explicativo, con un R² = 0.53 (p= 0.04). Los residuos estudentizados vs predichos

(Grafico 4, izq) presentan patrones aleatorios confirmando el ajuste del modelo obtenido. La productividad de BFA de la variedad Magna 901 derivado de NDVI es el siguiente:

$$Tn \text{ ms ha}^{-1} \text{ M901} = 4.67 * \text{NDVI } 45^\circ - 1.05$$

5.6. PERFILES ESPACIALES DE NDVI PASTURAS ALFALFA DE LOS PEREYRA

Mediante perfiles espaciales fue comparado el comportamiento, productivo (BFA) y espectral (NDVI 0°, NDVI 45° y TINDVI) de las variedades G969, M901 con una pastura de alfalfa testigo (T) a campo.



Figura 8. Área de influencia del proyecto 23B151. Los Pereyra, Dpto. Robles. Distribución espacial NDVI derivada del sensor Sentinel 2 del 16.08.18. Pastura de Alfalfa de 1° año seleccionada para muestreo a campo (círculo Rojo). Fuente: Cátedra de Forrajes FCN UNSa



Figura 9. Corte de biomasa forrajera aérea de la alfalfa testigo (T) Los Pereyra, Dpto. Robles.

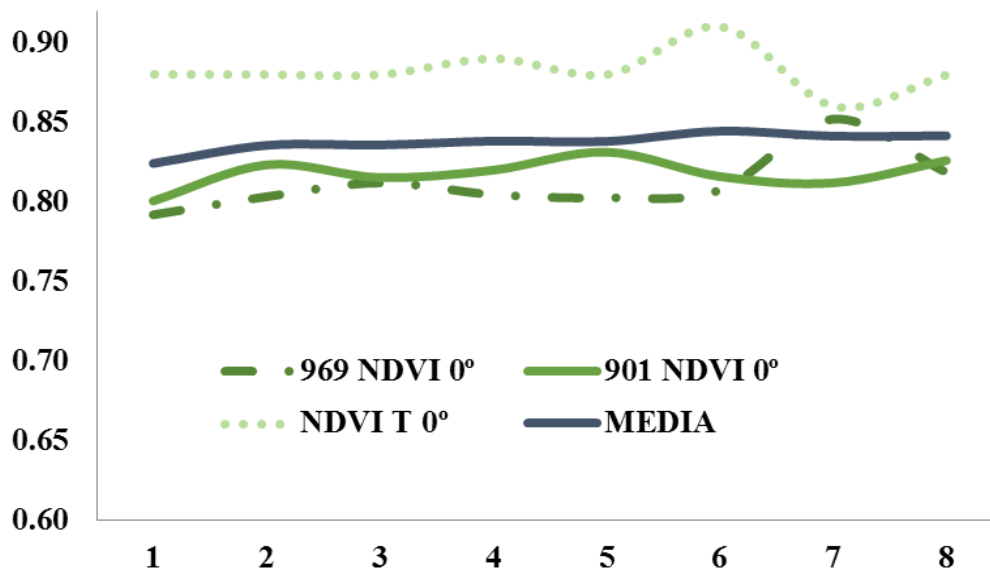


Grafico 5. Perfil espacial del NDVI 0° de variedades G969, M901 y testigo (T), Los Pereyra.

En el gráfico 5, se observa que la variación espacial del NDVI 0° fue superior el de la variedad T con respecto al promedio y a los valores de las variedades G969 y M901.

