

Universidad Nacional Experimental  
de los Llanos Occidentales  
“Ezequiel Zamora”



La Universidad que siembra

VICERRECTORADO  
DE INFRAESTRUCTURA Y PROCESOS INDUSTRIALES  
ESTADO COJEDES

PROGRAMA  
DE ESTUDIOS AVANZADOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**VALORACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI EN EL  
MONITOREO DE LA SALUD FORESTAL EN PLANTACIONES DE  
*Eucalyptus* spp. ESTADO COJEDES  
CASO: DESARROLLOS FORESTALES SAN CARLOS II, S.A.**

AUTOR: Eleazar Gabriel Zorrilla Vásquez  
TUTOR: Franklin Javier Paredes Trejo

SAN CARLOS, OCTUBRE DE 201

Universidad Nacional Experimental  
de los Llanos Occidentales  
“Ezequiel Zamora”



La Universidad que Siembra

Vicerrectorado de Infraestructura  
y Procesos Industriales  
Programa  
Estudios Avanzados  
Maestría en Ingeniería Ambiental

**VALORACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI EN EL  
MONITOREO DE LA SALUD FORESTAL EN PLANTACIONES DE  
*Eucalyptus spp.*, ESTADO COJEDES  
CASO: DESARROLLOS FORESTALES SAN CARLOS II, S.A.**

Requisito parcial para optar al grado de  
*Magister Scientiarum* en Ingeniería Ambiental

AUTOR: Eleazar Gabriel Zorrilla Vásquez  
C.I. N° V-15.721.561  
TUTOR: Franklin Javier Paredes Trejo

SAN CARLOS, OCTUBRE DE 2019

San Carlos, 15 de Julio de 2019

Dra. Yarith Navarro

**Coordinador del Programa**


**Maestría Ingeniería Ambiental**

Presente.-

AVAL DEL TUTOR

Yo, FRANKLIN JAVIER PAREDES TREJO, Profesor Titular-Activo de la UNELLEZ, Doctor en Ingeniería mención Ambiente y portador de la C.I. 12.200.786 le comunico que he leído y aprobado en forma y contenido la Propuesta de Trabajo de Grado (PTG) titulada: 'VALORACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI EN EL MONITOREO DE LA SALUD FORESTAL DE UNA PLANTACIÓN DE EUCALIPTO EN COJEDES' generada por el maestrante, Eleazar Zorrilla, portador de la CI: 15.721.561; por tanto, considero que dicha PTG puede ser sometida al Jurado Examinador que tenga a bien designar el Presidente y demás miembros de la Comisión Asesora de Estudios Avanzados.

Atentamente,



Dr. Franklin Paredes Trejo

[franklinparedes75@gmail.com](mailto:franklinparedes75@gmail.com)

DEDICATORIA

*A DIOS, FAMILIA Y DEFORSA.*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios padre, por darme el don de la vida, por su protección y divina misericordia; por su perdón y amor.

A mis padres Mary y Eleazar, por inculcarme valores y principios que me han permitido llegar a esta etapa de la vida donde me encuentro hoy, materializando lo que un día fue una meta y hoy, se convierte en un logro más.

A mis hermanos Hemar Eliecer y Marly Carolina, quienes respeto, admiro y amo profundamente.

A Biosely Zorimar, por su amor, por su apoyo incondicional y por el aporte de sus conocimientos en mi desarrollo académico.

Al Ing. Joao Leite, jefe y amigo, por brindar la oportunidad de formarme profesionalmente, darme esa motivación de buscar una superación académica y profesional; por su apoyo y compañía durante la maestría.

A Daniel Pegoretti Leite de Souza, por el apoyo brindado en las traducciones del idioma inglés.

A Jenny Villegas, por una amistad transparente, por sus consejos y motivación para alcanzar otro logro académico y seguir creciendo como profesional y como persona.

Al Doctor Franklin Paredes, por su apoyo y tutoría para el desarrollo de esta tesis, por brindar sus conocimientos de una forma transparente y sin limitaciones.

A la Doctora Carmen Morante por brindarme la orientación en el desarrollo y redacción de esta tesis, por largas horas de orientación.

Al Ing. Osvaldo Navegante, por el apoyo y comprensión en el cumplimiento con las actividades presenciales durante la maestría, así como brindar sus conocimientos en el área forestal.

Al superintendente Andrés Funes y el ing. Vismar Parra, por facilitarme los datos de las actividades llevadas por su departamento en las plantaciones objeto del estudio.

A mis compañeros de estudio por los conocimientos compartidos en el desarrollo de la maestría.

A Deforsa por ser mi escenario de desarrollo profesional, por brindarme todas las herramientas necesarias para la elaboración de la investigación, por permitir el sustento a mi familia y el mío propio. Gracias DEFORSA.

A la UNELLEZ, por abrir sus puertas una vez más, en esta oportunidad, en la obtención de un título de estudios avanzados.

## INDICE

LISTA DE TABLAS Y FIGURA.....	ix
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema.....	6
1.3 Importancia de la investigación.....	7
1.4 Alcances y limitaciones de la investigación.....	8
1.5 Objetivos de la investigación.....	9
1.5.1 Objetivo general.....	9
1.5.2 Objetivos específicos.....	9
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Antecedentes de la investigación.....	10
2.1.1 Contexto internacional.....	10
2.1.2 Contexto nacional.....	12
2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	13
2.2.1 Bosques naturales y plantaciones forestales.....	13
2.2.2 El <i>Eucalyptus</i> spp.....	18
2.2.3 Principales enfermedades que afectan al <i>Eucalyptus</i> spp....	20
2.2.4 La precipitación en el estado Cojedes.....	27
2.2.5 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)..	30
2.2.6 Sobre el NDVI derivado del satélite PROBA V.....	31
2.2.7 El manejo forestal del <i>Eucalyptus</i> spp. en DEFORSA II, S.A.....	33
2.2.8 Prácticas culturales aplicadas a las plantaciones de <i>Eucalyptus</i> spp. en DEFORSA II, S.A.....	39
2.2.9 Detección de cambios de tendencia y estacionales en series de NDVI.....	42
CAPÍTULO III. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.1 Tipo de investigación.....	43
3.2 Unidad de estudio.....	43
3.3 Fases de la investigación.....	47
CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	49
4.1 Descripción de la variación temporal del NDVI.....	50

4.2 Acoplamiento entre el NDVI y la precipitación.....	53
4.3 Comparación de los puntos de cambios estacionales y tendencias en la series con frecuencia de dieciséis (16) días, de NDVI y precipitación.....	64
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS CONSULTADAS.....	71
ANEXOS.....	76
A    Mapa lote I. DEFORSA II, S.A.....	77
B    Mapa Completo. DEFORSA II, S.A.....	77
C    Mapa unidades de manejo con identificación de lotes y parécelas DEFORSA II, S.A.....	78
D    Mapa unidades de manejo DEFORSA II, S.A.....	78
E    Limpieza del hilo para plantación (Dejando corteza, ramas y hojas en sitio) en DEFORSA II, S.A.....	79
F    Preparo de suelo en DEFORSA II, S.A.....	79
G    Plantación de <i>Eucalyptus</i> spp tipo manual en DEFORSA II, S.A....	79
H    Plantación mecanizada de <i>Eucalyptus</i> spp en DEFORSA II, S.A....	80
I    Aplicación de cal dolomítica Post-plantación en DEFORSA II, S.A..	80
J    Fertilización 15-15-15. Post-Plantación en DEFORSA II, S.A.....	80
K    Encamellonado en el preparo de suelo. DEFORSA II, S.A.....	81
L    Parcela lista para plantación. DEFORSA II, S.A.....	81
M    Muestra canal de drenaje existente en la parcela 25 Lote I, debajo plantación cercana al canal de drenaje dentro de la RDI. DEFORSA II, S.A.....	82
N    Muestra situación de la plantación ubicada en la parcela 25 Lote I con edad de tres años. DEFORSA II, S.A.....	83
O    Muestra situación de la plantación multiclonal ubicada en la parcela 21 Lote I con edad de tres años. DEFORSA II, S.A.....	84

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

## TABLAS

1. Enfermedades y lesiones de tipo Abiótico.....	21
2. Estaciones del MinAmb-Cojedes con series pluvio-métricas confiables.	28
3. Relación entre la temperatura del Atlántico subtropical norte y sur, con las precipitaciones en la capital de Cojedes.....	29
4. Estaciones pluviométricas en DEFORSA.....	44
5. Principales estadísticos de las series temporales del NDVI promediado cada 16 días sobre las parcelas P21, P25 y P26 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019.....	52
6. Coeficiente de correlación lineal de Pearson derivado de la comparación de las series temporales del NDVI promediado cada 16 días sobre las parcelas P21, P25 y P26 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019.....	53
7. Coeficiente de correlación lineal de Pearson (R) entre el NDVI y la precipitación desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 en la parcela P21 para diferentes desfases temporales.....	55
8. Coeficiente de correlación lineal de Pearson (R) entre el NDVI y la precipitación desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 en la parcela P25 para diferentes desfases temporales.....	57
9. Coeficiente de correlación lineal de Pearson (R) entre el NDVI y la precipitación desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 en la parcela P26 para diferentes desfases temporales.....	59
10. Histórico de la precipitación acumulada en DEFORSA.....	61
11. Valor de NDVI promediado sobre las parcelas P21, P25 y P26 junto a la precipitación registrada y las prácticas culturales aplicadas.....	63

## FIGURAS

1. Fitotoxicidad por aplicación de herbicida en plantación.....	22
2. Muerte por disturbio radicular.....	22

3. Disturbio radicular.....	23
4. Pudrición de plántula en etapa de enraizamiento afectada por <i>Rizoctonia</i> .....	24
5. Quiebre de tallo de la planta en etapa de rusificación, afectación de <i>Ceratocystis fimbriata</i> .....	24
6. Muerte de árbol en plantación afectado por <i>Ceratocystis fimbriata</i> .	25
7. Mancha vascular síntoma de <i>Ceratocystis fimbriata</i> .....	26
8. Exudación de pus, síntoma de mancha vascular por bacteria <i>Ralstonia solanacearum</i> .....	26
9. Afectación de plantas en campo por bacteria <i>Ralstonia solanacearum</i>	27
10. Comparación del NDVI bajo condiciones normales (izquierdo) y severamente seca (derecho).....	31
11. Mini Jardín Clonal DEFORSA.....	34
12. Producción de estacas técnica de Clonación.....	34
13. Área de enraizamiento.....	34
14. Área de rustificación.....	34
15. Área de aclimatación.....	35
16. Curva referencial de nivel de daño económico para control de <i>Atta</i> spp	36
17. DEFORSA mostrando: (a) los sub-lotes en que se divide internamente; y (b) su ubicación geográfica relativa al estado Cojedes.....	46
18. NDVI promediado espacialmente sobre las parcelas P21 (línea de color rojo), P25 (línea de color azul) y P26 (línea de color naranja) desde el 16/01/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días.....	51
19. NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P21 (línea de color rojo) en contra la precipitación (barras de color azul) desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días. La precipitación se expresa en mm.....	54
20. NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P25 (línea de color rojo) en contra la precipitación (barras de color azul) desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días. La precipitación se	

expresa en mm.....	56
21. NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P26 (línea de color rojo) en contra la precipitación (barras de color azul) desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días. La precipitación se expresa en mm.....	58
22. Comportamiento de la precipitación acumulada y duración en días por año, registrado en las estaciones pluviométricas en DEFORSA.....	60
23. Descomposición de la serie temporal de NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P21 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días empleando el método BFAST.....	65
24. Descomposición de la serie temporal de NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P25 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días empleando el método BFAST.....	66
25. Descomposición de la serie temporal de NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P26 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días empleando el método BFAST.....	66
26. Descomposición de la serie temporal de precipitación sobre las parcelas P21, P25 y P26 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días empleando el método BFAST.....	68

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DE LOS LLANOS  
OCCIDENTALES “EZEQUIEL ZAMORA”  
VICERRECTORADO DE INFRAESTRUCTURA Y PROCESOS INDUSTRIALES  
PROGRAMA DE ESTUDIOS AVANZADOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**VALORACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI EN MONITOREO  
DE LA SALUD FORESTAL EN PLANTACIONES DE *Eucalyptus* spp.,  
ESTADO COJEDES  
CASO: DESARROLLOS FORESTALES SAN CARLOS II, S.A**

AUTOR: Eleazar Gabriel Zorrilla Vásquez  
TUTOR: Franklin Javier Paredes Trejo  
AÑO: 2019

**RESUMEN**

El uso de Índices de Valoración es una herramienta eficaz en el monitoreo satelital de cobertura vegetal a grande y pequeña escala, esto ha ganado relevancia en las últimas décadas en el desarrollo de trabajos científicos, siendo el más utilizado el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para la evaluación de grandes extensiones de bosques y cultivos agrícolas, pues es sensible a los cambios en el verdor de las hojas ubicadas en el dosel superior. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el NDVI como posible herramienta en el monitoreo de la salud forestal de una plantación de Eucalipto, con la finalidad de establecer una relación directa entre la precipitación, y las actividades silviculturales empleadas en la plantación, con la dinámica temporal de NDVI. Se utilizaron imágenes tomadas del satélite PROBA-V, el cual tiene un tiempo de revista de dos días; y datos de precipitación acumuladas recolectadas en el sitio de estudio, en el periodo comprendido mayo 2017 hasta mayo de 2019. Se aplicó la técnica estadística conocida por su acrónimo en inglés BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend), la cual provee información sobre los momentos en los cuales se dan cambios abruptos en el NDVI promediado sobre la plantación. Los resultados revelaron una clara relación entre NDVI con los datos de precipitación acumulada recolectados en las Regiones de Interés (RDI), así como también; con el proceso natural de crecimiento de la plantación, característico de la especie *Eucalyptus* spp.

***Palabras clave:*** NDVI, *Eucalyptus* spp., PROBA-V

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DE LOS LLANOS  
OCCIDENTALES “EZEQUIEL ZAMORA”  
VICERRECTORADO DE INFRAESTRUCTURA Y PROCESOS INDUSTRIALES  
PROGRAMA DE ESTUDIOS AVANZADOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**VALORACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI EN MONITOREO  
DE LA SALUD FORESTAL EN PLANTACIONES DE *Eucalyptus* spp.,  
ESTADO COJEDES  
CASO: DESARROLLOS FORESTALES SAN CARLOS II, S.A**

AUTOR: Eleazar Gabriel Zorrilla Vásquez  
TUTOR: Franklin Javier Paredes Trejo  
AÑO: 2019

**ABSTRACT**

The utilization of valorization indexes to monitor large and short-scale vegetation cover using satellite imagery is a powerful and efficient tool. The development of scientific projects using these tools have become relevant in the past decades, giving emphasis to the use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to evaluate large forest and agricultural areas, given its ability to perceive sensible changes in the green color of the leaf located in the upper canopy. This project's objective is to evaluate the use of the NDVI as a potential tool to monitor a Eucalypt planted forest health, while establishing a direct relationship between the NDVI's temporal dynamics with the precipitation and the silvicultural practices employed in the plantation. The imagery used was collected by the PROBA V satellite, which has a turnaround time of two days. Precipitation data was collected in the study area and corresponded to a two-year period between May 2017 and May 2019. The BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) statistical technique was used, since it provides information about abrupt changes in the plantation's averaged NDVI. The results revealed a clear relationship between the NDVI and the accumulated precipitation data collected in the Areas of Interest (AOI), as well as with the plantation's natural growth process, typical for the specie *Eucalyptus* spp.

**Keywokds:** NDVI, *Eucalyptus* spp., PROBA-V

## INTRODUCCIÓN

Las plantaciones de *Eucalyptus* spp. Representan una solución a la creciente demanda de madera en el sector industrial. A medida que se disponga de mayores áreas para el desarrollo de estas plantaciones, surgirán críticas y discusiones sobre el efecto tanto positivos como negativos del *Eucalyptus* spp., en el agua, el suelo y el ambiente en general (Vital, 2007). Es relevante destacar la disminución del aprovechamiento de la madera proveniente de bosques naturales, con el desarrollo de plantaciones forestales (definidas por la Ley de Bosques vigente en Venezuela, como bosques plantados) para uso industrial, sin dejar de lado, los efectos benéficos que estas representan en el tema ambiental, como la mitigación de suelos degradados, la fijación de carbono atmosférico, entre otros.

Como toda especie vegetal, el *Eucalyptus* spp, es susceptible a plagas y enfermedades características de la especie, así como a condiciones edafoclimáticas. Es por ello que a partir de la década de 1970, se comenzaron a realizar estudios sobre los efectos de las plantaciones de eucalipto sobre el ambiente, consumo de agua, efecto en el suelo, captación y reciclaje de nutrientes, etc. (Vital, 2007); todo esto, con la finalidad de conocer mejor la especie y de esta manera obtener datos que permitirían desarrollar las plantaciones en diversas regiones.

En este contexto, es preciso indicar que la salud forestal de una plantación de eucalipto puede ser monitoreada utilizando sensores remotos (imágenes satelitales) para la determinación de índices de vegetación, siendo el Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés Normalized Difference Vegetation Index), el más utilizado en el monitoreo de la valoración de la capa vegetal en series de tiempo determinadas para grandes extensiones de terreno (Alcaraz-Segura, Baldi, Durante y Garbulsky, Millano y Paredes citado por Millano, 2017).

Basado que a la fecha no existe en Venezuela, publicaciones de estudios realizados mediante la utilización de imágenes multitemporales del NDVI, en el estudio del comportamiento de la fenología de plantaciones de eucalipto, surgió la

necesidad de evaluar el uso del NDVI en el monitoreo de la salud forestal de una plantación de *Eucalyptus* spp., en el estado Cojedes. El presente informe fue organizado de la siguiente forma: Capítulo 1, contiene la descripción ampliada del objeto de estudio, la formulación del problema, la importancia de la investigación, los alcances y limitaciones, así como los objetivos. El capítulo 2, describe el marco teórico, donde se encuentra los antecedentes relevantes en su contexto nacional e internacional y los fundamentos teóricos. Capítulo 3, corresponde a la metodología de la investigación, donde se describe el tipo de investigación, la unidad de estudio y las fases de la investigación. Capítulo 4, que presenta la descripción y discusión de resultados y finalmente, la presentación de conclusiones y recomendaciones seguido de las referencias consultadas y los anexos.

## CAPÍTULO I

### EL PROBLEMA

#### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus* spp.) de crecimiento rápido (i.e., 5 a 7 años) están extendiéndose muy rápidamente en diversas regiones tropicales. En Brasil, por ejemplo, el área ocupada por estas plantaciones se acercó a los 3.5 millones de hectáreas en el 2006 (nativas y comerciales), elevándose hasta 5 millones de hectáreas en el 2012 (ABRAF, 2012).

Dentro de este grupo, las plantaciones con fines comerciales (concentradas en los estados Minas Gerais y São Paulo), presentan rendimientos que varían entre 40 y 45 m<sup>3</sup>/ha/año, debido al uso selectivo de clones, un esquema de silvicultura optimizado y la prevalencia de condiciones climáticas y suelos ideales (Gonçalves et al., 2013), siendo estas cantidades, consideradas como buenos rendimiento por cada hectárea plantada; sin embargo los escenarios simulados muestran que el sector forestal en este país requerirá unas 13.5 millones de hectáreas en 2020 para satisfacer su demanda de madera (EMBRAPA-Floresta, 2010).

En el contexto ambiental, las plantaciones comerciales de eucalipto tienen la particularidad de comportarse como grandes sumideros de carbono. En efecto, un estudio previo reveló que en el sureste de Brasil pueden fijar entre 2 y 51 mg de materia seca por hectárea/año (Stape et al., 2004), lo que ha favorecido su implementación en áreas naturales severamente degradadas para promover, por un lado, su restauración natural y por el otro, capturar el carbono atmosférico (Ferez et al., 2015), minimizando así, las consecuencias del cambio climático.

Al igual que otras especies arbóreas, el eucalipto puede verse afectado por una amplia variedad de procesos abióticos (e.g., sequías) y agentes bióticos (e.g., hongos e insectos), quienes de forma individual o en conjunto, causan un impacto negativo sobre la salud del espécimen afectado (Loehle et al., 2016). Este impacto suele

manifestarse por cambios en las condiciones físicas del dosel, en particular por su gradual decoloración y/o defoliación (Stone et al., 2013).

