

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE DERECHO**  
**INSTITUTO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS AMBIENTALES**



**UNIVERSIDAD**  
**COMPLUTENSE**  
**MADRID**

**TESIS DOCTORAL**

**Captura de carbono por los bosques como estrategia de mitigación del cambio climático global. Su aplicación a casos de países del continente africano.**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA

PRESENTADA POR

**Maimouna Harouna**

DIRECTOR

**Prof. Dr. D. José Antonio Sotelo Navalpotro**

DIRECTORA

**Prof. Dr<sup>a</sup>. D<sup>a</sup>. Isabel Cristina Pascual Castaño**

Madrid, 2021

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE DERECHO**  
**INSTITUTO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS AMBIENTALES**



**UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE**  
MADRID

**TESIS DOCTORAL**

**Captura de carbono por los bosques como estrategia de mitigación del cambio climático global. Su aplicación a casos de países del continente africano.**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA

PRESENTADA POR

**Maimouna Harouna**

DIRECTOR

**Prof. Dr. D. José Antonio Sotelo Navalpotro**

DIRECTORA

**Prof. Dr<sup>a</sup>. D<sup>a</sup>. Isabel Cristina Pascual Castaño**

Madrid, 2021

*Dedicatoria,*

*A mi madre Mariama KARIMOU.*

*A mi esposo Mamadou KONE.*

## ***Agradecimientos,***

A Islamic Development Bank por darme la beca para la realización de mi tesis de doctorado.

A Ana Yábar Sterling, por su ayuda a matricularme en el programa de Doctorado.

A Pablo Martínez Anguita de la Universidad Rey Juan Carlos por todo su apoyo.

A todo el equipo de trabajo del grupo de investigación Silvanet y del laboratorio de la ETSI de Montes Forestales, especialmente a Antonio García Abril, Luis Gonzaga, Mercedes Liliana Mendez y Susana Martín Fernández.

A todo el equipo de la ONG ATPF por facilitarme el contacto con los distintos pueblos de la zona de estudio.

A Imnaculada Valverde del laboratorio de Farmacia de la Universidad de Complutense de Madrid.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	10
SUMMARY .....	12
LISTA DE ABREVIATURAS .....	13
PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO.....	16
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....	17
1.1 Cambio Climático. Efecto Invernadero. Sumideros y fijación de Carbono. ....	17
1.2. El Convenio Marco de las Naciones Unidas. Protocolo de Kioto. ....	22
Reparto de emisiones. ....	22
1.3. Los Sistemas Agroforestales como sumideros de Carbono .....	24
1.4. Prácticas de manejo o gestión de los Sistemas Agroforestales.....	26
1.4.1 Los "árboles fertilizantes" .....	26
1.4.2 Técnicas de retención de agua.....	27
1.4.3 Distribución de estiércol.....	28
1.4.4 Regeneración Natural Asistida un servicio ambiental y socioeconómico	29
1.5 Antecedentes de la investigación.....	31
1.6. Hipótesis y objetivos de la investigación. ....	36
1.6.1 Método de investigación: hipótesis .....	36
1.6.2 Objetivos de investigación. ....	36
CAPÍTULO II: ANÁLISIS GEOGRÁFICO: CONOCIENDO EL SAHEL.....	37
2.1 Localización y presentación de los países del territorio del Sahel. ....	37
2.2. Estudio del medio físico de un espacio singular. ....	41
2.3. Los factores demográfico y económico de la zona del Sahel .....	42
2.4. "Regreening" en los Sistemas Agroforestales del Sahel.....	45
2.5. Los Sistemas Agroforestales y su contribución a fijación de carbono. ....	48
CAPÍTULO III: MATERIALES Y METODOS.....	52
3.1 Estudio de caso: Níger, un país en el centro del Sahel. ....	52
3.1.1) Situación geográfica y divisiones administrativas.....	53
3.1.2) Clima, vegetación, agricultura y ganadería .....	55
3.1.3) Tipologías y ocupación de los suelos de Níger. ....	60
3.2 Las fases de la investigación .....	65
3.3 Fase preliminar: diseño del trabajo de campo.....	68
3.4 Fase de campo: Recogida de datos.....	78
3.4.1) Las encuestas. ....	79
3.4.2) las mediciones y toma de muestra de suelo.....	82