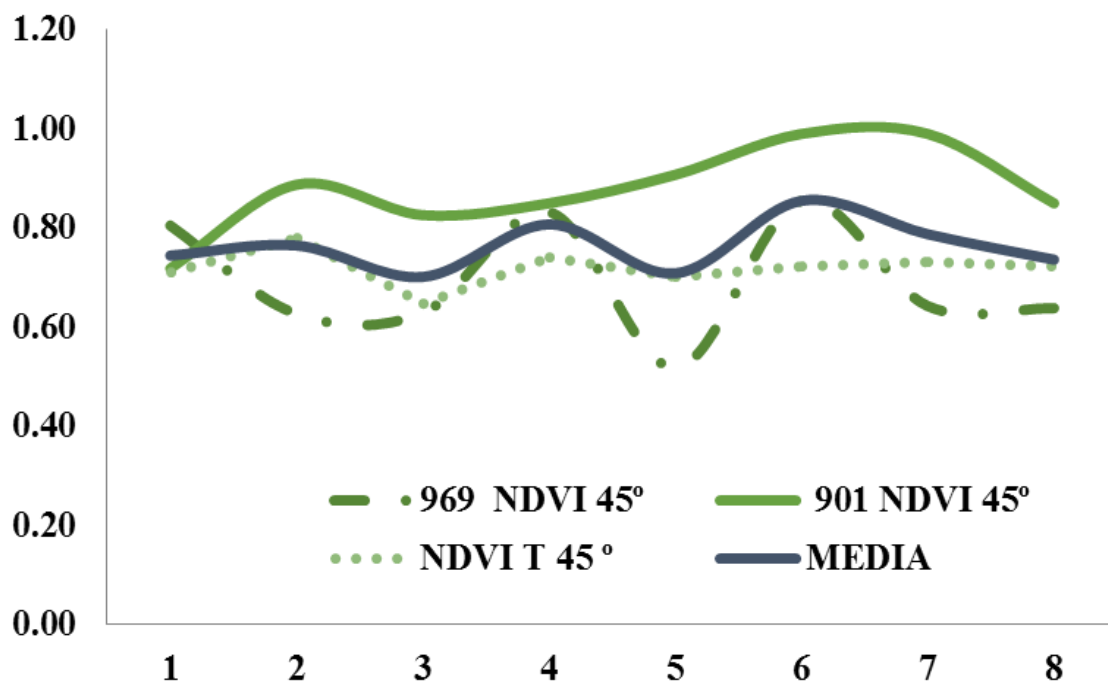


Grafico 6. Perfil espacial del NDVI 45° de variedades G969, M901 y testigo (T), Los Pereyra.

En el Grafico 6, se observa que la variación espacial del NDVI 45° fue superior el de la variedad M901 con respecto al promedio y a los valores de las variedades G969 y T.

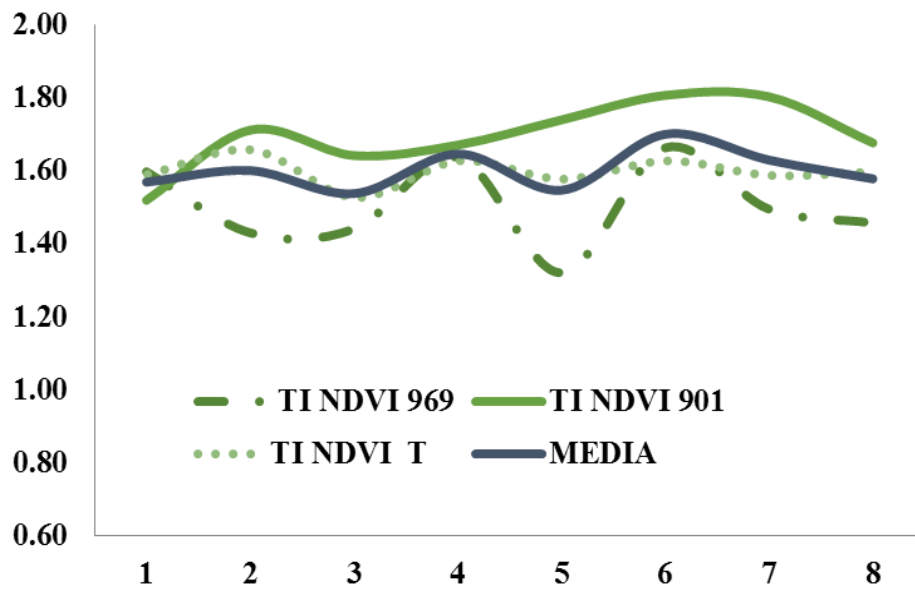


Gráfico 7. Perfil temporal del TINDVI de variedades y testigo de Los Pereyra.

En el Grafico 7, se observa que la variación espacial del TI NDVI fue superior el de la variedad M901 con respecto al promedio y a los valores de las variedades G969 y T.