Por consiguiente, el empleo de los índices de vegetación derivados de la reflectancia medida con sensores ópticos a bordo de plataformas satelitales ha ganado un creciente interés como una valiosa herramienta para monitorear amplias áreas forestales dedicadas a la plantación de eucalipto (Somers et al., 2010). Aunque existe una extensa variedad de índices de vegetación, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) destaca por su notable sensibilidad a tales cambios (Tudare y Trejo, 2016).

En la mayoría de los estudios sobre plantaciones forestales de eucalipto afectadas por procesos abióticos y/o bióticos, el NDVI se calcula usando imágenes de satélites de media resolución espacial, tales como Landsat 8 (Le Maire et al., 2011, 2014). Gracias a su sensor OLI (Operational Land Imager), este satélite provee valores de reflectancia a una resolución espacial de 30 m en nadir para las porciones del espectro electromagnético ocupadas por el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta. Sin embargo, es importante enfatizar que tales imágenes suelen presentar discontinuidades temporales sobre aquellas regiones geográficas que recurrentemente están cubiertas por nubes (Ke et al., 2015).

Ante esta situación, algunos consorcios internacionales dedicados al monitoreo de la vegetación desde el espacio, han venido desarrollando productos operacionales basados en el NDVI, pero cuyos valores de reflectancia brutos pasan por un riguroso pre-procesamiento que incluye su corrección geométrica, radiométrica, por nubes, hielo o nieve, sombra de nubes, aerosoles atmosféricos, entre otros, seguido por su agregación a diferentes escalas temporales (i.e., 5 o 10 días), resultando así un producto cuyos valores de NDVI a nivel del dosel son de muy alta calidad (Tian et al., 2015).

Dentro de las iniciativas internacionales dedicadas al monitoreo de la vegetación por medio de satélites, destaca el programa PROBA-V, auspiciado por la Oficina de Política Científica Belga (BELSPO, por sus siglas en inglés), cuyo principal objetivo

es la valoración de la vegetación a escala global por medio del satélite PROBA-V, lanzado en mayo del 2013 para dar continuidad a las misiones de observación satelital francesa SPOT 4 y SPOT 5. Este satélite es operado por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), quien con el apoyo de la empresa belga VITO (acrónimo de Flemish Institute for Technological Research) toma la información espectral medida por sus sensores y genera varios productos con muy alto valor agregado basado en el NDVI, los cuales finalmente son distribuidos a través de su portal web (Dierckx et al., 2014).

A diferencia de Brasil, el área ocupada por plantaciones comerciales en Venezuela es insignificante. En referencia a este aspecto, Morante (2017), basándose en los registros históricos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés), estimó que para el año 2015, habían unas 525.000 ha de bosques plantados con especies introducidas, entre las que se encuentra el eucalipto. Siendo las plantaciones forestales denominadas en la Ley de Bosques vigente en la República Bolivariana de Venezuela (2013), en su capítulo I artículo 44, como bosques plantados; sin embargo, para el siguiente trabajo de investigación, utilizaremos la definición conocida internacionalmente como plantaciones forestales.

Cabe destacar que son pocas las empresas establecidas en Venezuela dedicadas a esta actividad comercial. Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A. (DEFORSA II, S.A.) quien es filial de Papeles Venezolanos (PAVECA), es una de estas. DEFORSA ocupa un predio de 10.742 ha en los llanos centrales del estado Cojedes, y se dedica en gran medida a proveer materia prima a PAVECA para manufacturar papel suave, mientras que en una menor proporción, produce madera para elaborar paletas, estantillos, entre otros productos y subproductos (Rangel et al., 2017). Para el año 2013, poco más del 52% la superficie ocupada por DEFORSA era destinada al uso silvopastoril con eucalipto a baja o alta densidad (Morante, 2017).

## 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Una de las principales modalidades de propagación vegetal utilizadas en DEFORSA, es la clonación de árboles elite. Estos son producto de un programa de mejoramiento genético el cual realiza ensayos de adaptación de especies de *Eucalyptus urophylla*, entre otros, donde se evalúa la resistencia a enfermedades y plagas, fertilización, drenaje, control de malezas, ensayos de espaciamiento de plantación, y calidad de la madera, destina a la producción de pulpa para papel.

Este programa permite seleccionar los clones más adecuados a la producción comercial (Leite de Souza, et. al. 2015). Sin embargo, los árboles seleccionados para clonación algunas veces son susceptibles a diferentes condiciones bióticas y abióticas. Es por ello que, la selección de los árboles como el mantenimiento de las plantaciones, cobra importancia; ya que al seleccionar un árbol enfermo (o muy susceptible a afectaciones de tipo biótico y abiótico), el mismo transmitirá la enfermedad o condición, a las plantas derivadas del proceso de clonación. Es difícil identificar una enfermedad a tiempo (ya sea bacteriana, fúngica o abiótica), en plantaciones forestales de gran tamaño sin el conocimiento previo de los signos o síntomas presentes en árbol una vez desarrollada la enfermedad.

En este contexto, llama la atención, el hecho de que apesar de la potencialidad del NDVI para monitorear el estado de salud de las plantaciones de eucalipto, no existen publicaciones recientes realizadas en el territorio venezolano que muestren cuan confiable es este índice de vegetación para la detección temprana de afectaciones bióticas o abióticas en dichas plantaciones. Así pues, dada la importancia ambiental de las plantaciones de eucaliptos como sumideros de carbono, la capacidad del NDVI para capturar los sutiles cambios en el verdor del dosel arbóreo superior y la presencia de DEFORSA en el estado Cojedes, se decidió abordar este problema por medio del presente trabajo de investigación.

Por lo antes comentado, se parte de la hipótesis que el NDVI es lo suficientemente sensible para detectar los cambios fenológicos naturales que experimenta el eucalipto

desde su siembra hasta su cosecha (para el caso de producción de madera para pulpa, la edad de cosecha de un árbol, se encuentra alrededor de los 7 años), y puede además revelar la incidencia de agentes bióticos o abióticos que afecten la plantación en un determinado momento.

### 1.3. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

El ámbito de estudio de esta investigación está estrechamente relacionado con lo indicado en el artículo 127 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (Venezuela, 1999), donde refiere:

Es un derecho y un deber de cada generación proteger y mantener el ambiente en beneficio de sí misma y del mundo futuro. Toda persona tiene derecho individual y colectivamente a disfrutar de una vida y de un ambiente seguro, sano y ecológicamente equilibrado. El Estado protegerá el ambiente, la diversidad biológica, los recursos genéticos, los procesos ecológicos, los parques nacionales y monumentos naturales y demás áreas de especial importancia ecológica.

De igual forma, está en línea con el quinto objetivo del Segundo Plan Socialista de Desarrollo Económico y Social de la Nación, 2013-2019 (Venezuela, 2013), el cual trata “Contribuir con la preservación de la vida en el planeta y la salvación de la especie humana”. Cabe destacar, que la temática general se vincula al área ambiental, contemplada en el Plan General de Creación Intelectual de la Universidad Nacional Experimental de Los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora (UNELLEZ) 2014 – 2019.

Como se comentó, las plantaciones forestales de Eucalipto son importantes sumideros de carbono atmosférico, por lo que se asume que estos influyen positivamente sobre el balance del carbono a escala global, y en consecuencia, pudiesen contribuir a minimizar el impacto del cambio climático (Hernández, 2008). A menor escala, estas plantaciones bajo un sistema silvopastoril (como en el caso de DEFORSA), además de remover una cantidad importante del carbono atmosférico, pueden llegar a ser ambientalmente sustentable (Morante, 2017). En este sentido, queda claro que las investigaciones que generen información relevante sobre estos

ecosistemas coadyuvarán a su eficiente gestión, lo que pone de manifiesto la pertinencia social, ambiental y científica del tema que se prevé abordar en esta propuesta.

#### 1.4. ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación pretende generar información útil que permita contribuir a la conservación de la salud forestal de plantaciones de eucalipto en DEFORSA, estandarizar valores de fertilización, preparación de suelos (unidades de manejo), respuesta de clones en áreas de baja topografía, entre otros; por otro lado, coadyuvará a establecer un modelo de predicción que posibilite la detección a tiempo de ocurrencia de afectaciones bióticas y abióticas, en toda la extensión de sus plantaciones con la finalidad de gestionar de manera oportuna los planes y proyectos para la obtención y mejoramiento del rendimiento en las cosechas.

Finalmente dada la escasez de estudios sobre este tópico en Venezuela, se espera que este aporte allane el camino en el campo de investigación de la industria forestal en Venezuela, con miras al establecimiento de un modelo de predicción partiendo del análisis y procesamiento de imágenes satelitales de NDVI. Dentro de las limitaciones de la investigación, cabe destacar el tema de la contaminación por nubes, especialmente durante la temporada de lluvias. Tal situación podría conducir a interpretaciones erróneas no atribuible al dosel de la plantación. Otro aspecto que podría representar una limitante es la inexistencia de referencias o antecedentes de estudios similares dentro del ámbito venezolano, la cuales podrían proporcionar fundamentos para soportar dicha investigación.

## 1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.5.1. Objetivo general

Valorar el índice de vegetación de diferencia normalizada en el monitoreo de la salud forestal en plantaciones comerciales de Eucalipto en la empresa Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A., estado Cojedes.

### 1.5.2 Objetivos específicos

1. Describir la variación temporal del NDVI en una plantación forestal de eucalipto en la empresa Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A., estado Cojedes.
2. Explorar el acoplamiento entre el NDVI y la precipitación en una plantación forestal de eucalipto en la empresa Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A., estado Cojedes.
3. Comparar los puntos de cambios estacionales y tendenciales en las series de NDVI y precipitación en la plantación forestal de eucalipto en la empresa Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A., estado Cojedes.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.1.1 Contexto internacional

Diferentes trabajos se han realizados en busca del entendimiento de la interacción entre la vegetación y el clima (Halls, Botkin, Strebel, Woods y Goetz, 1991 citado por Millano, 2017). Las imágenes obtenidas de sensores como el AVHRR (Advance Very High Resolution Radiometer), SPOT-Vegetation (Satélite para la Observación de la Tierra), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y Landsat TM /ETM+ (Thematic Mapper / Enhanced Thematic Mapper plus), son las más utilizadas en el estudio de dichas interacciones.

No solo se busca entender la interacción clima – vegetación en el área forestal (bosques naturales y plantaciones forestales), sino también en el área agrícola, ya que el monitoreo de cultivos agrícolas a través de las imágenes satelitales, se ha realizado desde la década de los 70; en este sentido, mediante la utilización del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), se realizó en México el estudio de un cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), titulado por los autores (Aguilar, Galindo, Fortanelli y Contreras, 2010), Índice Normalizado de Vegetación en Caña de azúcar en la Huasteca Potosina, con el objetivo de mapear y evaluar las áreas bajo dicho cultivo y así estudiar la salud del mismo a través del algoritmo NDVI, derivado del procesamiento de imágenes Landsat-7/ETM+. Los autores determinaron que:

El índice Normalizado de Vegetación NDVI demostró ser un parámetro eficaz para supervisar las condiciones del dosel de caña de azúcar y como instrumento de evaluación rápido del vigor vegetal del cultivo en un momento determinado. Para, posteriormente, vigilar la variabilidad temporal que determina la interacción del cultivo con otros factores agroclimáticos y, por lo tanto, modelar la productividad agrícola.

La sostenibilidad de los ecosistemas naturales, es un tema de gran impulso en la actualidad. Los bosques como grandes sumideros de carbono y habitat de muchas especies, son monitoreadas alrededor del mundo mediante imágenes satelitales. Un estudio de restauración ecológica realizado en el parque forestal Embalse del Neusa Colombia, (Aplicación de Índices de Vegetación para Evaluar Procesos de Restauración Ecológica en el Parque Forestal Embalse del Neusa) (Beltrán, 2017), implementó los índices de vegetación: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación de Proporción (RVI), Índice de Relación Simple (SR), Índice de Verdor (GI), Índice de Vegetación Ajustado (SAVI), para monitorear el comportamiento de la reforestación y la adaptabilidad de las especies arbóreas utilizadas.

En dicho estudio, se pudo concluir, que la utilización de imágenes satelitales y el cálculo de índices de vegetación, son herramientas eficaces en el seguimiento de plantaciones, cultivos y restauraciones de áreas de gran importancia ecológica, así como, la aplicación de los índices pueden generar alertas tempranas, detectando anomalías en la cobertura vegetal.

La diversidad de implementación del algoritmo NDVI es muy amplia; en Argentina por ejemplo, se realizó una investigación titulada Análisis comparativo de parámetros edáficos y NDVI entre un sistema de Pastoreo Racional Voisin (PRV) y agricultura de siembra directa (SD) de Monti, Marcuzzi, Destéfano (2019). Se utilizaron imágenes derivadas del satélite Lansat, Cbers y Sentinel. Los valores de NDVI permitieron conocer el comportamiento de la capa vegetal (durabilidad, crecimiento, consumo de agua, producción de biomasa, entre otros, tanto en el sistema de Pastoreo Racional Voisin, como en la agricultura de Siembra Directa; dando así a los investigadores un punto de partida para el análisis comparativo de los dos sistemas de cultivo implementados.

Otra investigación relevante, desarrollada en Argentina con la utilización de NDVI, fue la realizada por los investigadores Gaitan y Bran (2015), ellos evaluaron la tendencia del NDVI del sensor MODIS, en el periodo del año 2000 al año 2014,

como indicador de la degradación de tierras. Las conclusiones de la investigación arrojaron que la metodología utilizada basada en índices de sensores remoto, pudiese formar parte de un sistema de monitoreo de la degradación de las tierras, ya que el NDVI suministra patrones generales de tendencia positivas o negativas, en la actividad de la vegetación como indicador de funcionamiento ecosistémico; validando los valores con indicadores tomados en campo.

### 2.1.2 Contexto Nacional

En la actualidad el cambio climático es tangible, periodos lluviosos con poca precipitación son cada vez más frecuentes y acentuados. A nivel mundial olas de calor y de frío son catalogadas como desastres naturales. Tsunamis, vaguadas, nevadas, etc. son causa de pérdidas humanas a nivel mundial. No sucede algo diferente con la vegetación. Desde la década de los 70 a nivel mundial se realizan muchos estudios que relacionan las condiciones climáticas con la vegetación utilizando imágenes satelitales, y su relación con el NDVI, para así estudiar el efecto generado por la relación clima-vegetación.

En este orden de ideas, y con un enfoque local, destacan el trabajo de Millano y Paredes (2017), quienes caracterizaron los patrones fenológicos en la cobertura vegetal del bosque tropical, ubicado en la parte centro-sur del estado Cojedes; Estos autores concluyeron que el NDVI es una herramienta útil en el monitoreo de la variabilidad temporal de la vegetación, ya que existe una relación lineal del verdor de la vegetación con la variación estacional de la precipitación en el inicio del periodo lluvioso; Es decir, aumenta el valor del NDVI en periodo lluvioso o al inicio de las lluvias, y disminuye fuera de este periodo.

Un estudio similar realizado en los llanos del Orinoco, por Chacon – Moreno (2004), centró la atención en la fenología de los ecosistemas de sabana usando series temporales de NDVI. Entre otros hallazgos, resaltaron que las diferencias en la fenología de los ecosistemas están muy relacionadas con las condiciones ambientales de la región. En efecto, ellos indicaron que la precipitación presente en el área es el

factor determinante en el crecimiento de la vegetación y a su vez controla la variabilidad del NDVI.

Otro aporte importante en el estudio de valores de NDVI, fue el realizado por Millano (2017), quien estudió la variabilidad del NDVI en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, donde se analizaron series temporales de imágenes satelitales, que permitieron detectar fluctuaciones de los patrones fenológicos de las coberturas objeto del estudio; así como la relación directa entre la intensidad del verdor (aumento o disminución) con la humedad aportada por las lluvias.

## 2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.2.1 Bosques naturales y plantaciones forestales

Los bosques naturales: Son ecosistemas que albergan numerosas especies tanto vegetales como animales, la vegetación predominante está constituida en su mayoría por árboles y plantas, siendo los primeros definidos como una planta de tallo leñoso, la cual presenta ramificaciones a cierta altura del suelo. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO por sus siglas en ingles), define el concepto de árbol como: “Especie leñosa perenne con un solo tronco principal o, en el caso de monte bajo con varios tallos, que tenga una copa más o menos definida”.

La FRA (2015), define los bosques como extensión de tierra superior a 0,5 hectáreas dotadas de árboles a una altura superior de 5 metros una cubierta de dosel superior a 10 por ciento, o de árboles capaces de alcanzar esta altura *in situ*. No incluye la tierra sometida a un uso predominante agrícola o urbano.

Existen muchos tipos de bosques en todo el mundo, los bosques secos tropicales (en regiones que presentan una temporada secas), bosques secos subtropicales (regiones con inviernos suaves y veranos secos), selvas lluviosas tropicales (en climas tropicales cálidos y húmedos), bosques templados de hoja ancha caduca (característicos de climas más suaves y húmedos, como los de Europa y América del

Norte), bosques de montaña, manglares (se encuentran a lo largo de la costa), bosques de coníferas boreales (se encuentran en territorios de clima frío), entre otros (FAO, 2018a).

Se estima que alrededor de una tercera parte de la población mundial (2.400.000 millones de habitantes aproximadamente), utiliza la madera para servicios energéticos básicos (FAO, 2018b), en tal sentido los bosques suministran el 40 % aproximadamente de la energía renovable en forma de dendrocombustible; que es el equivalente a la combinación de la energía eólica, solar e hidroeléctrica (FAO, 2018b).

En las últimas décadas las naciones del mundo ven los bosques como aspecto fundamental de la sobrevivencia en el planeta. Se conoce que para la década de los 90 (1.990), se perdían anualmente en promedio 15 millones de hectáreas principalmente en los trópicos (Franquis y Infante, 2003). En la actualidad la FAO específicamente en el año 2016, a través de la comisión de estadística de las Naciones Unidas, acordó 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), 169 metas y 230 indicadores de lo que se denomina agenda 2030; la cual debe ser cumplida por los países participantes en un lapso de tiempo determinado.

Muchos de los ODS, tiene que ver con el aprovechamiento de los recursos naturales renovables y su sostenibilidad en el tiempo, tema del cual los bosques son protagonistas principales. Se conoce que los bosques representan una fuente de alimento, medicina y combustible para más de mil millones de personas. Además de ayudar a mitigar el cambio climático, proteger el agua y los suelos (FAO, 2018).

Los bosques también están constituidos por capas, como lo son el suelo forestal, sotobosques, dosel, capa emergente; la combinación de varias capas puede definirse como ecosistemas forestales (FAO, 2018). Desde cualquier punto de vista, es evidente que los bosques naturales son una fuente de riqueza energética, como también, el hogar de millones de especies (animales y vegetales, en las distintas capas que lo conforman) y que son fundamentales en el equilibrio de la cadena trófica; por ende de todo el planeta.

Los bosques también son afectados por agentes bióticos y abióticos, disminuyendo considerablemente su salud, dependiendo de la intensidad del ataque o propagación de un insecto o fitopatógeno determinado (insecto, hongo, bacteria, etc.), como también, la magnitud del evento abiótico (incendio, sequía, inundación, etc.), el tiempo de duración o extensión de área afectada por dicho evento. Las especies invasivas pueden ocasionar efectos negativos en la salud de los bosques. Una especie invasiva es definida como aquella especie nativa de un ecosistema determinado y cuya introducción y propagación, causa, o puede causar, daños socioculturales, económicos o ambientales (FAO, 2018).

En el presente se ha dado importancia tanto a los bosques, como también, a las plantaciones forestales, ya que ambos representan la preservación de muchas especies y ecosistemas, como también, importantes depósitos de carbono. En este sentido, la autora Morante (2017), se refiere a los bosques plantados como: “Un sistema de manejo y aprovechamiento forestal que persigue producir madera para materia prima y elaborar productos y subproductos de utilidad para la humanidad”. Existen programas pilotos como el de La Reducción de las Emisiones de la Deforestación y la Degradación de los Bosques (REDD, por sus siglas en inglés), el cual es un mecanismo internacional que responde a tratados internacionales, en los cuales se provee de incentivos a países en desarrollo para que protejan y restauren las reservas de carbono de sus bosques (Armenteras et al, 2016).