3.5 Procedimiento para calcular el carbono capturado en biomasa de la especie de “ <i>Guiera senegalensis</i> ”.....	85
3.6 Fase de laboratorio: Métodos Analíticos realizados en la valoración del “Regreening” a nivel del suelo. ....	87
3.7 Fase de análisis:.....	90
3.7.1) Cálculo de la evolución del NDVI entre los períodos 1985-1995 y 2013 -2017.	90
3.7.2) Detección de cambios. ....	93
3.7.3) Validación del algoritmo de cambio .....	93
3.7.4) Tipología del uso de suelo mediante una clasificación supervisada... ..	94
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	96
4.1) Resultados de la fase preliminar .....	96
4.2) Resultados del análisis de los datos de campo.....	98
4.2.1) Las encuestas .....	98
4.2.2) Las muestras de suelo: valoración del “Regreening”.....	106
4.3) Clasificación supervisada de las coberturas del uso de suelo.....	113
4.4) Estudio de la evolución de la cobertura arbóreo-arbustiva entre los períodos 1985-1995 y 2013-2017.....	115
4.4.1) Colección de las imágenes media NDVI y desviación típica NDVI ...	115
4.4.2) Mapas del cambio de la cobertura leñosa (imagen de DNcambio) ..	118
4.4.4) Reparto de pérdidas y ganancias por categoría de uso del suelo. ...	119
4.4.5) Validación visual de polígonos de ganancias y pérdidas mediante Google Earth. ....	121
4.5) Cuantificación de la contribución antropogénica al “Regreening” .....	122
4.6) Discusión de los resultados obtenidos. ....	124
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO .....	143
5.1) Conclusiones .....	143
5.2) Futuras líneas de trabajo .....	143
BIBLIOGRAFÍA.....	148
ANEXOS.....	202

<b>LISTA DE FIGURA</b>	<b>PAG</b>
<u>Figura 1</u> : Emisiones de Gases Efecto Invernadero por región	20
<u>Figura 2</u> : Técnica de zaï de Gobira Sanguina (pueblo de la zona de estudio)	28
<u>Figura 3</u> : Demostración de la Regeneración Natural Asistida en el campo sobre la especie de <i>Guiera senegalensis</i>	31
<u>Figura 4</u> : Anomalías en las precipitaciones del Sahel entre 1900 y 2010.	32
<u>Figura 5</u> : Comparación de imágenes satelitales que muestran la cobertura arbórea en Níger en 1975 a y 2003 b.	34
<u>Figura 6</u> : Evolución del uso de la tierra y la vegetación en el sur de Níger desde 1955 hasta 2005.	35
<u>Figura 7</u> : Los países que constituyen el Sahel.	41
<u>Figura 8</u> : Crecimiento rápido de la población africana en particular el Sahel.	43
<u>Figura 9</u> : Crecimiento histórico y previsión demográfico del Sahel (1955-2095).	44
<u>Figura 10</u> : The 'Regreening' del Sahel, 1982 -2006	48
<u>Figura 11</u> Sistema Agroforestal de Níger.	50
<u>Figura 12</u> : Los países más vulnerables al cambio climático según el ND-Gain	53
<u>Figura 13</u> : Regiones administrativas de la Republica de Níger y distribución de los grupos socio culturales.	54
<u>Figura 14</u> : Historial de las temperaturas y precipitaciones en Níger de 1991 hasta 2020.	56
<u>Figura 15</u> : Zonas agroecológicas en Níger.	59
<u>Figura 16</u> : zona de agricultura y de pastoreo.	60
<u>Figura 17</u> : Tipos de suelo en Níger.	63
<u>Figura 18</u> : El uso de los suelos de 2013.	64
<u>Figura 19</u> : Terrenos degradados de la zona de estudio	65
<u>Figura 20</u> : Herramientas metodológicas usadas durante las distintas fases de la investigación.	67
<u>Figura 21</u> : Collect Earth con varios tipos de software libre	68
<u>Figura 22</u> : Las parcelas de la zona de estudio.	69
<u>Figura 23</u> : Diseñar de las parcelas	70
<u>Figura 24</u> : diseño de encuesta asociada a una parcela	72