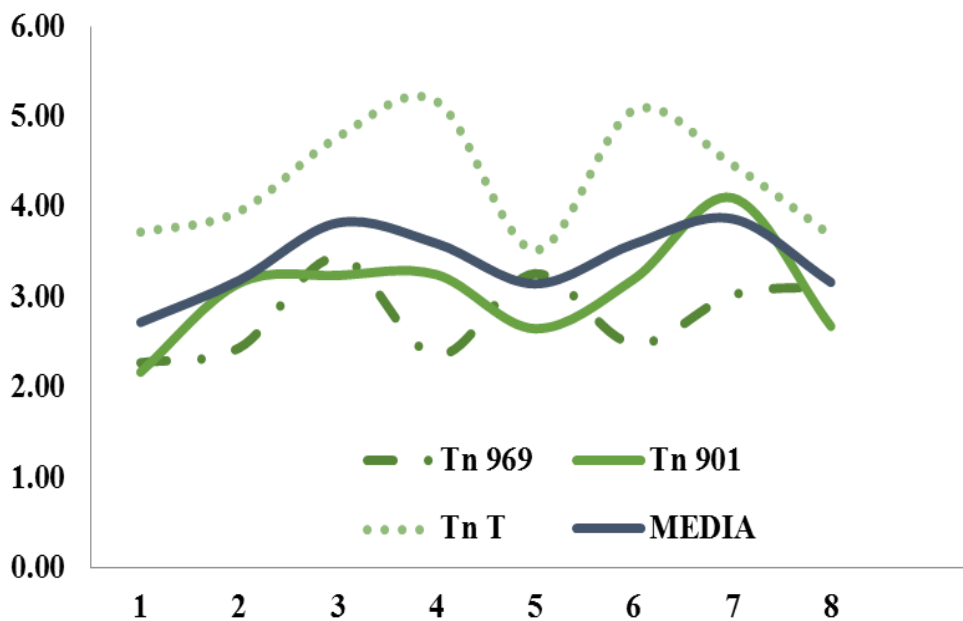


Grafico 8. Perfil temporal de TN MS de variedades y testigo de Los Pereyra.

En el Grafico 8, se observa que la variación espacial de la producción de BFA fue superior el de la variedad T con respecto al promedio y a los valores de las variedades G969 y M901. La mayor productividad de la variedad T se debe a que la misma estaba en un estado fenológico (5% floración) con respecto a las variedades G969 y M901.

6. CONCLUSIONES

- La productividad de un corte de las variedades analizadas es similar al resto de las variedades comerciales del mismo grupo distribuidas en el área de riego del Río Dulce de Santiago del Estero.
- La productividad de biomasa forrajera aérea de alfalfa puede ser estimada y modelada mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - NDVI
- Los valores de NDVI de las pasturas de alfalfa son afectados por la distribución espacial del follaje, siendo el de 45° el más afectado por el efecto *suelo*.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Asrar G.; Funchs M.; Kanemasu E.T. & Hatfield J.L. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76:300-306.
- Angueira C. 2015. Relevamiento de suelos utilizando las nuevas técnicas de Geomática: UN caso en Santiago del Estero, Argentina. Tesis Doctoral. Ed: Universidad de Córdoba, España, 335p.
- Bacigalup D. H. 2007. Panorama actual de la alfalfa en la Argentina. EEA Manfredi-INTA.R. Rossanigo. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/tesis_doctoral_ariel_odorizzi.pdf
- Balzarini M. G; Gonzalez L; Tablada M; Casanoves F; Di Rienzo J.A; Robledo C.W. 2008. Manual Del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Baret, F. & Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sensing of Environment*, 35: 161-173
- Bannari A., Morin D. & Bonn F. 1995. A Review of Vegetation indices. *Remote Sensing Review*, 13:95-120.
- Boletta P., Ravelo C.A., Planchuelo A.M. & Grilli M. 2006. Assessing deforestation in the Argentine Chaco. *Forest Ecology and Management* 228:108–114.
- Cornacchione M. 2015. Alfalfa en Santiago del Estero. Cuánto hay y dónde está. INTA EEASE Convenio de Cooperación técnica INTA-Ministerio de Producción, Recursos Naturales, Forestación y Tierras de Santiago del Estero. Disponible en <https://inta.gob.ar/personas/cornacchione.monica>
- Cornacchione M & Mijoevich L. 2014. Avances en alfalfa. CABA: INTA. Consultado el 10 de febrero de 2018. Disponible en <https://inta.gob.ar/documentos/directorio-de-avances-en-alfalfa>
- Crespo J. R; Castaño J. A y Capurro J.A. 2007. Secado de forraje con el horno microondas: Efecto del secado sobre el analisis de calidad. *Agricultura Técnica*: 67:210-218.
- Deering D. W., Rouse J. W., Haas R. H., & Schell J. A. 1975. Measuring “Forage Production” of Grazing Units From Landsat MSS Data, *Proceedings of 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, II, 1969-1178.
- Di Rienzo J. A., Casanoves F., Balzarini M. G., Gonzalez L., Tablada M. & Robledo C. W. 2008.