La utilización de datos provenientes de sensores remotos permite la aplicación de distintos lógenes para establecer parámetros de superficie y área cubierta por el dosel, según características de cada región (Armenteras et al. 2016). De igual forma, esto permitirá definir la zona boscosas que se incluirán o excluirán dentro de REDD (Angelsen citado por Armenteras et al. 2016). El Almacenamiento o fijación de carbono puede estar dado en la biomasa (tanto por encima como por debajo del suelo), en la hojarasca, en la madera muerta, entre otros (FAO, 2018); en tal sentido, a medida que se estudian las plantaciones forestales, se van igualando la importancia

de ambos ecosistemas (bosques y plantaciones forestales) para alcanzar las metas planteadas por la FAO en la agenda 2030.

Las Plantaciones Forestales, son aquellas realizadas con especies introducidas o autóctonas, con intenciones comerciales o de conservación. Otros autores la definen como el establecimiento de árboles que conforman una masa boscosa (Trujillo, 2003). Entre las plantaciones con fines comerciales, podemos destacar, las energéticas, plantaciones para pulpa, postes eléctricos, construcción, producción de carbón, entre otros. Las plantaciones con fines de conservación, destacan las de recuperación de áreas degradadas, protección de cuerpos de agua, protección de áreas agrícolas, plantaciones silvopastoriles, etc. (Trujillo, 2003).

La mayoría de las plantaciones forestales responde a intereses comerciales o, son combinadas con tal fin, sin embargo, esta condición no le resta importancia, ya que reducen la intervención antrópica en los bosques naturales, regula el ciclo hidrológico y provee de oxígeno el planeta (Alfenas, 2017). Las especies arbóreas seleccionadas para dicha plantación son de tipo inducidas en la mayoría de los casos; se debe tomar en cuenta varios factores al momento de establecer una plantación forestal, como lo son, los requerimientos edafoclimáticos de la especie, el tipo de suelo de la región, altitud de la región, tipo de clima, registro de precipitación promedio anual, entre otro número de datos climatológicos para el buen desarrollo de la especie arbórea seleccionada.

Entre las principales especies utilizadas en plantaciones forestales con fines industriales podemos señalar: Eucalipto spp, Pinus spp, Acacia Negra (*Acacia mearnsii*), Seringueira (*Hevea brasiliensis*), Teca (*Tectona grandis*), Mogno Africano (*Khaya ivorensis*), entre otros (Alfenas, 2017). Un factor determinante para una óptima adaptabilidad de las especies arbóreas que confirman la plantación, es la calidad genética del material vegetal y buena calidad de las plantas en vivero, (Trujillo, 2003); en este contexto, las plantaciones forestales demandan una planeación para su establecimiento y un cuidado después del mismo.

El tipo de uso que se dará a la plantación, determinara la densidad, el rendimiento y el costo de su establecimiento y cuidado (Trujillo, 2003). Dentro de la planeación para la instalación de una plantación forestal, el diseño y manejo del vivero está directamente relacionado con el fin o uso que se le dará a la plantación forestal. Un vivero bien manejado garantizara la calidad del material vegetal plantado.

En países que desarrollan plantaciones forestales, como es el caso de Paraguay, poseen preferencia por las especies de eucalipto por la versatilidad y rápido crecimiento (Brito y Leguizamón, 2013). Hay autores que señalan que el beneficio obtenido tanto económico como ambiental, de los bosques naturales y plantaciones forestales, es mayor al de los eucaliptares (Montoya, 1995), sin embargo el mismo autor confirma, que debido a la progresiva demanda de madera y sus derivados, las plantaciones de eucalipto, permiten reducir la presión de explotación sobre los bosques naturales. El Programa de Evaluación Mundial de los Recursos Forestales (FRA, por sus siglas en inglés) 1.998, expresa:

La plantación de árboles tiene una importancia creciente para satisfacer las necesidades de madera y productos de madera de la población mundial en constante crecimiento, y para mejorar los niveles de vida, como así mismo para contrarrestar la menor disponibilidad de madera y otros productos forestales provenientes de los bosques naturales.

La producción de plantas para el establecimiento de una plantación forestal se realiza en el vivero; se puede iniciar mediante la producción de plantas provenientes de semillas, las cuales pertenecerán, al material genético vegetal (árbol elite), seleccionado para las condiciones edafoclimáticas de la región. La adaptabilidad de una plantación forestal con fines comerciales, dependerá de las mejoras genéticas realizadas a las especies arbóreas seleccionadas inicialmente. En la actualidad la utilización de plantas clonadas (fotocopia un una planta) está en auge, ya que presentan rápido desarrollo y mayor rendimiento, lo cual conlleva al aumento en los costos de producción (Brito y Leguizamón, 2013).

Con la reducción de la disponibilidad de madera a nivel mundial de los bosques tropicales, sumado al elevado impacto negativo que conlleva la explotación de

madera proveniente de bosques naturales, diversos países llevan décadas (por ejemplo Brasil), diseñando modelos y programas de mejoramiento genético para aumentar el rendimiento de sus plantaciones de eucaliptos con fines industriales; sin embargo, la madera joven proveniente en su gran mayoría de especies de *Eucalyptus* spp de rápido crecimiento, presenta limitaciones técnicas en la sustitución de la madera proveniente de bosques tropicales en la industria, siendo una de la más notables las tensiones de crecimiento, ya que se traduce en la disminución del rendimiento en el proceso de industrialización (Assis, 2001).

### 2.2.2 El *Eucalyptus* spp.

El eucalipto se considera originario de Australia, tanto en el continente como en las islas cercanas son considerados árboles o especies endémicas, perteneciente a la familia Mirtáceas (FAO, 1981). Sin embargo dos especies de eucaliptos fueron hallados fuera de los límites Australianos, como lo son *E. Deglupta* y *E. Urophylla* (FAO, 1981). El Eucalipto, gracias a su enorme diversidad (por el orden de 500 a 600 eucaliptos diferentes, muchos son arbóreos) facilita su adaptabilidad (Montoya, 1995). Las especies de eucalipto están distribuidas por lo menos en 90 países del mundo, principalmente en zonas tropicales y subtropicales (Morante, 2017).

La gran variedad de productos proveniente de las plantaciones de eucalipto, posibilita su uso con fines industriales y entre ellos, Morante (2017) señala los siguientes: estantillos para cercas, listones, paletas, aglomerados, vigas, parquet, leña, biocombustibles y carbón, entre otros. La misma autora identifica como subproductos lo siguiente: la miel de eucalipto, jarabe para la tos, aceites, crema dermatológica, repelente para insectos, entre otros. Los eucaliptos son una de las especies más productivas gracias a su rápido crecimiento y a su breve edad de corte (Montoya, 1995). En sus países de origen, los eucaliptos forman masas naturales y mantiene ecosistemas muy valiosos, tanto por albergar flora y fauna peculiares y con valores ecológicos, como por conservar y mejorar los suelos (Montoya, 1995).

Otra característica significativa del eucalipto es su valor genético, son numerosas las especies de eucaliptos ensayadas en todos los países donde estos fueron establecidos (Montoya, 1995), siempre con la finalidad de maximizar los rendimientos, darle otros usos a la madera proveniente de plantaciones, así como transmitir ciertas características (genotípicas y fenotípicas) de una especie a otra, ya que algunas especies son más resistentes a enfermedades que otras, como también a condiciones edafoclimáticas diferentes. La especie *E. globulus* se desarrolla mejor en climas húmedos y sin heladas, con exigencia de precipitación de 700 mm a más de 1200 mm, la resistencia a las heladas sucede luego de los dos años de edad y soporta máximas estivales de hasta 40°C (Montoya, 1995).

En el mismo orden de ideas podemos describir la especie *E. camaldulensis*, como una especie que al igual que el *E. globulus* presenta mejor desarrollo en climas húmedos y sin heladas, sin embargo su exigencia de precipitación media anual es sobre los 500 mm, en climas secos con precipitaciones alrededor de 400 mm media año puede vivir, presentando bajo rendimiento y alta susceptibilidad a enfermedades (Montoya, 1995), en comparación con el *E. globulus*, el *E. camaldulensis* presenta mayor resistencia al calor, la sequía y el frío (Montoya, 1995); siendo estas características individuales de cada especie lo que hace atractivo su mejoramiento genético a través de la hibridación en busca de mayor adaptabilidad y rendimiento, sea cual sea el área donde se desarrolle la plantación. El uso final de la madera, determinara las características deseadas.

En Deforsa el Eucalipto es desarrollado a partir de plantaciones de las especies *E. urophylla* y *E. grandis*, las cuales fueron establecidas en el año 1992. Los híbridos resultantes del cruzamiento de ambas especies, son seleccionados por ser de alta adaptabilidad a condiciones agroclimáticas de cada tipo de suelo en DEFORSA (Morante, 2017). El *E. urophylla* requiere de precipitación media anual de 1.000 a 1.500 mm, con rendimientos de celulosa de 50% y una densidad (medida en kg/m<sup>3</sup>) de 560, y el *E. grandis*, valores de densidad en 490 kg/m<sup>3</sup>, requiriendo una precipitación media anual de 600 mm.

La adaptación de la especie Eucalipto en DEFORSA, ha sido posible al trabajo continuo de muchos años de investigación y puesta en práctica de un programa de mejoramiento genético, de distintas especies de Eucalipto, el cual realiza combinaciones de cruzamiento entre las especies, para formar híbridos con una mayor capacidad de adaptabilidad, resistencia, rendimiento y calidad de la madera, la cual es destinada para la fabricación de pulpa para papel.

### 2.2.3 Principales enfermedades que afectan el *Ecucalyptus* spp.

La enfermedad de una planta es definida como aquella que interrumpe el funcionamiento fisiológico normal de la misma, causado por agentes bióticos (patógenos) o agentes abióticos (condiciones adversas del medio), (Alfenas, 2017). El mismo autor identifica las partes afectadas de la planta como: Raíz, tronco, ramos y hojas. Las pérdidas por causa de enfermedades de tipo biótica o abiótica, se representan en pérdidas de tipo comercial, (plantaciones forestales), reducción de la biodiversidad en ecosistemas naturales (bosques naturales) y árboles ornamentales de valor histórico (monumentos), (Alfenas, 2017).

Cuando una enfermedad se desarrolla en una planta, las principales causas del evento pueden estar enmarcadas en: La susceptibilidad de la planta (hospedante) al patógeno, la agresividad del patógeno y las condiciones ambientales favorables para el desarrollo del patógeno (Alfenas, 2017). Una planta sana (hospedante) afectada superficialmente ya sea por efecto abiótico, o lesión Fitopatogénica en la corteza viva, será capaz de generar una barrera fisiológica de tipo anatómico impermeabilizante en el área de la corteza afectada, para así evitar la pérdida de líquidos a partir de los tejidos sanos limítrofes a la lesión (Ferreira y Milani, 2002).

Las pérdidas por enfermedades en plantaciones forestales, puede presentarse en distintas etapas; las cuales van desde la producción de plantas en vivero hasta la plantación y su cosecha (Alfenas, 2017). Las pérdidas pueden ser: de tipo directo, las cuales están divididas en primarias (cantidad, calidad y costo de control) y secundarias (contaminación de semillas, suelo y defoliación de las plantas). De tipo

indirecto, tales como las comunidades, los productores, los comerciantes, el gobierno y el ambiente, entre otros (Alfenas, 2017).

En este sentido, las enfermedades son ocasionadas por agentes bióticos, abióticos y deformidades genéticas (Tabla 1). Entre los agentes bióticos Alfenas (2017) describe lo siguiente: hongos, virus, bacterias, nematodos, micoplasma, protozoarios, plantas parásitas superiores, entre otros. El mismo autor describe como agentes abióticos: temperaturas extremas, estrés hídrico, compactación de suelo, desequilibrio nutricional, fitotoxicidad, deformidad de raíces, luminosidad inadecuada, competencia de plantas y alelopatía, entre otros. Una lesión de tipo mecánica puede ser ocasionada por un insecto (hormiga cortadora entre otros), por mal uso de producto químico, ácaro, trips, entre otros (Figuras 1, 2 y 3).

Las principales enfermedades de tipo abióticas son señaladas junto con las lesiones del mismo tipo, en el siguiente cuadro:

Tabla 1

Enfermedades y lesiones de tipo abiótico.

ENFERMEDADES DE TIPO ABIÓTICO	LESIONES DE TIPO ABIÓTICO.
Seca de copa (fuste del árbol)	Quiebre de árboles por causa del viento
Disturbios radiculares	Daños causados por heladas
Anegamiento del suelo (hipoxia radicular)	Daños causados por granizo
Ramo negro (Gomose e pau preto)	Fitotoxicidad por herbicida
Desequilibrio nutricional	Daños causados por fuego
Sofocamiento de la planta en el suelo	Daños por descargas eléctricas (rayos)

Fuente: Alfenas (2017).



Figura 1. Fitotoxicidad por aplicación de herbicida en plantación  
Fuente: Alfenas (2017).



Figura 2. Muerte por disturbio radicular  
Fuente: Alfenas (2017).



Figura 3. Disturbio radicular.  
Fuente: Alfenas (2017).

Para abordar las enfermedades causadas por agentes bióticos, debemos conocer las condiciones ideales donde el fitopatógeno se desarrolla. En el área de vivero el riego por nebulización y las altas temperaturas, favorecen la pudrición de las plantas (Alfenas 2017). La enfermedad en un vivero va a depender de tres aspectos fundamentales, como son la planta hospedante, el ambiente y el patógeno, sabiendo que tanto la planta como el ambiente tienen que ver con la fisiología del hospedante (Alfenas, 2017).

Una de las principales enfermedades que se desarrollan en un vivero, es la pudrición de las plantas, tanto en su etapa inicial, como en la etapa de rusificación o aclimatación; la cual puede ser producida por los patógenos *Rizhoctonia* sp., *Cylindrocladium* sp., *Ralstonia solanacearum*, *Brotiytis*, entre otras (Figura 4). El quiebre de tallo en las plantas, es otra enfermedad que ocurre en el vivero; este quiebre puede estar dado por patógenos responsables de la pudrición de plantas y

también por patógenos como el *Fusarium solani*, *Ceratocystis fimbriata*, *Pythium* (Figura 5).



Figura 4. Pudrición de plántula en etapa de enraizamiento afectada por *Rizoctonia*.

Fuente: Alfenas (2017).



Figura 5. Quiebre de tallo de la planta en etapa de rusificación, afectación de *Ceratocystis fimbriata*.

Fuente: Goncalves citado por Alfenas (2017).

En las plantaciones de eucalipto ocurren pérdidas de árboles por causa de enfermedades radiculares o vasculares, las cuales pueden ser de tipo fúngica o bacteriana. Estas enfermedades son definidas como manchas vasculares (Alfenas, 2017). Dicha enfermedad puede estar dada por los patógenos *Ceratocystis fimbriata*, *Ralstonia solanacearum* y *Erwinia psidii* (Figura 6, 7, 8 y 9).

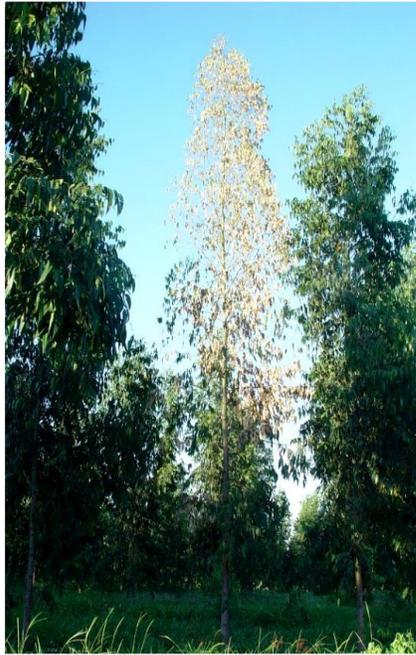


Figura 6. Muerte de árbol en  
plantación afectado por  
*Ceratocystis fimbriata*  
Fuente: Alfenas (2017).



Figura 7. Mancha vascular síntoma de *Ceratocystis fimbriata*  
Fuente: Alfenas (2017).



Figura 8. Exudación de pus, síntoma de mancha vascular por bacteria *Ralstonia solanacearum*  
Fuente: Alfenas (2017).



Figura 9. Afectación de plantas en campo por bacteria *Ralstonia solanacearum*  
Fuente: Alfenas (2017).

#### 2.2.4 La precipitación en el estado Cojedes

El clima prevaleciente en un región, puede ser identificado a través de series temporales, generadas mediante la medición secuencial de los elementos del clima de la región o zona de interés (Paredes, 2009). La Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda la utilización de por lo menos 30 años continuos, para la caracterización de la precipitación; en tal sentido, también recomienda, calcular el porcentaje de años incompletos y meses faltantes de una serie, ya que esto permitirá estimar la calidad de la serie climática (OMM citado por Paredes, 2009).

Una serie pluviométrica de buena calidad debe tener hasta 2% de años incompletos y 10 % de meses faltantes, de lo contrario debe descartarse y considerar series provenientes de estaciones cercanas con características climáticas análogas (OMM citado por Paredes, 2009).

El estado Cojedes cuenta con una red de estaciones climatológicas, administrada por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MinAmb), la cual está

conformada por más de 30 estaciones pluviométrica, sin embargo son pocas las que cumplen con el criterio de 30 años o más de series continuas, 2% o menos años incompletos y 10% o menos meses faltantes (Tabla 2) (Paredes, 2009). En el estado Cojedes las lluvias muestran un comportamiento sujeto a la dinámica de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y a los disturbios de las variables macroclimáticas (VM) (Paredes y Guevara citado por Millano, 2017); esto se ve reflejado en la asociación del enfriamiento del atlántico sur con el aumento de las precipitaciones en el estado Cojedes, y el enfriamiento del atlántico norte, con la disminución de las mismas (Millano, Paredes y Vivas citado por Millano, 2017).

En el año 2005 ocurrió una sequía la cual se vio reflejada en varios países, como fue el caso de Venezuela, Brasil y Colombia. Eventos como este en la región de sur américa, son atribuidos a fuertes anomalías o disturbios en las VM (Giddings y Soto citado por Millano 2017).

Tabla 2

Estaciones del MinAmb-Cojedes con series pluvio-métricas confiables.

ESTE	NORTE	SERIAL	NOMBRE	ALTITUD*	TIPO	PERIODO EVALUADO
-68.2592	10.1697	1368	Bejuma Panamericana	650	PR	1961-93
-68.0500	9.6500	2349	El Pao Oficina	128	C2	1951-97
-68.5750	9.6408	2358	El Retazo	140	PR	1968-99
-68.2583	9.6553	2348	Morita Caserío	122	PR	1956-99
-68.1122	9.7603	2338	Pao Planta	178	PR	1951-99
-68.4000	9.7033	2336	Tinaco	141	PR	1952-99

Fuente: MinAmb seccional Cojedes citado por Paredes (2009).

La precipitación media anual en el estado, oscila entre 1.100 mm y 1460 mm, sin embargo se presenta una disminución bastante considerable al Norte del Municipio Paso San Juan Bautista, donde la precipitación anual se encuentra por debajo de 1280 mm (Paredes, 2009).Caso contrario ocurre con el eje comprendido desde Tinaco a

Cojeditos, el cual se caracteriza por ser la zona más húmeda del estado, con precipitaciones anuales que varían entre 1430 y 1460 mm (Paredes, 2009).

La mayor parte del año, los vientos Alisios llegan a Cojedes del Este. La orografía probablemente hace que una parte de esta corriente de aire ascienda por las serranías del Norte antes de internarse al sur de los estados Yaracuy y Carabobo. Este mecanismo promueve abundantes lluvias en el eje Tinaco.-Cojeditos y condiciones ligeramente secas al Sur de Yaracuy y Carabobo (efecto de sombra pluviométrica), (Paredes, 2009).

De manera general, se puede destacar que el mes de abril es donde se observa un aumento de las lluvias en todo el Estado, siendo en el mes de mayo, donde se presenta mayor precipitación en los municipios San Carlos, Cojeditos y Tinaco, en comparación con el resto de los municipios; dando inicio a la temporada de lluvias en la mayor parte del Estado y extendiéndose hasta el mes de octubre (Paredes, 2009).

En una investigación realizada por Paredes (2009), correlacionó la precipitación mensual de 12 estaciones pluviométricas con datos confiables, los cuales reflejaban una data continua con más de 30 años, y un factor de ajuste del 2 % o menos para años incompletos y un 10% o menos para meses faltantes, con los disturbios de las VM en los océanos pacífico meridional y atlántico subtropical, en el periodo de tiempo comprendido del año 1970 al año 1983. Los resultados reflejaron que la relación más significativa se encuentra entre la temperatura superficial del Atlántico subtropical norte y sur, y las precipitaciones en la ciudad capital del estado Cojedes (Tabla 3) (Citado por Millano 2017).

Tabla 3

Relación entre la temperatura del Atlántico subtropical norte y sur, con las precipitaciones en la capital de Cojedes.

Atlántico norte	Atlántico sur	Probabilidad	Efecto
Caliente	Frio	1/3	Intensificación de las lluvias
Caliente	Caliente	17/168	Indefinido
Frio	Caliente	13/56	Merma de las Lluvias
Frio	Frio	1/3	Indefinido

Fuente: (Paredes 2009 citado por Millano, 2017)

### 2.2.5 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El debilitamiento gradual del verdor en el dosel arbóreo superior de la vegetación es percibida por cualquier sensor remoto óptico (e.g., OLI en el caso de Landsat 8), como una sutil variación en la intensidad de la radiación que emite la vegetación en las bandas rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético (Sellers, 1985). En efecto, cuando la vegetación esta saludable, no tiene restricción de humedad, ni es afectada por un agente biótico (i.e., hongos e insectos), muestra una alta absorbancia de radiación visible en la banda del rojo debido a los pigmentos clorofílicos presentes en las hojas (radiación fotosintética activa), y una alta dispersión en la región espectral del infrarrojo cercano como resultado de la estructura celular que conforman el follaje. Este rasgo permitió a Tucker (1979) formular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual toma en cuenta los valores de reflectancia en las bandas rojo e infrarrojo cercano como sigue:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IRN} - \text{RED}}{\text{IRN} + \text{RED}} \quad (1)$$

Dónde: IRN es la reflectancia fraccional en la región espectral del infrarrojo cercano (adimensional), y RED es la reflectancia fraccional en la región espectral visible del color rojo (adimensional).

El valor numérico que muestra el NDVI varía desde -1 hasta 1, y en un sentido amplio, se interpreta de la siguiente manera: (i)  $\text{NDVI} \leq 0$  corresponde a cuerpos de agua o nubes; (ii)  $0 < \text{NDVI} < 0.2$  se asocia a un suelo desnudo o vegetación muerta; (iii)  $0.2 \leq \text{NDVI} < 0.4$  coincide con una vegetación dispersa o poco vigorosa; (iv)  $0.4 \leq \text{NDVI} < 0.6$  se relaciona con una vegetación abundante y vigorosa; y (v)  $\text{NDVI} \geq 0.6$  corresponde a un vegetación muy densa y vigorosa (Kogan, 1995). La forma como varía el NDVI según el balance general de reflectancia que se dé entre el IRN (nearinfrared, en inglés) y RED a nivel del dosel, se muestra en la Figura 10.

Una sequía puede inducir una reducción gradual del NDVI que se mantiene en el tiempo, hasta tanto el nivel de humedad en la zona radicular no se recupere. Sin

embargo, es importante advertir que la variación temporal del NDVI durante un episodio seco, depende del tipo de vegetación analizada, las características del suelo en la zona radicular y la intensidad de la sequía (Huete et al., 2002). Por otro lado, debe enfatizarse que un déficit de nutrientes en el suelo, la incidencia de una enfermedad fúngica, viral o bacterial puede también producir valores bajos de NDVI ya sea por promover un marchitamiento en el dosel arbóreo superior o en algunos casos, su defoliación (Bravo et al., 2003).

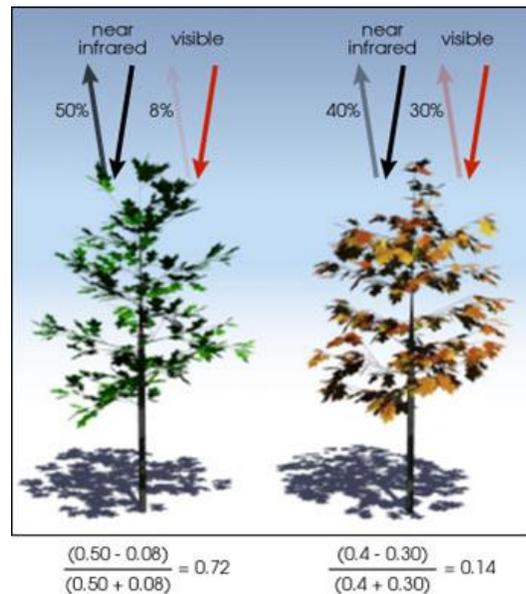


Figura 10. Comparación del NDVI bajo condiciones normales (izquierdo) y severamente seca (derecho).

Fuente: <https://go.nasa.gov/2LEKmJJ>

### 2.2.6 Sobre el NDVI derivado del satélite PROBA-V

Proba V (la letra V, hace alusión a vegetación) es el cuarto satélite de la serie PROBA liderada por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) cuya misión es el monitoreo de la vegetación global hasta mayo del 2018. De aquí en adelante, el monitoreo está siendo realizado por los satélites de la serie Sentinel 3. Proba V sigue una órbita heliosincrónica a una altitud de 820 km. Lleva un único instrumento óptico denominado en inglés 'vegetation' que pesa 33 kilogramos,

conformado por tres cámaras multispectrales. Su amplio campo de visión ( $107^\circ$ ) permite hacer un barrido a nivel de la superficie de 2.295 km con un tiempo de revisita de dos días a las 10:45 am (Goor et al., 2016).

El instrumento ‘vegetation’ observa la Tierra en cuatro bandas del espectro electromagnético: azul (0.440 - 0.487  $\mu\text{m}$ ), rojo (0.614 - 0.696  $\mu\text{m}$ ), infrarrojo cercano (0.772 - 0.902  $\mu\text{m}$ ) e infrarrojo de onda corta (1.570 - 1.635  $\mu\text{m}$ ). Las imágenes crudas de este instrumento son tomadas a una resolución espacial de entre 100 m y 180 m en nadir. En una primera etapa, estas son corregidas geoméricamente (i.e., se le asigna a cada pixel su longitud y latitud) y radiométricamente (i.e., el número digital para cada banda espectral se convierte en reflectancia física a nivel del tope de la atmósfera); seguidamente se proyectan (proyección geográfica WGS84 estándar, también conocida como Plate Carrée) y remuestran (i.e., se llevan a 300 m y 1 km respectivamente, usando una interpolación bi-cúbica extendida).

Hecho esto, se aplican diferentes algoritmos para identificar nubes, hielo, sombras de nubes para posteriormente enmascararlo (i.e., máscara binaria basada en presencia – no presencia), al final de esta etapa se aplica una corrección atmosférica que permite convertir la reflectancia a nivel del tope de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés), en reflectancia a nivel del dosel superior de la vegetación (TOC, por sus siglas en inglés).

Las imágenes resultantes de la etapa previa se convierten en NDVI en el TOC usando la ecuación 1. Luego, estas imágenes de NDVI se combinan a intervalos de 10 días (i.e., comenzando los días 1, 11 y 21 de cada mes) aplicando la técnica del valor máximo compuesto explicada en detalle en Tarpley et al. (1984), y que consiste en escoger el pixel con mayor valor de NDVI durante el periodo de agregación, resultando una imagen sintética libre de nubes y con valores de NDVI de muy alta calidad a 300 m o 1 km de resolución, respectivamente (Dierckx et al., 2014). Estos productos con alto valor agregado son finalmente disseminados a través del portal de distribución de productos Proba V.

### 2.2.7 El manejo forestal del *Eucalyptus* spp en DEFORSA II, S.A

El manejo forestal del eucalipto en DEFORSA comienza con la producción asexual de plántulas de eucalipto en el mini jardín clonal, bajo un esquema de hidroponía (Figura 11). Para la plantación de nuevas áreas o, áreas ya cosechadas, se producen las nuevas plantas con la técnica de clonación (Figura 12), la cual corresponde al 98% de la producción total, el otro dos por ciento (2%), corresponde a plantas provenientes de semilla para el programa de mejoramiento genético, y posterior hibridación entre especies de eucalipto (Leite de Souza et al. 2015). La producción de una planta tiene una duración de 90 días aproximadamente, desde la etapa de enraizamiento hasta la etapa de climatización.

El ciclo completo de producción está dividido en tres etapas, la inicial llamada invernadero o área de enraizamiento (Figura 13), donde las estacas provenientes de la técnica de clonación, desarrollan las raíces. Este proceso puede durar entre doce días y treinta días, dependiendo del material genético y la especie de la cual proviene el híbrido clonado. Una vez desarrollada la raíz la estaca es denominada plántula, la misma es transferida al área de sombra o conocida también, como área de rusificación (Figura 14); donde las plántulas se colocan bajo una malla filtro de luminosidad solar (incidencia directa de los rayos del sol), con un riguroso sistema de riego y fertilización, aquí las plántulas desarrollan nuevos pares de hojas, ganando altura y dureza en el tallo; el proceso de rusificación de una plántula, al igual que en el área de enraizamiento depende del material genético y puede durar hasta 30 días.

Por último se encuentra el área de sol, o como es conocido en algunas literaturas área de aclimatación (Figura 15). Aquí las plántulas ya transformadas en planta en el área de rusificación; deben tener una altura superior a los 25 cm aproximadamente y están expuestas a la incidencia de luz solar directa; el riego es más espaciado en frecuencia con respecto al área de rusificación y la fertilización es solo como complemento hasta el momento de ser despachadas a campo. El tiempo de duración de las plantas en el área de aclimatación, está dado por el cronograma de producción

de plantas y la fecha de inicio de la plantación que por lo general, comienza con el periodo lluvioso.

Las áreas destinadas a nuevas plantaciones, son preparadas bajo una técnica de mínima labranza (Leite de Souza, et al. 2015). Las áreas proveniente de la cosecha anterior, son mecanizadas cuidando de no retirar las hojas ni la corteza dejadas en la parcelas luego del proceso de cosecha, esto con la finalidad de evitar la erosión de los suelos y dar un aporte nutricional al mismo tiempo (Leite de Souza, et al. 2015). La plantación se inicia en el mes de mayo, aprovechando al máximo el periodo lluvioso y así garantizar el desarrollo de las nuevas plantas. En Deforsa se practican dos tipos de plantación, la manual y la mecanizada, las cuales están vinculadas directamente con las condiciones de topografía del área destinada a plantación.



Figura 11. Mini Jardin Clonal.



Figura 12. Producción de estacas con la técnica de Clonación.



Figura 13. Área de enraizamiento.



Figura 14. Área de rustificación.



Figura 15. Área de aclimatación.

Las plantaciones destinadas para producción de pulpa son diseñadas usando una densidad de 1.111 plantas/ha, con un distanciamiento de 4,00 x 2,25 m ó 4,50 x 2,00 m (Leite de Souza, et al. 2015). Para los sistemas agrosilvopastoril implementados de igual forma en Deforsa, la densidad de plantación es de 250 plantas/ha y, la plantación para producción de madera destina aserrío, el distanciamiento corresponde a 4,00 x 10,00 m (Leite de Souza, et al. 2015). En el caso de plantaciones destinadas a producción de pulpa para papel, la cosecha se realiza con 7 años de edad; caso distinto, cuando la plantación es destinada a otros usos, lo cual extiende la edad de corte entre 8 y 12 años (Morante, 2017).

DEFORSA, comprometida con el ambiente y buscando maximizar la productividad de las plantaciones, lleva a cabo un esquema de mantenimiento de plantaciones comprendido en cuatro aspectos fundamentales; fertilización, control de maleza, control de plagas y enfermedades y por último, control de incendios forestales (Leite de Souza, et al. 2015). Este esquema ha garantizado la mitigación de los incendios forestales, preservando la diversidad de fauna presente en la zona de influencia, y al mismo tiempo, el rendimiento y sustentabilidad de sus plantaciones forestales con fines industriales.

En este mismo contexto, DEFORSA en busca de mitigar el nivel de ocurrencia de la hormiga cortadora *Atta* spp., (Bachaco), el cual es una de las plagas más críticas de las plantaciones de eucalipto, tanto en sus primeros dos años, como en plantaciones

adultas; estableció una metodología de control y de nivel de daño económico, basándose en parámetros obtenidos de datos levantados en campo y de los índices de sitio establecidos para cada parcela, lo cual genera una curva referencial de nivel de daño económico (Figura 16), la cual es empleada en la toma de decisiones en cuanto al control de dicha plaga. Esta metodología esta referenciada en un trabajo de investigación realizado en Brasil en el año 2008 por Silva de Souza, titulado Control de Hormigas Cortadoras *Atta spp.*, en plantaciones de Eucalipto en la región de Minas de Gerais, Brasil.

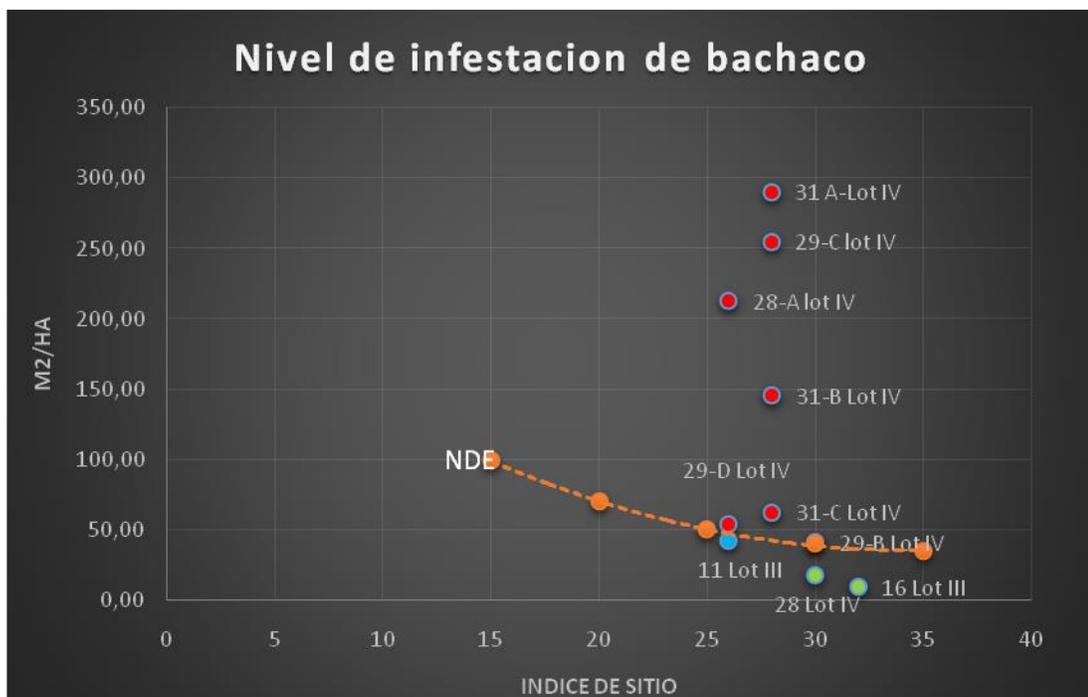


Figura 16. Curva referencial de nivel de daño económico para control de *Atta spp.*  
Fuente: DEFORSA.

Las plantaciones de eucalipto ya establecidas, demandan mantenimiento de maleza tanto químico, como manual, durante toda la etapa de desarrollo hasta alcanzar la edad de corte (alrededor de los 7 años en el caso de pulpa). El mantenimiento manual consiste en la limpieza (con machete o químico) de lo que se denomina el hilo, el cual es la línea recta de plantación donde se encuentran las

plantas, con un distanciamiento entre ellas, de 2,25 ó 2,50 m en el caso de plantaciones destinadas a madera para pulpa, esto con la finalidad de eliminar la maleza y evitar competencia nutricional.

El mantenimiento mecanizado se lleva a cabo con maquinaria e implementos agrícolas, por lo general se utiliza rotativas y en el caso de maleza más densa, rolo argentino; este mantenimiento es realizado en lo que denominados calle, lo cual es el espacio entre los hilos y por lo general, comprende un distanciamiento de 4,00 ó 4,50 m, en plantaciones destinadas a producción de madera para pulpa. La implementación de estas técnicas de mantenimiento, aportan gran contenido de potasio al suelo proveniente de la maleza seccionada por la rotativa, o en el caso de maleza más densa, por el rolo argentino.

Una plantación de eucalipto requiere de fertilización constante la cual se realiza en tres fases. La primera fase, pre plantación la cual se realiza al momento de preparación del suelo, la segunda fase es donde se realiza la fertilización al momento de instalar las plantas en campo y la tercera fase llamada fertilización de cobertura, la cual se aplica en dos etapas, la primera etapa a plantaciones de 1 (uno) año de edad y la segunda, cuando la plantación de eucalipto alcanza su segundo año (Morante 2017).

Una vez alcanzado las edades de cosecha en la densidad silvopastoril (1.111 plantas/ha), esta es realizada de forma mecanizada con una maquinaria conocida como Harvester. Existen dos marcas comerciales utilizadas en Deforsa, la John deere y la Komatsu; estas máquinas cumplen 5 funciones al momento de la cosecha en un tiempo promedio de 56 segundos por árbol (Morante 2017), las cuales son: corte del árbol a una altura no mayor de 10 cm del suelo, desrame del árbol, descortezado, seccionado del árbol (por lo general 2,50 m por troza, para facilitar el transporte) y apilar las trozas seccionadas. La Harvester es operada por lo general de 8 a 9 horas al día en periodo seco (Morante 2017). Las trozas son enviadas a Paveca, para la fabricación de pulpa para papel (papel suave, toallín y servilleta) (Morante 2017).

Un aspecto de suma importancia en el manejo forestal dentro de las instalaciones de Deforsa, es el control de incendios, el cual comprende todas aquellas actividades orientadas a prevenir el número de incendios ocasionados de forma natural o, por intervención antrópica. El control de incendios en Deforsa consta de tres etapas la prevención, la detección y la extinción.

La prevención incluye la educación, la vigilancia y la normalización de todas aquellas actividades que impliquen riesgo de incendio. La empresa cuenta con una torre principal de observación (Torre I), la cual visualiza la totalidad de la finca en 360° gracias a su ubicación y altitud con respecto al área total. De allí se generan alertas tempranas de posibles focos de incendios para su posterior combate y control por la cuadrilla de prevención de incendio y un técnico de guardia, designado para tales funciones.

La extinción comprende el desarrollo planificado y ordenado de las acciones orientadas a contener, combatir y extinguir el fuego, bien sea por métodos directos o indirectos. Se cuenta con equipos propios para las labores de detección y combate, conformado por un centro de operaciones, un sistema de detección de incendios apoyado en torres ubicadas estratégicamente, sistema de comunicación por radios y una red de cortafuegos en cada lote y parcelas del proyecto.

Se mantienen un inventario mínimo de equipos conformados por un carro bomba de 10.000 l., un tornado de 8.500 l., bastidores, machetes, limas, rastrillos, escardillas, bombas, asperjadoras de espaldas, quemadores, tanques de agua con capacidad para 10.000 – 20.000 l., ubicados en sitios estratégicos, motobombas, moto sierras, una rastra, 01 tractor y 01 vehículo para la movilización del personal y además de los equipos de protección personal. Se cuenta con un centro principal (Edificio Administrativo) de operaciones ubicado en la finca DEFORSA y un sistema de radiocomunicaciones para la cobertura total y rápida comunicación con todo el personal.