- Eastman R. J. 2006. Guide to GIS and Image Processing Idrisi Andes. Clark Labs, Clark University, USA, 328 pp.
- Goetz S. J., Prince S. D., Goward S. N., Thawley M. M., Small J. & Johnston A. 1999. Mapping net primary production and related biophysical variables with remote sensing: Application to the BOREAS region. *J. Geophys. Res.*, 104(D22), 7719–27734, doi: 10.1029/1999JD900269.
- Eastman R. J. 2006. Guide to GIS and Image Processing Idrisi Andes. Clark Labs, Clark University, USA, 328 pp.
- Fensholt R. 2003. Assessment of Primary Production in Semi-arid Environment from Satellite Data. Exploiting capabilities of new sensors. Ph. D. dissertation, Institute of Geography, University of Copenhagen, Copenhagen K, Denmark, 87p.
- Fensholt R., Sandholt I., Rasmussen M., Stisen S. & Diouf A. 2006. Evaluation of satellite based primary production modelling in the semiarid Sahel, *Remote Sensing of Environment*. 105:173–188.
- Field C. B., Randerson J. T. & Malmstrijk C. M. 1995. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing. *Remote Sensing Environment*. 51: 74-88.
- Gardner A. L. 1974. Producción y utilización de pasturas. En: curso de producción animal para extensionistas, INTA Balcarce. Ed. GARDNER A. L. Proyecto FAO ARG 527, EERA INTA Balcarce, 162pp.
- Ji L. & Peters J. A. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment* 87:85-98.
- Cornacchione. INTA EEASE Convenio de Cooperación técnica INTA-Ministerio de Producción, Recursos Naturales, Forestación y Tierras de Santiago del Estero.1. Alfalfa en Santiago del Estero. Cuánto hay y dónde está. Octubre 2015
- Jordan C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor, *Ecology* 50:663-
- Nicholson S. E., Davenport L. M., & Malo A. R. 1990. A comparison of the vegetation response to rainfall in the Shael and East Africa, using Normalized Difference Vegetation Index from NOAA AVHRR, *Climatic Change* 17:209- 241.
- Monteith J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 281:277-294.

- Nouvellon Y., Seen D. L., Rambal S., Begé A., Moran M., Kerr Y. & Qi J. 2000. Time Course of Radiation Use Efficiency in a Shortgrass Ecosystem: Consequences for Remotely Sensed Estimation of Primary Production. *Remote Sens. Environ.* 71:43–55.
- Pearson R. L. & Miller L. D. 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, Mich, 1357-1381.
- Qui, J., Chehbouni, A. L., Huete, A. R., Kerr, Y. H. & Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI), *Remote Sensing of Environment*, 48: 119-126.
- Ravelo C. A. y Rotondo V. H. 1987. Variabilidad de las sequías en regiones semiáridas y húmedas. *Actas de las 1ras Jornadas Nac. De Zonas Áridas y Semiáridas. Univ. Nac. De Santiago del Estero.*
- Ravelo C. A. 2000. Caracterización agroclimática de las sequías extremas en la Región Pampeana Argentina. *Rev. Fac. De Agronomía*, 20:187-192.
- Ravelo C. A. y Pascale A. J. 2004. Identificación de ocurrencia de sequías mediante imágenes del satélite NOAA e información terrestre. *Rev. Fac. De Agronomía* 17:105-107.
- Richardson, A. J. & Wiegand, C. L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43, 1541-1552.
- Rouse, J. W., R. W. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, & J. C. Harlan. 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation. NASA/GSFCT Type III Final report, Greenbelt, MD, USA.
- Tiedemann J. L. 2011. Dinámica espacial y temporal Del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Santiago del Estero. Tesis Doctoral, Escuela de Graduados Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 157p.
- Tiedemann J. L. 2015. Fenología y productividad primaria neta aérea de sistemas pastoriles de *Panicum maximum* en el Dpto. Moreno, Santiago del Estero, Argentina, derivada Del NDVI MODIS. *Ecol. apl.* 14: 27-39.

- Tiedemann J. L. 2018. Productividad de biomasa forrajera aérea integrada de alfalfa (*Medicago sativa L*) y sensores cercanos. XIII Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de Ingeniería del NOA. 13-14 Sep, SDE.
- Townshend J.R.G., Goff E. T. and Tucker J. C. 1985. Multitemporal Dimensionality of Images of Normalized Difference Vegetation Index at Continental Scales. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-23, No 6.
- Tucker, C J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation Remote Sens Environ 8:127-150
- Tucker J.C., Townshend J.R.G, & Goff E.T. 1985. African land-cover classification Using Satellite Data. Science, 227:369-375.
- Tucker J. C & Sellers P. J. 1986. Satellite remote sensing of primary production. Int. J. Remote Sensing, 11:1395-1416.
- Tucker J. C & Choudhury J. B. 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. Remote Sensing of Environment 23: 243-251.
- Zerda H. R. & Tiedemann J.L. 2010. Dinámica temporal del NDVI del bosque y pastizal natural en el Chaco Seco de la Provincia de Santiago del Estero, Argentina. *Ambiência*, 6:13-24.