### 2.2.8 Prácticas culturales aplicadas a las plantaciones de *Eucalyptus* spp. en DEFORSA II, S.A

En DEFORSA las actividades de cuidados culturales aplicadas a las plantaciones de Eucalipto son realizadas por el departamento que lleva su mismo nombre, es decir, departamento de cuidados culturales bajo la dirección de la gerencia de operaciones Forestales. Todas estas actividades abarcan el mantenimiento y fertilización general desde el momento que se inicia la plantación hasta el momento de cosecha y aprovechamiento de la madera. A continuación se dará una explicación general basado en el Programa de Seguridad y Salud Laboral desarrollado en DEFORSA.

-Plantación: Proceso mediante el cual son trasplantadas a suelo previamente preparado, las plantas producidas en vivero. Las labores de plantación están limitadas por las condiciones climáticas al período comprendido entre los meses de abril a mayo, aproximadamente. El suelo requiere una buena preparación hasta una profundidad de unos 30 cm.

-Preparo de suelo: El laboreo mecanizado de la tierra comprende un conjunto de prácticas de uso generalizado en la zona o área de plantación, por lo que no ofrece limitaciones desde el punto de vista tecnológico. El tiempo de ejecución para dichas labores va desde finales del periodo seco a inicios del periodo de lluvias, ya que las condiciones de excesiva humedad en el suelo, alta pendiente y el relieve local accidentado dificultan este tipo de operaciones. Conviene señalar que, se utiliza el sistema de labranza mínima, preparando solo el hilo de plantación para evitar la erosión. La Preparación mecanizada de la tierra en el área a plantar que comprende básicamente, aunque no siempre, las actividades de pase de big-rome, rastra, subsolador y encamellonado, con el objeto de mejorar las condiciones del suelo para garantizar la calidad de siembra y el desarrollo de la planta.

Con el pase del big-rome (implemento agrícola para el cual se requiere de un tractor) se mejora la estructura del suelo rompiendo uniformemente la compactación hasta una profundidad de 30 a 40 cm. El rastreado rompe las estructuras gruesas

dejadas por el big-rome, uniformiza la estructura superficial hasta una profundidad de 20 a 30 cm, permitiendo además, la incorporación de restos vegetales. Con la técnica del subsolado se penetran los horizontes profundos de los suelos con problemas de compactación, con la cual se facilita la penetración radical e incrementa la capacidad de infiltración del agua.

El encamellonado o lomado por llamarlo de otra forma, consiste en voltear someramente la tierra y acumular montículos lineales cada 4 m. según la densidad de plantación establecida, siguiendo la pendiente. Mediante esta actividad se corrige la escorrentía superficial y se favorece la infiltración, así como también, la incorporación de materia orgánica al suelo destinado a plantación.

Fertilización: El proceso consiste en la aplicación manual de fertilizante de manera puntual. Así como mecánico con el equipo lomador solo en pre-plantación, con el fin de aportar los nutrientes requeridos por el *Eucalyptus spp* los cuales resultaron en cantidades deficitarias en los análisis realizados de suelos. Pre plantación se aplica cal dolomía espolvoreada en el área, otro producto de uso en las plantaciones forestales como fertilizante, es el Fosfopoder, el cual se aplica de tres (3) maneras; la primera va dirigida al fondo del hoyo (donde se dispone la planta de *Eucalyptus spp.*, de 3 a 5 cm debajo de las raíces. La segunda es aplicada al momento del lomado o preparación previa del terreno; al centro de la loma incorporado con los discos. Por ultimo puede ser aplicado al momento del subsolado, en la línea del surco lo más profundo posible.

Al cumplir un mes la plantación, se depositan 100 gr. por planta de formula completa (10-26-26 ó 12-24-12) a una distancia de 20 cm de la planta, en una zanja (por así llamarlo) con una profundidad de 5 cm por 30 cm de largo. A los 120-150 días se aplica un producto llamado fertibor (o similar) a razón de 16 gr. por planta espolvoreado en círculo de 80 a 100 cm de la planta. Al año se aplica 21-05-23; sulfato de amonio y fertibor espolvoreado en círculo, 80 a 100 cm de la planta. Esta operación se repite una vez al año hasta que el lote de plantación cumpla 2 años de edad.

Control de maleza: comprende un conjunto de actividades destinadas a eliminar de ser posible el 100% de todo tipo de maleza indeseable en la plantación, por representar una competencia bien sea, por nutriente, luz solar, agua, entre otros. Las actividades que conforman el plan de control de maleza son: 1) Macheteo al hilo, el cual consiste en eliminar de forma manual toda la maleza que compita con la planta causando un desequilibrio en su desarrollo natural. Esta actividad se realiza durante toda la etapa de la plantación, es decir, desde que se inicia hasta llegada la edad de cosecha. 2) platoneo, consiste en eliminar la maleza que compite con la planta en el espacio del hilo por los nutrientes disponibles en el suelo; este control es de tipo manual. 3) Mecanizada, se realiza utilizando maquinaria y equipos agrícolas, tales como, rotativa, rolo argentino, entre otros; que se encargan de eliminar o seccionar la maleza dispuesta en las calles (espacio entre hilos plantados), incorporándolos nuevamente al suelo, los cuales sirven como fuente de potasio y son aprovechados por las plantas de eucalipto en crecimiento (Navegante, O. febrero 05, 2019. Com. Personal). 4) control químico, se realiza de forma manual y mecanizado en etapa de pre-emergente y post-emergente; siendo en la primera etapa la utilización de un herbicida que elimine la maleza antes de que esta emerja y sea competencia para la plantación en desarrollo.

Control de plagas y enfermedades, actividad que esta direccionada a combatir mediante productos químicos y biológicos aquellos agentes, capaces de causar daño a las plantaciones, principalmente en su etapa inicial de desarrollo. Las plagas de mayor incidencia son: LEPIDOPTERAS tales como *Pseudodirphia albosignata*, *Thirintaina arnobia*, *Periphoba hircia*; HYMENOPTERAS (Bachacos) *Atta laenigata*, *Atta sexdens rubripilosa*. En el control ~~para la~~ de lepidoptera se utilizan aplicaciones aéreas con equipo de fumigación micronair, aplicando Dipel insecticida biológico (*Bacillus thurigiensis*) + Aceite roció blanco + Cymbush. Los bachacos son controlados con cebo granulado Mirex o Blitz a razón de 20 gr/m<sup>2</sup> ~~por m<sup>2</sup>~~ de cada bachaquero. En la época de lluvia se aplica Attilan o Lorban en polvo empleando insufladoras.

### 2.2.9 Detección de cambios de tendencia y estacionales en series de NDVI

Dado que los valores secuenciales del NDVI en el dosel superior está relacionado con la salud de los árboles plantados que son monitoreados desde el espacio, el deterioro de su salud debido a la incidencia de un agente biótico o abiótico puede verse reflejado por sutiles cambios en la variación estacional en la serie temporal del NDVI o su tendencia a corto y mediano plazo. Como regla general, los cambios estacionales son causados por variaciones climáticas (e.g., sequías o lluvias persistentes), mientras que los cambios abruptos en la tendencia son desencadenados por la presencia de plagas, enfermedades o incendios forestales (Stone et al., 2013).

Existen una amplia variedad de técnicas estadísticas para descomponer las series temporales de NDVI con el fin de detectar y caracterizar estos cambios, entre las cuales destaca por su robustez, el enfoque de pausas estacionales y tendenciales, mejor conocido por su acrónimo en inglés BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend), desarrollado por Verbesselt et al. (2010). BFAST realiza una descomposición aditiva de la serie temporal de NDVI en sus componentes de tendencia, estacional y un remanente usando un algoritmo iterativo que es capaz de detectar cambios en la serie analizada. Así pues, BFAST provee información sobre el momento en que se presenta el cambio y la cantidad de cambios que ocurren a lo largo de la serie analizada. Además, BFAST caracteriza los cambios según su magnitud y dirección.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Tipo de investigación

Esta investigación se enmarca en el paradigma positivista (Gutiérrez, 2017). Por otro lado, tiene aspectos propios tanto de los estudios descriptivos como de los correlacionales. En cuanto a la dimensión temporal, se categoriza como una investigación longitudinal (Hernández et al., 2006). El periodo de estudio abarcó desde mayo del año 2017 hasta mayo del año 2019, en plantaciones de *Eucalyptus* spp., establecida en mayo de 2017; todo esto permitió recolectar los datos suficientes para valorar el NDVI en el monitoreo de la salud forestal en plantaciones comerciales de eucalipto; especialmente cuando estas presentaron afectaciones bióticas y abióticas.

#### 3.2 Unidad de Estudio

Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A. (DEFORSA) está ubicado a 13 kilómetros al sur de la ciudad de San Carlos, en la vía que conduce al sector conocido como el Totumo; la localización espacial de la finca, pertenece políticamente al Municipio Ezequiel Zamora (anteriormente conocido como Municipio San Carlos), el Municipio Tinaco y Municipio Rómulo Gallegos (Leite de Souza, et al. 2015). DEFORSA corresponde a un bosque seco tropical, según la clasificación de zonas de vida realizada por el Dr. Leslie R. Holdriegde y en base a las zonas fito-geográficas de Venezuela (Patiño Hoyos citado por Leite de Souza, et al. 2015). DEFORSA es una empresa destinada a la producción de madera para pulpa, la cual es suministrada a su filial Papeles Venezolanos (PAVECA), ubicada en el municipio Guacara del estado Carabobo, para la fabricación de papel suave (Morante, 2017); entre otros

productos en menor proporción como: estantillos, botalones, madera para aserrío y estructurales, y carbón vegetal.

La finca abarca un área de 10.742 ha, de la cual en su mayoría, el uso de los suelos está dado por las plantaciones de Eucalipto en distintas densidades (Morante 2017); cuenta con área de bosques naturales, agrosilvopastoril, uso pecuario, infraestructuras (carreteras y oficinas), (Morante 2017). DEFORSA territorialmente está dividida en 5 lotes, los cuales a su vez están divididos por parcelas; las parcelas son agrupadas según estudio taxonómico de suelo, en unidades de manejo, las cuales van desde la unidad de manejo uno (los mejores suelos), hasta la unidad de manejo cuatro (suelos más limitados y con problemas de anegamiento).

Los datos de precipitación tomados en DEFORSA, cuentan con tres (3) estaciones fijas, y cuatro (4) estaciones móviles, llamadas así debido a que se trasladan de un punto a otro según cronograma de plantación. Las estaciones identificadas como vigilancia uno (1), torre (1) y vivero central (Tabla 4), cuentan con registros pluviométricos que datan del año 1.997, siendo denominadas estaciones fijas y poseen datos de precipitación altamente confiables. Es notorio resaltar, que la precipitación acumulada de mayor valor, en DEFORSA, fue registrada en el año 2004 con un total de 1.868,6 mm y una duración de 178 días (Tabla 5).

Tabla 4

Estaciones pluviométricas en Deforsa.

ESTACIÓN	ESTE	NORTE	CONDICIÓN.
Vigilancia I	552342	1060730	Estación fija
Torre I	556679	1055793	Estación fija
Vivero Central	553907	1056709	Estación fija
Lote I	549982	1058622	Estación móvil
Lote III (Búfalo)	550604	1055802	Estación móvil
Lote V (pedrita)	559810	1058724	Estación móvil
Lote V (parcela 21)	553888	1056782	Estación móvil

Ubicación georeferenciada de las estaciones pluviométricas ubicadas en DEFORSA.

Para efecto de la presente investigación, se tomaron en cuenta los datos de precipitación de la estación móvil Lote I; ya que esta fue instalada en el año de

plantación de las parcelas objetos de estudio (parcela 21, 25 y 26); las cuales pertenecen a la unidad de manejo II; en este contexto, se seleccionaron tres regiones de interés (RDI) dentro del predio ocupado por DEFORSA, específicamente en el área identificada como lote uno (lote I), parcelas 21, 25 y 26; las cuales están agrupadas en la unidad de manejo II.

Los criterios tomados en consideración son: i) los eucaliptos se deben haber plantado en el año 2017; ii) el lote presenta un manejo silvopastoril con eucalipto en densidad de esquema plantación para pulpa (1.111 plantas/ha); iii) el lote contiene solamente plantas de eucalipto; iv) la superficie ocupada por el lote supera las 10 hectáreas; v) los lotes vecinos deben cumplir con los criterios i, ii y iii; vi) el lote debe contar con información detallada sobre los agentes bióticos y abióticos que lo han afectado (i.e., fecha, descripción del evento, fotografías, entre otros). Las tres RDI conformaron la unidad de estudio.

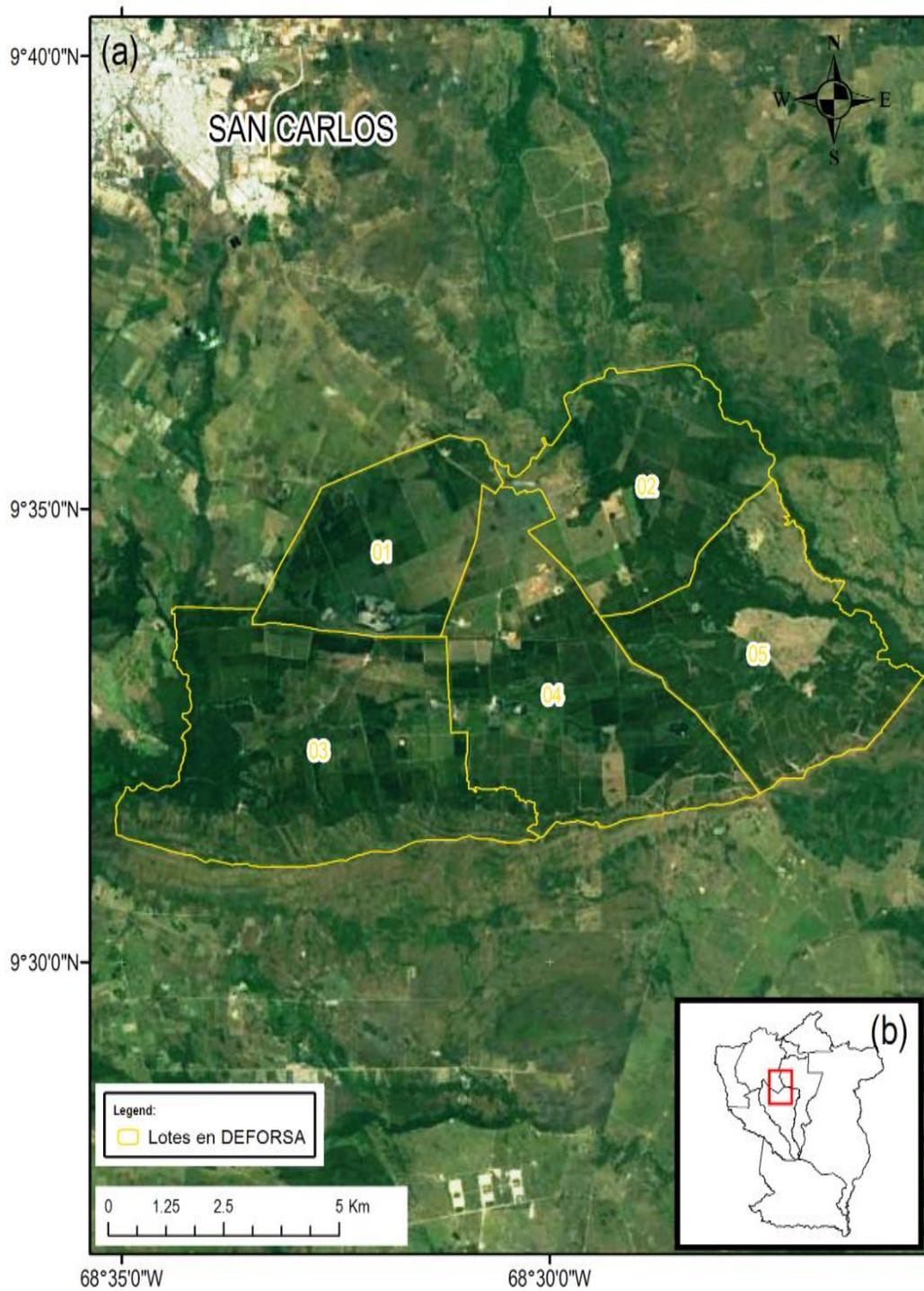


Figura 17. DEFORSA mostrando: (a) los sub-lotes en que se divide internamente; y (b) su ubicación geográfica relativa al estado Cojedes.

Fuente: Adaptado, empleando como fondo una escena tomada de Google Earth™

### 3.3 Fases de la Investigación

Fase I. Descripción de la variación estacional del NDVI: se descargó el producto operacional S10 TOC NDVI - 300 m C1 del portal web de diseminación de VITO (disponible en <http://www.vito-eodata.be/>), para el periodo de estudio (i.e., 05/2017 – 06/2019). Este producto contiene imágenes sintéticas del NDVI para una agregación de 10 días (i.e., comenzando los días 1, 11 y 21 de cada mes), las cuales cubren gran parte de los llanos centro-occidentales. Luego, se extrajeron y promediaron los valores de NDVI en cada RDI usando una media aritmética no ponderada, resultando una serie temporal de 36 valores por año de NDVI. Para cada RDI, se calculó la media mensual del NDVI y seguido, se graficaron para describir su variación estacional. También se determinaron los valores máximos, mínimos y el coeficiente de variación para establecer similitudes y diferencias entre los RDI en términos de NDVI.

Fase II. Exploración de la relación temporal entre el NDVI y la precipitación a escala decenal: a partir de los registros pluviométricos disponibles en DEFORSA, se calculó la precipitación acumulada decenal durante el periodo de estudio, considerando un inicio y un término, coincidente con los del producto S10 TOC NDVI - 300 m C1 (i.e., comenzando los días 1, 11 y 21 de cada mes). Luego, se calculó el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre las series decenales de precipitación y NDVI para cada RDI, así como su significancia estadística. De esta manera se investigó cuanto de la variabilidad temporal del NDVI puede ser atribuida a la variabilidad de la precipitación. Es decir, cuan relevante es el aporte de las lluvias a la salud general de la plantación.

Fase III. Comparación de los puntos de cambios estacionales y tendencias en las series decenales de NDVI y precipitación: en este punto, las series decenales de NDVI y precipitación para cada RDI fueron analizadas con la técnica BFAST, con el objeto de identificar los puntos de cambios tendencias y estacionales a lo largo del periodo de estudio. Seguido, se averiguó si los cambios en tendencia o estacionales,

en la señal de NDVI promediada en los RDI son inducidas por las variaciones en la precipitación.

Para ello, se verificó si los momentos en que dan dichos cambios en las series de NDVI y precipitación, son temporalmente coincidentes. Adicionalmente, se examinó si los eventos desencadenados por agentes bióticos y abióticos en los RDI se ven reflejado por cambios en el NDVI. De esta forma, se discernió cuan influyente son los agentes bióticos y abióticos sobre la salud general de la plantación en término de su respuesta fenológica a nivel del dosel, y por tanto, el NDVI.

## CAPÍTULO IV

### DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El comportamiento tendencial de NDVI a lo largo del periodo estudiado, corresponde a dos factores principales, los cuales pueden ser considerados como el desarrollo natural del eucalipto, así como, la precipitación presente en la región, aunque también se estudió la relación de actividades de cuidados culturales realizadas a las RDI, no se encontró relación aparente entre la dinámica de NDVI y dichas actividades, así como la ausencia de afectación por agentes bióticos y abióticos. Entre sus objetivos, los índices de vegetación tienden a resaltar la respuesta espectral de la vegetación con relación al suelo y otros blancos de la superficie terrestre, esto se debe al comportamiento antagónico de la reflectancia de la vegetación en las regiones espectrales del infrarrojo cercano y del visible (Ponzoni y Shimabukuro citado por Godoy, Nunes, Araujo y Soares, 2016).

En similitud con lo expresado por Millano (2017), los valores promedios más bajos de NDVI se registraron en periodo seco y los promedios más altos en el periodo lluviosos. Para las tres RDI el comportamiento de NDVI analizado mediante imágenes satelitales tomadas de PROBA V, se mantuvo de forma similar, en este sentido, si es asociado con el desarrollo normal de la plantación (crecimiento), va desde un NDVI bajo al momento de iniciada la plantación, hasta valores más altos en el periodo lluvioso, así como también pasado los primeros 16 días de instalada la plantación los valores de NDVI son altos; luego se observa un decaimiento temporal entre el día 64 y el día 96, lo que corresponde a la disminución de las precipitaciones en la región; así de esta forma, continua la fluctuación según el periodo del año (seco y lluvioso) y el desarrollo de la plantación.

#### 4.1 Descripción de la variación temporal del NDVI, en una plantación forestal de eucalipto en la empresa Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A. estado Cojedes.

Inicialmente se realizó el cálculo de promedio de NDVI máximo cada 16 días para las tres RDI, en el periodo comprendido de mayo 2017 a junio 2019. Cabe destacar que en un periodo de 10 días, el satélite captura 5 imágenes. Estas imágenes están formadas por píxeles. Se calcula el NDVI en todas ellas, pero luego, se toma en cuenta aquellos píxeles donde el NDVI es más alto, porque de esa forma se esperaría que la imagen resultante tenga la probabilidad más baja de estar contaminadas por nubes. Se computó el promedio aritmético, el valor mínimo y el valor máximo, así como la amplitud de variación de NDVI para la serie de tiempo establecido, asumiendo que la muestra corresponde a una población con distribución normal de Gauss.

La figura 18, muestra el comportamiento de NDVI en las tres regiones de interés (RDI) para el periodo de estudio seleccionado. Es notorio el comportamiento fluctuante durante el desarrollo de la serie; lo cual corresponde a la respuesta de NDVI a las temporadas secas y lluviosas a lo largo del periodo de estudio. Aquellos valores donde el NDVI cae abruptamente, pueden estar asociados a imágenes contaminadas o cubiertas de nube (Millano, 2017).

Se pudo discernir de forma general, por lo mostrado en las figuras 19, 20 y 21, que el comportamiento de NDVI para las RDI seleccionadas (parcela 21, 25 y 26), relacionado a la precipitación (mm), responde perfectamente al comportamiento del eucalipto en la etapa de desarrollo de los dos primeros años (Navegante, O. febrero 05, 2019. Com. Personal).

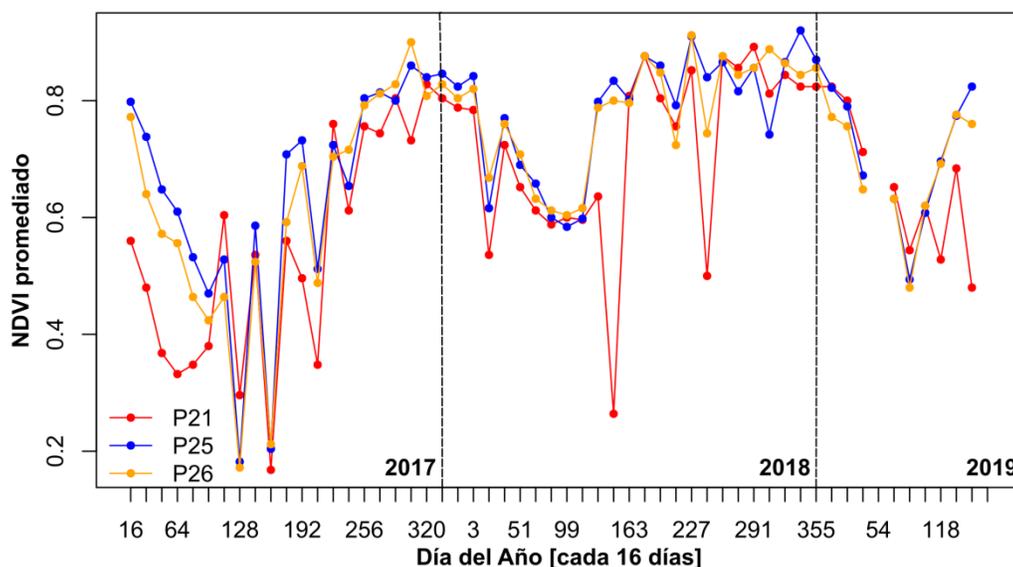


Figura 18. NDVI promediado espacialmente sobre las parcelas P21 (línea de color rojo), P25 (línea de color azul) y P26 (línea de color naranja) desde el 16/01/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días.

Para cada año de la serie estudiada, los valores mínimos y máximo de NDVI corresponden a los valores extremos encontrados, en este sentido, la amplitud corresponde a la diferencia ente el valor mínimo y máximo de NDVI para cada año en el periodo de tiempo establecido para el estudio. Se realizó la descripción de cómo fue la variación de NDVI cada año del periodo de estudio.

La tabla 5, presenta los resultados de las series temporales de NDVI promediado cada 16 días sobres las RDI, donde se observa que el NDVI máximo para las parcelas 25 y 26 son muy cercanos al valor de uno (1,00); siendo el valor de NDVI de la parcela 21 inferior a los anteriores (0,892), pero aun cercano al valor de uno (1,00). De igual forma se refleja el NDVI promedio, donde se repite similar comportamiento entre las parcelas 25 y 26 presentando valores de NDVI muy similares 0,717 y 0,701 respectivamente, a diferencia de la parcela 21 con un valor de NDVI promedio de 0,642; siendo todos los valores superiores a 0,40, indicativo de una vegetación activa (Millano, 2017).

Tabla 5

Principales estadísticos de las series temporales del NDVI promediado cada 16 días sobre las parcelas P21, P25 y P26 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019.

	Parcela P21	Parcela P25	Parcela P26
NDVI mínimo	0.168	0.182	0.172
NDVI promedio	0.642	0.717	0.701
NDVI mediana	0.652	0.772	0.750
NDVI máximo	0.892	0.920	0.912

En la tabla 6 se muestra los valores del coeficiente de correlación de Pearson derivado de las series temporales de NDVI. Los datos arrojan un valor de  $r$  para las parcelas 25 y 26 muy cercanos a uno ( $r = 0,963$ ). Ya que las tres parcelas están ubicadas en un mismo lote (lote I), con un tipo de suelo muy similar el cual agrupa las tres RDI en unidad de manejo II, se puede atribuir el resultado de la alta correlación responde al tipo de clon plantado. En efecto estas parcelas tienen un diseño de parcela monoclonal (un solo clon plantado) así como una capacidad de drenaje similar.

El análisis de correlación lineal entre la parcela 21 y 25 arroja un valor de  $r = 0,735$  el cual sigue siendo cercano al valor de uno (1,00) pero no tanto como la correlación anterior. Este comportamiento puede responder al tipo de plantación utilizado en la parcela, la cual fue destinada para una plantación de ensayo piloto, compuesto por varios clones (plantación multiclona). Aunque los clones son híbridos en su mayoría de especies *E. urophylla*, responden de forma distinta a las condiciones edafoclimáticas de la región.

Tabla 6

Coefficiente de correlación lineal de Pearson derivado de la comparación de las series temporales del NDVI promediado cada 16 días sobre las parcelas P21, P25 y P26 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019.

	Parcela P21	Parcela P25	Parcela P26
Parcela P21	1.000	0.735	0.793
Parcela P25	0.735	1.000	0.963
Parcela P26	0.793	0.963	1.000

#### 4.2 Acoplamiento entre el NDVI y la precipitación en una plantación forestal de eucalipto en la empresa Desarrollos Forestales San Carlos II, S.A. Estado Cojedes.

Previamente se contrastaron los valores de NDVI máximo con los valores de precipitación tomados en el área de estudio, para el periodo mayo 2017 hasta junio 2019, a intervalos de 16 días. Los resultados fueron analizados tomando en cuenta la magnitud de la correlación y su signo.

En la figura 19 se presenta la relación entre el NDVI y la precipitación acumulada recopilada en las RDI durante el periodo de estudio. Aunque los valores de precipitación disminuyen desde el día 336 correspondiente al año 2017 hasta el día 99 correspondiente al año 2018 para la parcela 21, los valores de NDVI se mantienen sobre el valor de 0.4, lo cual evidencia una cobertura vegetal activa (Millano, 2017) (valores por encima de 0.40 en toda la serie, a excepción de aquellos puntos donde se presume contaminación por nube; similar comportamiento se presenta en las parcelas 25 y 26 para el periodo de tiempo seleccionado).

De igual forma se pudiese asociar la no disminución de los valores de NDVI, a la respuesta natural del eucalipto en estado de estrés, el cual toma los nutrientes de las hojas más viejas y las lleva hacia las hojas más nuevas (parte superior del dosel) como mecanismo de defensa en periodos de sequía (Navegante, O. febrero 05, 2019. Com. Personal).

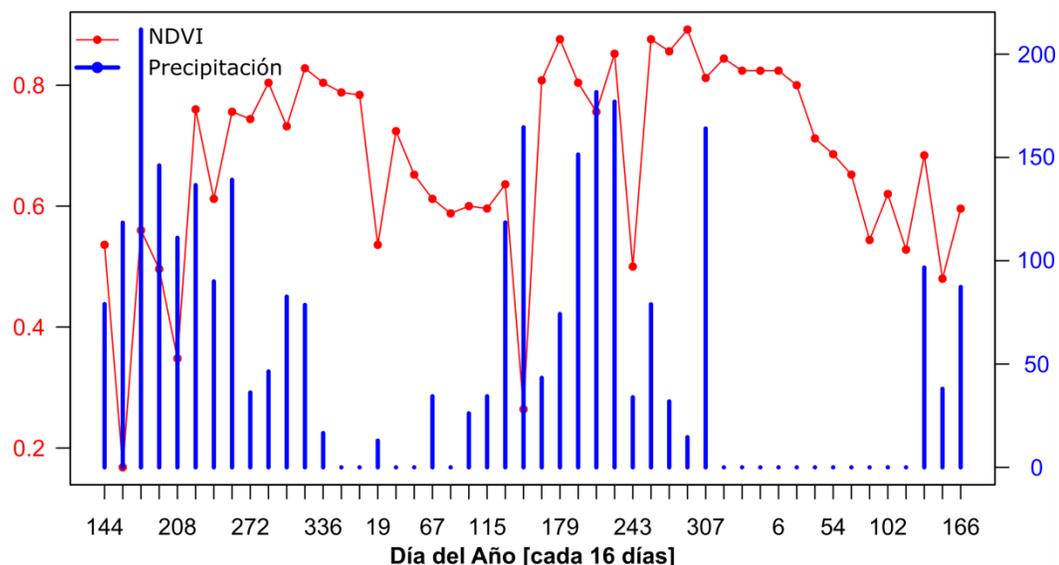


Figura 19. NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P21 (línea de color rojo) en contra la precipitación (barras de color azul) desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días. La precipitación se expresa en mm.

En la tabla 7 se presentan los valores del coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $R$ ) entre el NDVI y la precipitación en el periodo de estudio seleccionado en esta investigación. Sabiendo que el valor del coeficiente de correlación de Pearson varía entre  $[-1;1]$  donde el signo indica el sentido de la relación. Se nota que el NDVI y la precipitación alcanzan su mayor fuerza de correlación cuando se contrasta el NDVI para un periodo de 16 días, con la precipitación acumulada registrada en 80 días antes, es decir cinco periodos de dieciséis días previos (ej,  $5 \times 16 = 80$  días).

Tenga en cuenta que los valores de  $r$  iguales a uno (1,00) representan una relación lineal perfecta positiva y los valores iguales a menos uno (-1) representan la relación perfecta negativa. En este sentido, se resalta el desfase -2 el cual refleja un valor de  $R = 0,089$  determinando así una relación positiva, lo que se puede interpretar que a medida que aumenta el valor de una serie, también lo hace el valor de la otra, a excepción de los desfase cero (0) y menos uno (-1) donde los valores de  $R$  se encuentran en un rango negativo, determinando así una correlación negativa ( $-1 < r < 0$ ). En este sentido, la serie de precipitación seleccionada en un periodo de 16 días

cualquiera, tendrá su mayor influencia sobre los valores de NDVI, 80 días (5 x 16 = 80) más adelante.

Tabla 7

Coefficiente de correlación lineal de Pearson (R) entre el NDVI y la precipitación desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 en la parcela P21 para diferentes desfases temporales.

Desfase (intervalos de 16 días)	R [-]
-5	0.360
-4	0.333
-3	0.230
-2	0.089
-1	-0.154
0	-0.190

Nota: a manera de ejemplo, el desfase de -5 muestra el valor de R cuando se considera el NDVI en el momento 't' contra la precipitación acumulada expresada en mm en el momento 't - 5', donde 't' son periodos de 16 días.

La figura 20 muestra al igual que la parcela 21 (Figura 19), la relación entre NDVI y la precipitación acumulada por mes, para la parcela 25 en el periodo de estudio seleccionado. El comportamiento de la serie temporal de NDVI para la parcela 25 es muy similar al reflejado en la gráfica de la parcela 21 (Figura 19), a juzgar por este resultado, el eucalipto indiferentemente del clon utilizado en la plantación, está presentando el mismo comportamiento, bajo un mismo esquema de plantación. También se pueden observar días de la serie donde a pesar de poseer datos altos de precipitación, los valores de NDVI caen abruptamente debido muy probablemente a la contaminación por nube de las imágenes satelitales utilizadas.

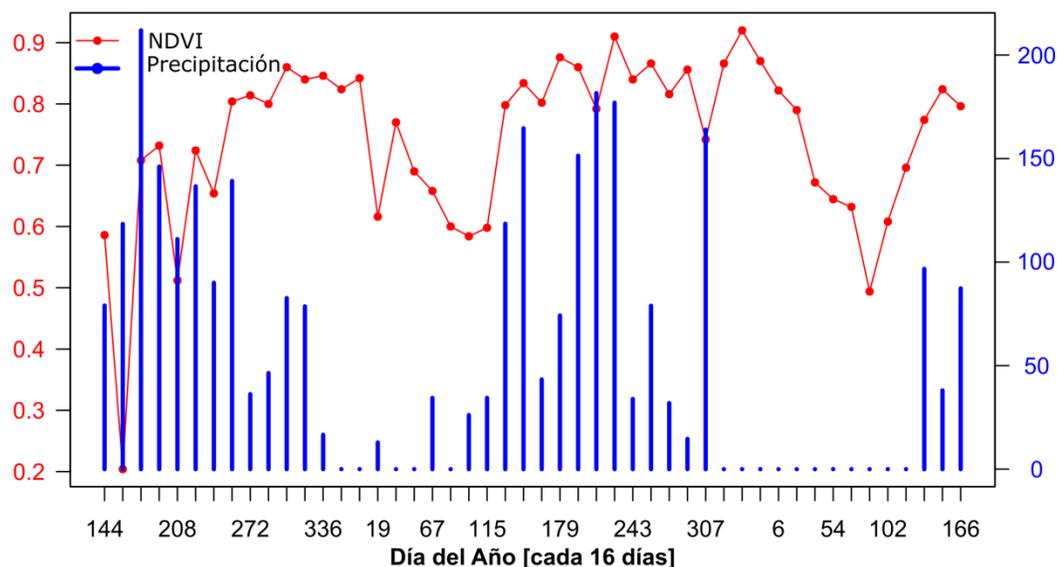


Figura 20. NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P25 (línea de color rojo) en contra la precipitación (barras de color azul) desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días. La precipitación se expresa en mm.

Para el coeficiente de correlación lineal de Pearson, correspondientes a la serie de NDVI y precipitación tomadas para la parcela 25 (tabla 8). Podemos describir un comportamiento en los valores de R que corresponden a una relación positiva en los 5 desfase considerados (desde el desfase 0 hasta -5), cabe destacar que el NDVI y la precipitación alcanzan su mayor fuerza de correlación cuando se contrasta el NDVI de un periodo de 16 días, con la precipitación acumulada registrada 80 días antes. Es decir, se manifiesta el mismo comportamiento observado en las parcelas restantes.

Aunque los valores no representan una correlación positiva perfecta, el aumento de los valores de una serie (precipitación) tiene un efecto de aumento constante en los valores de la serie de NDVI para cada desfase. Sabiendo que el valor del coeficiente de correlación de Pearson varía entre  $[-1;1]$  donde el signo indica el sentido de la relación.

Tabla 8

Coeficiente de correlación lineal de Pearson (R) entre el NDVI y la precipitación desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 en la parcela P25 para diferentes desfases temporales.

Desfase (intervalos de 16 días)	R [-]
-5	0.290
-4	0.242
-3	0.250
-2	0.225
-1	0.154
0	0.038

Nota: a manera de ejemplo, el desfase de -5 muestra el valor de R cuando se considera el NDVI en el momento 't' contra la precipitación acumulada expresada en mm en el momento 't - 5', donde 't' son periodos de 16 días.

La grafica mostrada en la figura 21 (parcela 26), corresponde a la relación entre valores de NDVI y la precipitación para esta RDI en particular. Se muestra un similar comportamiento en la plantación de eucalipto y su desarrollo natural con respecto a las dos RDI anteriores; aunque podemos destacar, que a pesar que las tres RDI mostraron un comportamiento similar en las series de NDVI con respecto a la precipitación, fue evidente pequeñas diferencias en el valor máximo del NDVI para ciertos momentos de la serie (periodo lluvioso) en las tres parcelas.

Una situación similar cuando se toma en cuenta los valores más bajos de NDVI presentes en la serie correspondiente a la parcela 26. Tal vez, esto se deba al clon seleccionado y su adaptabilidad a las condiciones edafoclimaticas presentes en la región, como también, con las características de suelo que conforman la unidad de manejo II (Arcilloso, amarillo-rojo con buena estructura y plántico). Es notorio que tanto las gráficas de la parcela 21 y 25 (Figura 19 y 20) presentan al igual que la gráfica de la parcela 26 (Figura 21) un decaimiento abrupto en el valor de NDVI para el día 160 de la serie en la etapa inicial, lo que confirma la contaminación por nube en la imagen satelital utilizada.

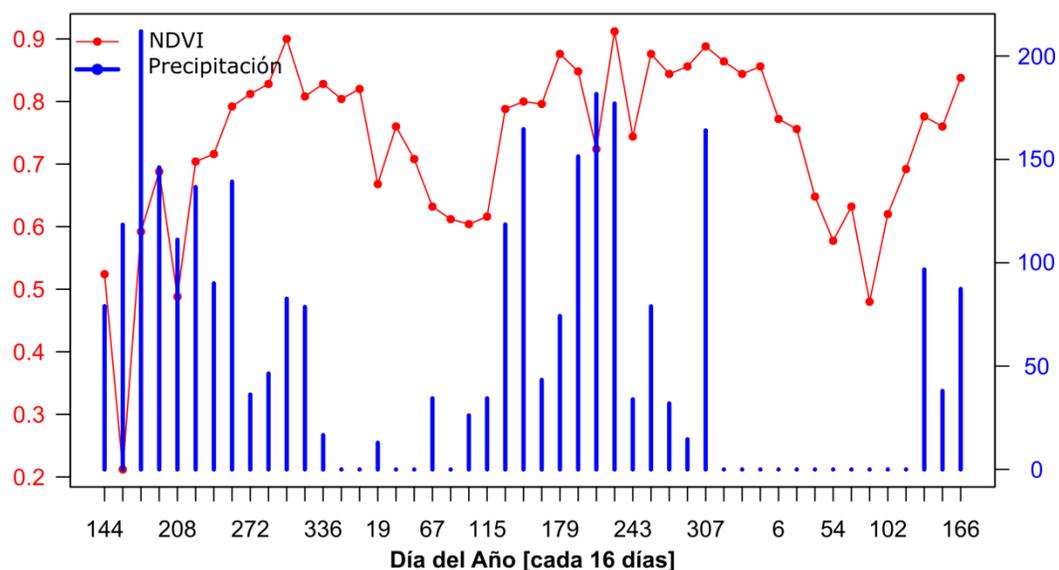


Figura 21. NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P26 (línea de color rojo) en contra la precipitación (barras de color azul) desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días. La precipitación se expresa en mm.

Los datos mostrados en la tabla 9 corresponden al coeficiente de correlación lineal de Pearson, calculados para la parcela 26. En todos los desfase mostrados (desde 0 hasta -5) se muestra una relación positiva mostrándose el valor de  $R = 0.181$  para el desfase -2 como el valor más alto de  $R$ ; este desfase en particular se puede interpretar, como el desfase donde la relación fue más directa, es decir, una dependencia de los valores correlacionados de las dos variables. Cabe destacar que en los coeficientes calculados para la parcela 25 y 26, no presentan valores de  $R$  negativos para ninguno de los desfase en ambas tablas, no así para los calculados en la parcela 21, donde el desfase cero (0) y el desfase -1 los valores de  $R$  son negativos; lo que se define como correlación negativa ( $-1 < r < 0$ ).

Tabla 9

Coefficiente de correlación lineal de Pearson (R) entre el NDVI y la precipitación desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 en la parcela P26 para diferentes desfases temporales.

Desfase (intervalos de 16 días)	R [-]
-5	0.358
-4	0.258
-3	0.280
-2	0.181
-1	0.076
0	0.032

Nota: a manera de ejemplo, el desfase de -5 muestra el valor de R cuando se considera el NDVI en el momento 't' contra la precipitación acumulada expresada en mm en el momento 't - 5', donde 't' son periodos de 16 días.

Al explorar el comportamiento de la precipitación recolectada en DEFORSA con una data de veinte y uno (21) años (figura 22), se evidencia una disminución de las mismas con respecto al año inicial donde fueron tomados los datos (1997). Existen valores altos de promedios de precipitación para el año 2004 y 2012, siendo bajos con respecto a los años ya mencionados, los valores correspondientes a los años 2009 y 2014, por último el promedio más bajo registrado corresponde al año 2018.

Dado el periodo de estudio comprendido entre mayo 2017 a junio 2019, es evidente que el año 2018, fue de poca precipitación en comparación con el año 2017 (año en el que se establecieron las muestras, sin embargo el comportamiento de la serie de NDVI fue muy similar en ambos años y el valor de NDVI se mantuvo sobre el valor estimado para una capa vegetal activa. Se pudiese interpretar, que los clones de eucalipto plantados en las RDI son resistentes a periodos de poca precipitación, manteniendo la actividad fotosintética.

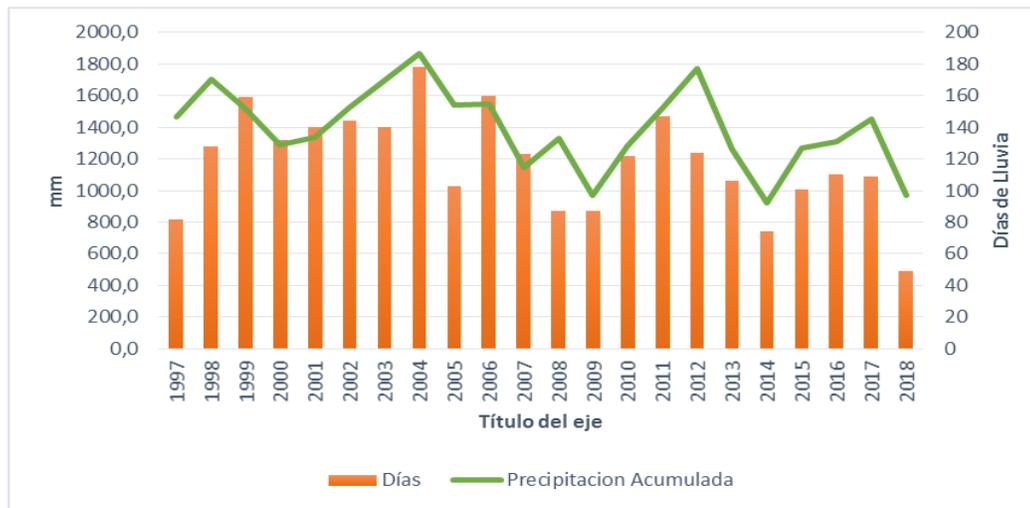


Figura 22. Comportamiento de la precipitación acumulada y duración en días por año, registrado en las estaciones pluviométricas en DEFORSA.

Fuente: Deforsa

La tabla 10, resume los valores promedios de precipitación para cada año recolectado en las estaciones pluviométrica de DEFORSA; se observa que el año con valor promedio de precipitación más alto es 2004 (resaltado en color amarillo), con valor de 1.868,6 mm y una duración distribuida en todo el periodo lluvioso de 178 días.

Tabla 10

Histórico de la precipitación acumulada en DEFORSA

Año	Precipitación Acumulada	Días
1997	1466,2	82
1998	1702,5	128
1999	1521,3	159
2000	1288,6	132
2001	1333,4	140
2002	1524,0	144
2003	1699,7	140
2004	1868,6	178
2005	1541,7	103
2006	1548,9	160
2007	1149,6	123
2008	1327,4	87
2009	971,9	87,0
2010	1284,9	122
2011	1520,1	147
2012	1774,9	124
2013	1263,0	106
2014	922,3	74
2015	1271,6	101,0
2016	1308,6	110
2017	1455,1	109
2018	966,9	49

Fuente: DEFORSA.

Los datos mostrados en la tabla 11, corresponde a la relación entre el valor de NDVI, la precipitación y las prácticas culturales aplicadas a las RDI objeto de estudio. El registro de las prácticas culturales aplicadas a cada parcela se realizó durante todo el periodo que duro el estudio. No se evidenció un aumento o disminución en los valores de NDVI durante las prácticas culturales aplicadas a las RDI, lo cual puede corresponder al tipo de práctica cultural aplicada. En DEFORSA

la nutrición de las plantaciones en su etapa inicial (los dos primeros años) es muy importante, ya que este es el periodo donde la planta de eucalipto se desarrolla rápidamente. Aunque el aporte de potasio al suelo puede estar dado por las hojas de maleza eliminada de las plantaciones y dejadas dentro de la parcela (Navegante O. 05 de febrero 2019. Com. Personal.).

Esto no se evidenció por lo menos en los valores de NDVI; sabiendo que el potasio se mueve desde las hojas viejas hacia los puntos de crecimiento (en la parte superior del dosel), por lo tanto es acumulado en el período de crecimiento; participando también en la fotosíntesis, ya que regula la apertura de los estomas permitiendo la asimilación del CO<sub>2</sub> y la salida de oxígeno (Larriva, 2003). Es oportuno resaltar que dentro de las prácticas culturales, no se realizó fertilización luego de establecidas las plantaciones contenidas en las RDI; por lo tanto las plantaciones se abastecieron de los nutrientes contenidos en el suelo de forma natural, así como posiblemente, de la descomposición de la maleza incorporada al suelo (luego de las distintas limpiezas manuales realizadas).

Tabla 11

Valor de NDVI promediado sobre las parcelas P21, P25 y P26 junto a la precipitación registrada y las prácticas culturales aplicadas

Día	Mes	Año	NDVI en P21	NDVI en P25	NDVI en P26	Pre. [mm]	PC en P21	PC en P25	PC en P26
24	5	2017	0.536	0.586	0.524	79.0			
9	6	2017	0.168	0.204	0.212	118.4	[1]		
25	6	2017	0.560	0.708	0.592	211.9	[1]	[4]	[4]
11	7	2017	0.496	0.732	0.688	146.1			
27	7	2017	0.348	0.512	0.488	111.1			
12	8	2017	0.760	0.724	0.704	136.6			
28	8	2017	0.612	0.654	0.716	90.0			
13	9	2017	0.756	0.804	0.792	139.2			
29	9	2017	0.744	0.814	0.812	36.2			
15	10	2017	0.804	0.800	0.828	46.4	[2]	[2]	
31	10	2017	0.732	0.860	0.900	82.6	[2]	[2]	
16	11	2017	0.828	0.840	0.808	78.6			
2	12	2017	0.804	0.846	0.828	16.6			
18	12	2017	0.788	0.824	0.804	0.0			
3	1	2018	0.784	0.842	0.820	0.0	[3]		
19	1	2018	0.536	0.616	0.668	12.9			
4	2	2018	0.724	0.770	0.760	0.0			
20	2	2018	0.652	0.690	0.708	0.0			
8	3	2018	0.612	0.658	0.632	34.4			
24	3	2018	0.588	0.600	0.612	0.0			
9	4	2018	0.600	0.584	0.604	26.1			
25	4	2018	0.596	0.598	0.616	34.4			
11	5	2018	0.636	0.798	0.788	118.5			
27	5	2018	0.264	0.834	0.800	164.6			
12	6	2018	0.808	0.802	0.796	43.3			
28	6	2018	0.876	0.876	0.876	74.2			
14	7	2018	0.804	0.860	0.848	151.4			
30	7	2018	0.756	0.792	0.724	181.6			
15	8	2018	0.852	0.910	0.912	177.0			
31	8	2018	0.500	0.840	0.744	33.9			
16	9	2018	0.876	0.866	0.876	78.9			
2	10	2018	0.856	0.816	0.844	31.9			
18	10	2018	0.892	0.856	0.856	14.6			
3	11	2018	0.812	0.742	0.888	164.0			

19	11	2018	0.844	0.866	0.864	0.0
5	12	2018	0.824	0.920	0.844	0.0
21	12	2018	0.824	0.870	0.856	0.0
6	1	2019	0.824	0.822	0.772	0.0
22	1	2019	0.800	0.790	0.756	0.0
7	2	2019	0.712	0.672	0.648	0.0
23	2	2019	0.686	0.645	0.577	0.0
11	3	2019	0.652	0.632	0.632	0.0
27	3	2019	0.544	0.494	0.480	0.0
12	4	2019	0.620	0.608	0.620	0.0
28	4	2019	0.528	0.696	0.692	0.0
14	5	2019	0.684	0.774	0.776	96.7
30	5	2019	0.480	0.824	0.760	38.0
15	6	2019	0.596	0.796	0.838	87.3

Nota: PC: práctica cultural aplicada; [1]: Control Manual de Maleza-Macheteo al hilo- Desbejudado + Herbicida al Hilo y calle; [2]: Control de bachaco; [3]: Control Mecánico de Maleza-Rotativa-Rolo Argentino + Control Manual de Maleza-Macheteo al hilo- Desbejudado; [4]: Control Manual de Maleza-Macheteo al hilo-Desbejudado.

#### 4.3 Comparación de los puntos de cambio estacionales y tendenciales en las series con frecuencia de 16 días, de NDVI y precipitación.

Las figuras 23, 24 y 25, corresponden a las salidas del método BFAST. El panel superior corresponde a la serie tendencial de NDVI (cada figura corresponde a una RDI diferente), las cuales fueron correlacionadas anteriormente con valores de precipitación. El segundo panel corresponde al componente estacional de la serie de NDVI, donde se muestra con claridad que el NDVI muestra un periodo donde aumenta progresivamente (periodo lluvioso) y otro, donde decrece (periodo seco).

En el tercer panel de las figuras para cada RDI, se observa como el NDVI aumenta a lo largo del tiempo, lo cual es debido al crecimiento de las plantaciones (mayor altura de la planta por consiguiente mayor tamaño de copa o dosel), lo cual responde probablemente a una mayor eficiencia fotosintética, ya que la planta posee

un mayor número de hojas en el dosel; y como ya fue evidenciado en la correlación del NDVI con la precipitación, la capa vegetal (dosel o copa de la planta) en el caso de eucalipto se mantiene activa aun en ausencia de la precipitación.

El panel final de la figura (aplica para cada figura asociada a una RDI) muestra el comportamiento al remover la tendencia y estacionalidad de la serie temporal. Las barras positivas (por encima del eje horizontal) pueden estar asociadas a valores altos de precipitación ocurridos en un momento determinado, lo cual pudo aumentar el valor de NDVI temporalmente. Ya que aquellas especies arbóreas de rápido crecimiento requieren de un mayor consumo de agua (Poor & Fries citado Vital, 2007) podemos decir que a mayor disponibilidad de agua, más acelerado es el crecimiento del eucalipto y más eficiente la actividad fotosintética, cuidando de no confundir gran disponibilidad de agua con condiciones de suelo saturados.

En caso contrario, se muestra las barras negativas (por debajo del eje horizontal) que pudiese reflejar algunos periodos secos severos donde el valor de NDVI disminuye notablemente.

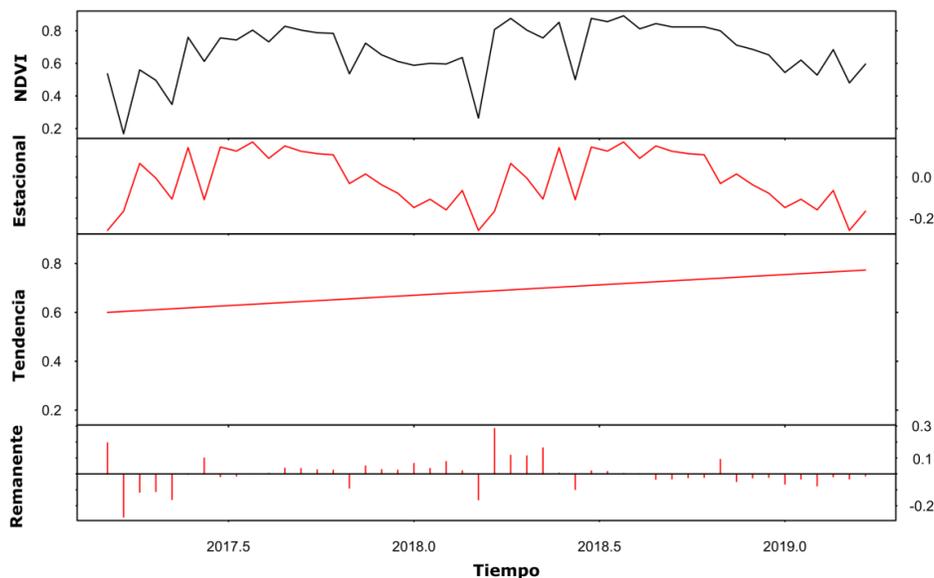


Figura 23. Descomposición de la serie temporal de NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P21 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días empleando el método BFAST.

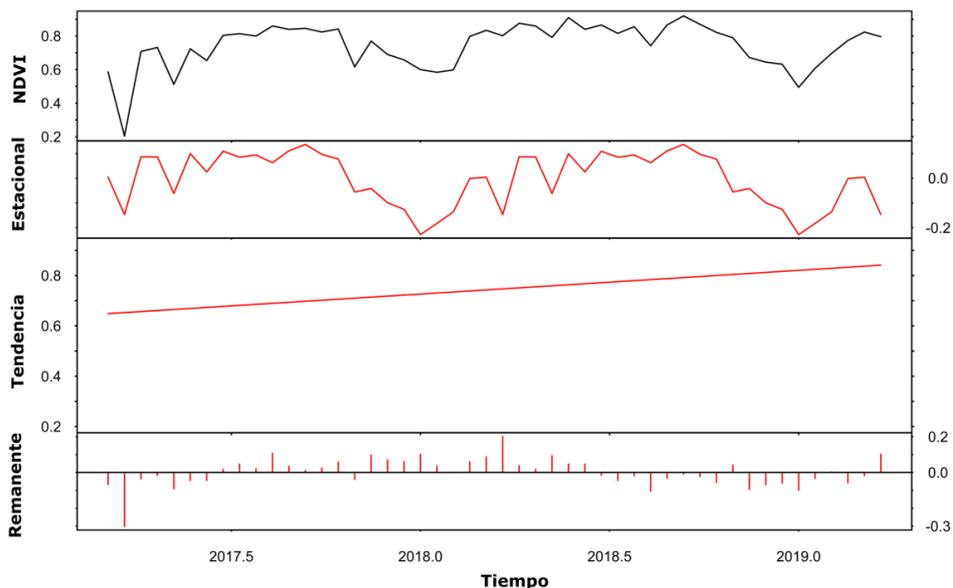


Figura 24. Descomposición de la serie temporal de NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P25 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días empleando el método BFAST.

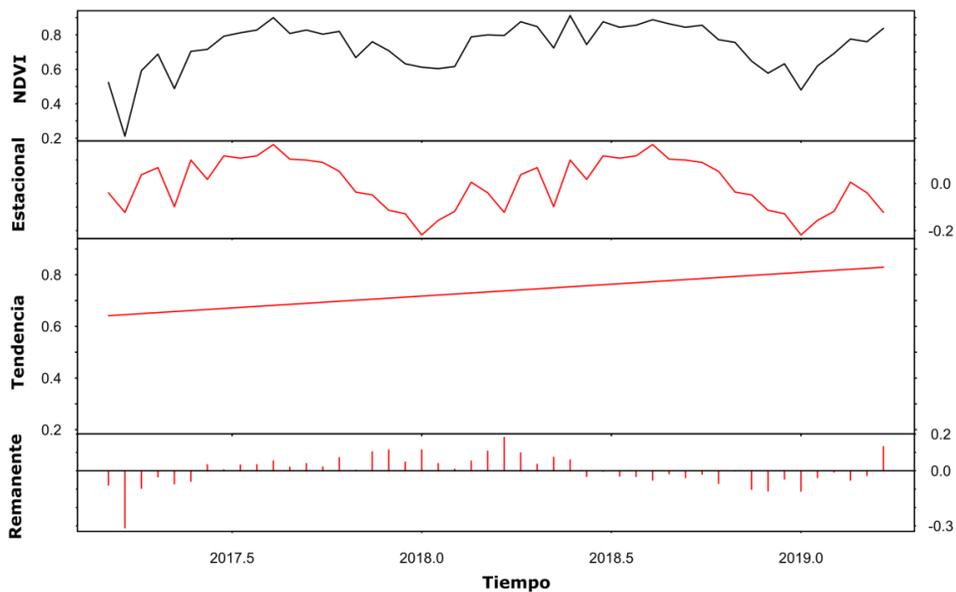


Figura 25. Descomposición de la serie temporal de NDVI promediado espacialmente sobre la parcela P26 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días empleando el método BFAST.

La figura 26 muestra la salida del BFAST aplicado a la precipitación para las tres RDI (parcela 21; 25 y 26). En el panel superior se puede evidenciar una disminución de la precipitación en el periodo de estudio, lo cual fue reflejado anteriormente en la figura 22. El segundo panel se observa que la precipitación posee un claro componente estacional, relacionado a la alternancia de los periodos seco y lluvioso. Como fue señalado antes, el eucalipto en condiciones de estrés toma los nutrientes de las hojas más viejas (entre ellos el potasio K) y los deposita en las hojas más nuevas ubicadas en el dosel superior (Navegante O. febrero 5, 2019. Com. Personal)

Es conveniente señalar que el eucalipto posee varios mecanismos biológicos que economizan el agua, tales como presencia de tejido foliar coriáceo, alineación vertical de las hojas, cierre rápido de estomas, baja tasa de transpiración y elevada reacción raíz/parte aérea (Silva citado por Vital, 2007). Un estudio presentó, a través del método de balance hídrico en el suelo, valores de pérdida de agua en el suelo para el *Eucalyptus globulus*, alrededor de 700mm/año (Lima citado por Vital, 2007); sin embargo este consumo no significa que el eucalipto seque el suelo o genere un impacto negativo en el mismo (Vital, 2007), debido a que “*el resecaimiento del suelo en plantaciones de eucalipto depende no solamente del consumo de agua por las plantas, sino también, por la precipitación pluviométrica de la región*” (Lima citado por Vital, 2007).

En este contexto, puede ser muy probable que aunque el eucalipto absorba agua de los suelos, no sea esta la razón principal del comportamiento presentado en las figuras anteriores donde se evidencia el aumento del valor de NDVI, aun en disminución de la precipitación.

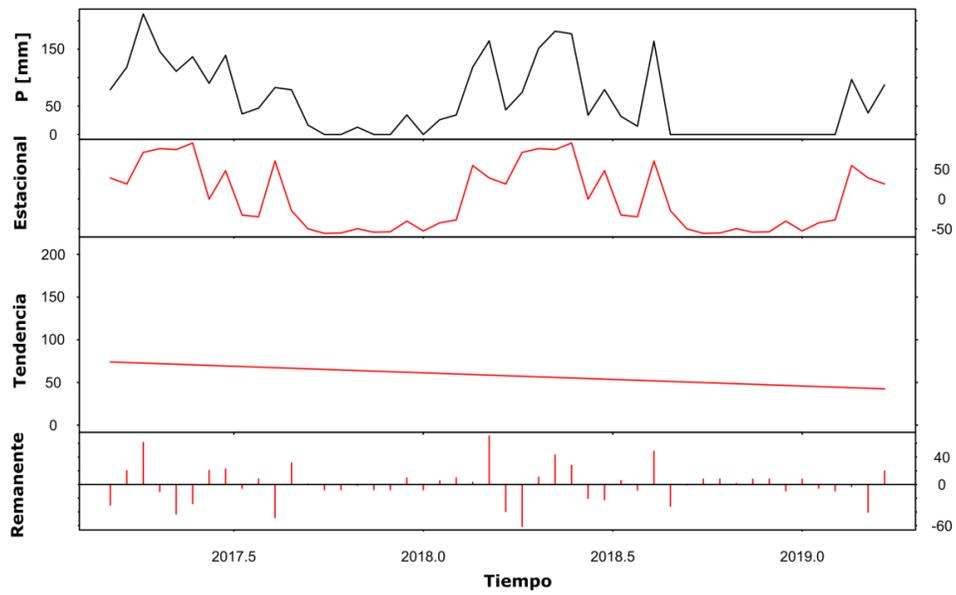


Figura 26. Descomposición de la serie temporal de precipitación sobre las parcelas P21, P25 y P26 desde el 24/05/2017 al 15/06/2019 a intervalos de 16 días empleando el método BFAST.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El NDVI resulta una herramienta precisa en la detección del cambio en el verdor de las hojas ubicadas en el dosel superior, es por esto, que se puede establecer una relación entre la dinámica del NDVI y el comportamiento de una plantación forestal de eucalipto, tomando en cuenta los valores de precipitación acumulada para una frecuencia determinada; así como cualquier afectación (biótica o abiótica) que pueda disminuir dicho verdor; estableciendo una fluctuación que corresponde al comportamiento natural de dicha plantación y su relación con los periodos secos y lluviosos de la región.

En este contexto, y sabiendo que el NDVI es capaz de detectar cualquier cambio en el verdor del dosel superior de la planta; se determinó que el NDVI refleja claramente el desarrollo de las plantaciones de eucalipto, así como el acoplamiento entre NDVI y las plantaciones, donde los valores mostrados cercanos a uno (1,00) se dieron en la temporada de lluvias y valores más lejanos a uno (1,00) en la temporada de sequía. Esto confirma que los puntos de cambio estacionales y tendenciales en las series de NDVI y precipitación son coincidentes.

Se evidencio a través de la herramienta estadística BFAST, que el eucalipto aun en ausencia de las lluvias o con la disminución de estas, mantiene su actividad fotosintética, incluso, se evidencia un aumento en dicha actividad con el pasar del tiempo, manteniendo los valores de NDVI sobre 0,4 y con valores mucho más cercanos a uno (1,00), lo que es muy probable que este asociado al desarrollo de la planta desde su etapa inicial (los dos primeros años) hasta alcanzar su edad de adultez.

En este sentido es recomendable extender la investigación, tanto en las RDI seleccionadas para este estudio, como en plantaciones nuevas que permitan llevar un registro de todas las actividades antrópicas y naturales que pueda causar un efecto en dicha plantación, tanto en forma positiva como en una forma negativa. Se debe normalizar el registro de datos en campo de las plantaciones para así establecer un programa de monitoreo a través de imágenes satelitales que permitan desarrollar un

sistema de alerta temprana de afectaciones perjudiciales a las plantaciones, basado en datos de NDVI.

## REFERENCIAS CONSULTADAS

- ABRAF. 2012. Planted forests in Brazil. Brazilian Association of Planted Forests Producers, Statistical yearbook 2012: Chapter 01. Brazil. 90 pp.
- Aguilar, N.; Galindo, G.; Fortanelli, J.; Contreras, C. 2010. Índice Normalizado de Vegetación en Caña de Azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 14, núm. 2, 2010, pp. 49-65.
- Alfenas, A. 2017. Manejo de Doenças em viveiros clonais. Curso de manejo integrado de plagas y enfermedades {on line}. Grupo Unis. Brasil. P. 80.
- Armenteras, D., González, TM., Retana, J., Espelta, JM. (eds). (2016) Degradación de bosques en Latinoamérica: Síntesis conceptual, metodologías de evaluación y casos de estudio nacionales. Publicado por IBERO-REDD+.
- Assis, T. 2001. Estratégias de melhoramento para a obtencao de madeira de qualidade para laminacao e sarraria. Seminario madeira de eucalipto: tendencias e usos del 29, 30 e 31 de agosto, 2001. Madeira de eucalipto: tendencias e usos. Brasil. Pp. 1-18.
- Beltrán, D. 2017. Aplicación de Índices de Vegetación para Evaluar Procesos de Restauración Ecológica en el Parque Forestal Embalse del Neusa. Bogota D.C., Colombia. <https://pdfssemanticscholar.org>
- Bravo, C., Moshou, D., West, J., McCartney, A., & Ramon, H. 2003. Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance. *Biosystems Engineering*, 84(2): 137-145.
- Brito, J., y Leguizamón, A. 2013. Manual de Plantaciones Forestales, técnicas y manejo. [www. Infona.gov](http://www.infona.gov)
- Chacón-Moreno, E., 2004. Mapping savanna ecosystems of the Llanos del Orinoco using multitemporal NOAA satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5: 41–53.
- Dierckx, W., Sterckx, S., Benhadj, I., Livens, S., Duhoux, G., Van Achteren, T. & Saint, G. (2014). PROBA-V mission for global vegetation monitoring: standard products and image quality. *International Journal of Remote Sensing*, 35(7), 2589-2614.
- EMBRAPA-Florestas. 2010. Cultivo do Eucalipto Sistemas de Produção (2ª edição). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [libro en línea]. En <https://goo.gl/Dxzvqt> [Consulta: febrero 12, 2017].
- FAO. 1981. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. El eucalipto en la Repoblación Mundial. [documento en línea]. <http://www.fao.org> [Consulta: abril 11, 2019].
- FAO. 1998. Programa de Evaluación Mundial de los Recursos Forestales. El Estado Actual de las Plantaciones Forestales en América Latina y el Caribe y Examen de

- las Actividades Relacionadas con el Mejoramiento Genético. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [documento en línea]. <http://www.fao.org> [Consulta: febrero 13, 2019].
- FAO. 2010. Términos y Definiciones. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Términos y Definiciones. [documento en línea]. <http://www.fao.org> [Consulta: mayo 11, 2019].
- FAO. 2018a. Descubriendo los Bosques. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [documento en línea]. En <http://www.fao.org> [Consulta: junio 05, 2019].
- FAO. 2018b. Los Bosques del Mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [documento en línea]. En <http://www.fao.org> [Consulta: marzo 16, 2019].
- Ferez, A. P. C., Campoe, O. C., Mendes, J. C. T., &Stape, J. L. 2015. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. *Forest Ecology and Management* 350: 40-45.
- Ferreira, F. y Milani, D. 2002. Diagnose Visual e controle das Doenças Abioticas e Bioticas do Eucalipto no Brasil. MogiGuaçu, SP: International Paper, 98 pp.
- FRA. 2015. Términos y Definiciones. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Términos y Definiciones. Documento de Trabajo de la Evaluación de los Recursos Forestales No. 180 [documento en línea]. <http://www.fao.org> [Consulta: mayo 11, 2019].
- Franquis, F. y Infante, A. 2003. Los bosques y su importancia para el suministro de servicios ambientales. Universidad de los Andes. *Revista forestal*. pp 17 – 30.
- Gaitan, J., Bran D., 2015. Tendencia del NDVI en el periodo 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: ventajas y desventajas. *Agrisciencia* 2015, vol. 32, pp 83-93. <https://www.researchgate.net/publication/288824403>
- Godoy, L, Nunes M, Araújo E y Soares R, 2016. Comparación de NDVI para dos diferentes especies de Eucalipto. [www.revistapag.fepagro.es.gob.br](http://www.revistapag.fepagro.es.gob.br)
- Gonçalves, J. L. d. M., Alvares, C. A., Higa, A.R., Silva, L. D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S. F. d. B., Lima, W. d. P., Brancalion, P. H. S., Hubner, A., Bouillet, J. -P. D., Laclau, J. -P., Nouvellon, Y., &Epron, D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management* 301: 6-27.
- Goor, E., Dries, J., Daems, D., Paepen, M., Niro, F., Goryl, P., & Della Vecchia, A. 2016. PROBA-V MissionExploitationPlatform. *RemoteSensing* 8(7): 564.
- Gutiérrez, L. 2017. Paradigmas cuantitativo y cualitativo en la investigación socio-educativa: proyección y reflexiones. *Paradigma* 14(1-2):, 7-25.

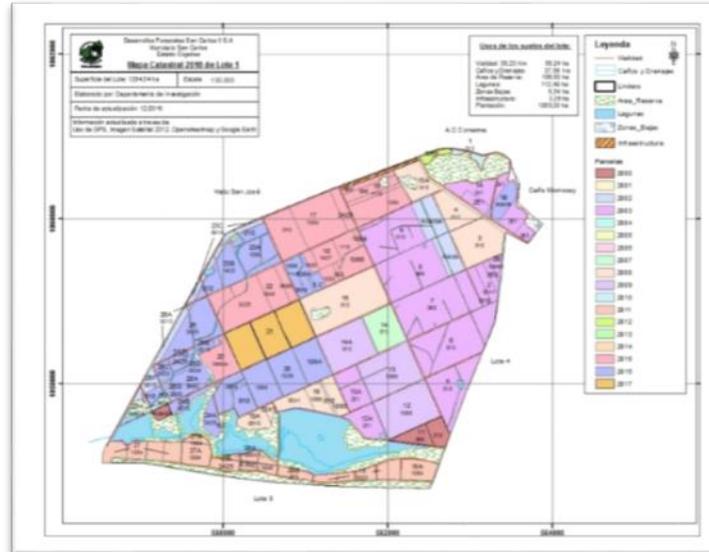
- Hernández, L. 2008. Cambio global y su relación con la conservación y el uso sustentable de bosques neotropicales. *Revista Forestal Venezolana* 52(1): 101-108.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. 2006. *Metodología de la investigación*. México, DF. 850 pp.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remotesensing of environment* 83(1): 195-213.
- Ke, Y., Im, J., Lee, J., Gong, H., & Ryu, Y. 2015. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. *Remote Sensing of Environment* 164: 298-313.
- Kogan, F.N. 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research* 15(11): 91-100.
- Larriva, N. 2003. *Síntesis de la importancia del potasio en el suelo y las plantas*. Facultad de ciencias pecuarias y agroindustriales. La granja. 2: 23-24.
- Le Maire, G., Dupuy, S., Nouvellon, Y., Loos, R. A., & Hakamada, R. 2014. Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote sensing of environment* 152: 136-149.
- Le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Grinand, C., Hakamada, R., Stape, J. L., & Laclau, J. P. 2011. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. *Remote Sensing of Environment* 115(10): 2613-2625.
- Leite de Souza, J., Campo, W., Bastidas, J., Leite de Souza, D., Leite de Souza, H. 2015. El uso Integral y Múltiple de los Bosque no es una utopía. *Rev. For. Venez.* Año XLVIII. Vol. 58. 2014. Pp 77-42.
- Loehle, C., Idso, C., & Wigley, T. B. 2016. Physiological and ecological factors influencing recent trends in United States forest health responses to climate change. *Forest Ecology and Management* 363: 179-189.
- Mario Monti, Gisela Marcuzzi, Martin Destefano 2019. Analisis comparativo de parámetros edáficos y NDVI entre un sistema de Pastore Racional Voisin y agricultura en siembra directa. *Cadernos de agroecología – ISSN 2236 – 7934, Anais do III Encontro Pan-Americano Sobre Manejo Agroecologico de Pastagens – V. 14 n°2, Fev, 2019.*
- Millano, J. y Paredes, F. 2017. Patrones fenológicos de cinco tipos de cobertura en Bosque Seco Tropical, Sur-Cojedes, Venezuela. *Revista Agrollanía* 14 [En prensa].
- Millano, J., 2017. Estudio de la variabilidad del índice de vegetación de diferencia normalizada en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes. *Coordinación de estudios avanzados Unellez San Carlos* 2017.

- Montoya Oliver, J. M. 1995. El Eucalipto. Ediciones Mundi-Prensa. España. 125 pp.
- Morante, C. 2017. Modelo de Sustentabilidad para Bosques Plantados de Eucalipto en Los Llanos Centrales del Estado Cojedes. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora”, San Carlos, Cojedes. 282 pp.
- Paredes, F. 2009. Nociones Elementales de la Climatología e Hidrología del Estado Cojedes. Publicaciones del área de estudios de postgrado serie Investigación. Unellez San Carlos 2009.
- Rangel, L., Moreno, P., Trejo, S., & Valero, Styles. 2017. Propiedades de tableros aglomerados de partículas fabricados con madera de *Eucalyptusurophylla*. Maderas. Ciencia y tecnología 19(3): 373-386.
- Sellers, P.J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. International Journal of Remote Sensing 6(8): 1335-1372.
- Somers, B., Verbesselt, J., Ampe, E. M., Sims, N., Verstraeten, W. W., & Coppin, P. 2010. Spectral mixture analysis to monitor defoliation in mixed-aged *Eucalyptus globulus* plantations in southern Australia using Landsat5-TM and EO-1Hyperion data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 12(4): 270-277.
- Stape, J. L., Ryan, M. G., & Binkley, D. 2004. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. Forest Ecology and Management 193(1): 219-234.
- Stone, C., Carnegie, A., Melville, G., Smith, D., & Nagel, M. 2013. Aerial mapping canopy damage by the aphid *Essigella californica* in a *Pinusradiata* plantation in southern New South Wales: what are the challenges?. Australian forestry 76(2): 101-109.
- Tarpley, J. D., S.R. Schneider, & Money R.L. 1984, Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite. Journal of Applied Meteorology and Climatology 23: 491 – 494.
- Tian, F., Fensholt, R., Verbesselt, J., Grogan, K., Horion, S., & Wang, Y. 2015. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis. Remote Sensing of Environment 163: 326-340.
- Trujillo, E. 2003. Plantaciones Forestales: Planeamiento para el Éxito. [www.elsemillero.net](http://www.elsemillero.net)
- Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing Environmental 8: 127–150.
- Tudare, J. L. M., & Trejo, F. J. P. 2016. Variabilidad de la Vegetación con el Índice de Diferencia Normalizada (NDVI) en Latinoamérica. Novum Scientiarum 2(4): 33-44.

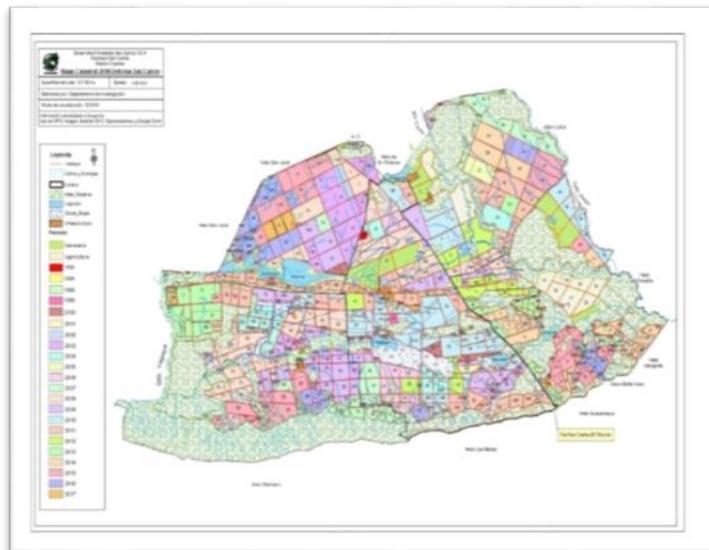
- Venezuela. 1999. Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, N° 5.453 (Extraordinario), 24 de marzo de 2000.
- Venezuela. 2013. Ley del plan de la patria. Segundo Plan Socialista de Desarrollo Económico y Sociacuzzl de la Nación 2013-2019 publicado en Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N|° 6.118 extraordinario 4 de diciembre del 2013
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote sensing of Environment* 114(1): 106-115.
- Vital, M. 2017. Impacto ambiental de floresta de Eucalipto. *Revista do bndes*, Rio de Janeiro, V.14, N.28, P235-276, Dez. 2007.
- Wouter, D., Sindy, S., Iskander, B., Stefan, L., Geert, D., Tanja, Van A., Michael, F., Karim, M., & Gilbert, S. 2014 PROBA-V mission for global vegetation monitoring: standard products and image quality. *International Journal of Remote Sensing* 35(7): 2589-2614.

ANEXOS

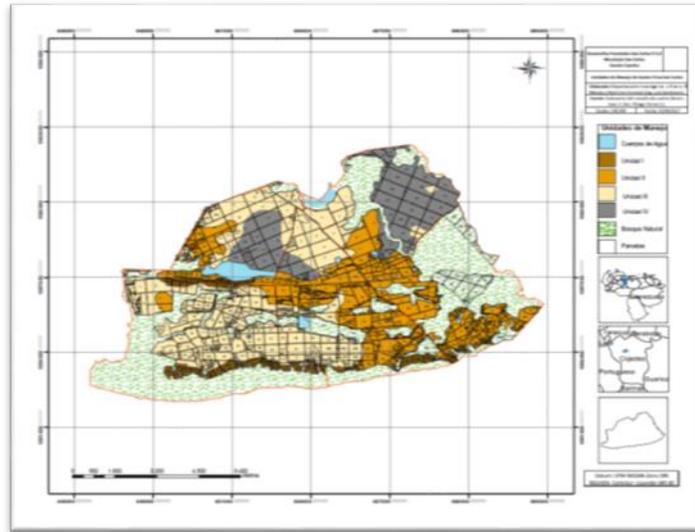
Anexo A. Mapa lote I. DEFORSA II, S.A.



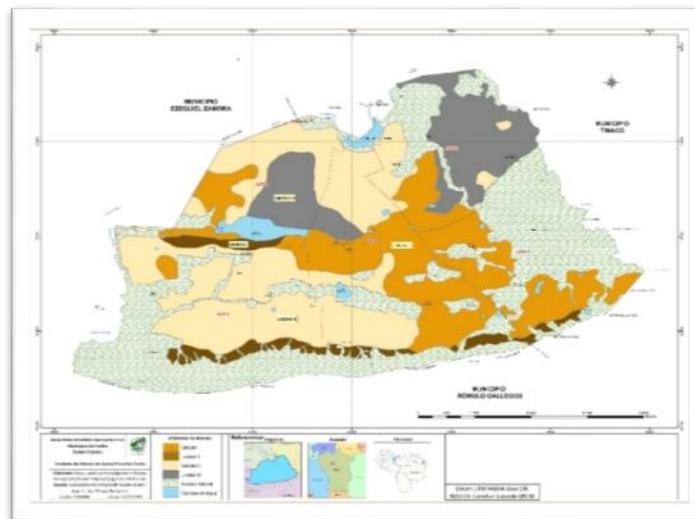
Anexo B. Mapa Completo. DEFORSA II, S.A.



Anexo C. Mapa unidades de manejo con identificación de lotes y parécelas  
DEFORSA II, S.A.



Anexo D. Mapa unidades de manejo DEFORSA II, S.A.



Anexo E. Limpieza del hilo para plantación (Dejando corteza, ramas y hojas en sitio)  
en DEFORSA II, S.A.



Anexo F. Preparo de suelo en DEFORSA II, S.A.



Anexo G. Plantación de *Eucalyptus* spp tipo manual en DEFORSA II, S.A.



Anexo H. Plantación mecanizada de *Eucalyptus* spp en DEFORSA II, S.A.



Anexo I. Aplicación de cal dolomítica Post-plantación en DEFORSA II, S.A.



Anexo J. Fertilización 15-15-15. Post-Plantación en DEFORSA II, S.A.



Anexo K. encamellonado en el preparo de suelo. DEFORSA II, S.A.



Anexo L. Parcela lista para plantación. DEFORSA II, S.A.



Anexo M. muestra canal de drenaje existente en la parcela 25 Lote I, debajo plantación cercana al canal de drenaje dentro de la RDI. DEFORSA II, S.A.



Anexo N. muestra situación de la plantación ubicada en la parcela 25 Lote I con edad de tres años. DEFORSA II, S.A.



Anexo O. muestra situación de la plantación multiclonal ubicada en la parcela 21  
Lote I con edad de tres años. DEFORSA II, S.A.