<u>Figura 25:</u> las plataformas para la visualización de las imágenes descargadas.	73
<u>Figura 26:</u> Mapa de diferencias de NDVI.	77
<u>Figura 27:</u> procedimientos para la recogida de datos del trabajo de campo	78
<u>Figura 28:</u> Las personas que han participado en las encuestas grupales.	81
<u>Figura 29:</u> Medios de transporte utilizados en los desplazamientos por la zona de estudio	81
<u>Figura 30:</u> Materiales de trabajo utilizados	83
<u>Figura 31:</u> Mediciones de diferentes diámetros.	84
<u>Figura 32:</u> toma de muestras de suelo en distintos pueblos de la zona de estudio.	85
<u>Figura 33:</u> procedimientos para la determinación du carbono orgánico	89
<u>Figura 34:</u> Composición de las 4 escenas Landsat (192/051, 192/052, 193/050, 193/051) que contienen el área de estudio.	91
<u>Figura 35:</u> los niveles de NDVI de la zona de estudio	97
<u>Figura 36.</u> a) NDVI estimado del promedio de la diferencia de fechas más antiguas (OMRI) y b) NDVI estimado del promedio de la diferencia de fechas recientes (RMRI).	97
<u>Figura 37:</u> histograma de diferencia NDVI	98
<u>Figura 38:</u> Uso de <i>Guiera senegalensis</i> como fuente de alimentación para los animales.	99
<u>Figura 39:</u> Uso de <i>Guiera senegalensis</i> como fuente de alimentos el ganado.	99
<u>Figura 40:</u> Uso de <i>Guiera senegalensis</i> como fertilizante al suelo.	100
<u>Figura 41:</u> Uso de <i>Guiera senegalensis</i> como fuente de madera.	101
<u>Figura 42:</u> Numero de persona a cargo de un jefe de la unidad familiar	103
<u>Figura 43:</u> Experiencias de practica de la RNA	104
<u>Figura 44:</u> Acceso de las tierras en la zona de estudio.	105
<u>Figura 45:</u> Nivel de satisfaccion	105
<u>Figura 46:</u> Diagrama de caja y bigotes de la variable pH según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso.	106
<u>Figura 47:</u> Concentración de la caliza activa según el tipo de uso de suelo.	107
<u>Figura 48:</u> Diagrama de caja y bigotes de la variable caliza activa según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso.	108
<u>Figura 49:</u> Diagrama de caja y bigotes del contenido de M.O. según el tipo de tratamiento. 1.- Parcelas no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso.	109

<u>Figura 50</u> : Diagrama de caja y bigotes de la concentración de Nitrógeno total (%). según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso	110
<u>Figura 51</u> : Diagrama de caja y bigotes de la concentración de Fósforo (mg/l). según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso.	111
<u>Figura 52</u> : Gráfico de caja de Diagrama de caja y bigotes de la concentración de la Capacidad de Intercambio Catiónico según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso	112
<u>Figura 53</u> : Mapa resultado de los tipos de usos de suelo de la zona de estudio obtenidos en la clasificación supervisada.	113
<u>Figura 54</u> . Resultados de los valores de la media de los NDVI: a) años 1985-1995 estación húmeda; b) años 1985-1995 estación seca; c) años 2013-2017 estación húmeda; d) años 2013– 2017 estación seca.	116
<u>Figura 55</u> : a) SD 1985-1995 estación seca; b) SD 1985-1995 estación húmeda; c) SD 2013-2017 estación húmeda d) SD 2013-2017 estación seca.	117
<u>Figura 56</u> . Imagen de detección de cambios: diferencia normalizada de las medias de los NDVI de los períodos 204-2017 y 1985-1995 (izquierda) de la estación seca. Imagen DNcambios con zonas de ganancia y pérdida de vegetación (derecha).	118
<u>Figura 57</u> : Ganancias y pérdidas por categoría de la capa DNcambios	119
<u>Figura 58</u> : a) Total de perdidas por categoría, b) Total de ganancias por categoría	120
<u>Figura 59</u> : Incremento de la cobertura arbórea-arbustiva (regreening)	121
<u>Figura 60</u> : Pérdida de la cobertura arbórea-arbustiva	121
<u>Figura 61</u> : carbono capturado/departamento	123
<u>Figura 62</u> : Carbono orgánico almacenado en el suelo	123

## RESUMEN

El cambio climático es uno de los temas ambientales más preocupantes y actualizado de gran magnitud y que opera a escala tanto regional como internacional. Muchos países hoy en día se están enfrentando con la incapacidad de reducir sus emisiones netas de gases de invernadero. En 2001 dentro de las negociaciones internacionales, ha surgido un gran interés en cuanto la captura de carbono tanto por aéreo como en los suelos subterráneos de los suelos de los Sistemas Agroforestales.

En este trabajo cuyo título: Captura de carbono por los bosques como estrategia de mitigación del cambio climático global. su aplicación a casos de países del continente africano. Se han podido analizar áreas potenciales de "regreening" y estimar el carbono capturado por los Sistemas Agroforestales situados en la parte Sur oeste de Níger entre en el periodo 1985-2017. En la fase preliminar de la investigación mediante las técnicas de teledetección se diseñó la distribución de las parcelas de campo en las que se han medido distintas variables como atributos forestales (diámetro y altura) y se han tomado muestras de suelo.

Para evaluar si se ha verificado aumento en la cubierta vegetal se realizó un análisis de detección de cambios con varias escenas Landsat 5 y Landsat 8. Se compararon los NDVI promedio de dos fechas 1985-1995 y 2013-2017 detectándose áreas de pérdida y ganancia de la cubierta forestal. Además se realizó una clasificación supervisada y se establecieron 8 categorías: Brousse Tigrée (1), Vegetación Húmeda (2), Sistemas Agroforestales (3), Núcleo de Población (4), Parque Nacional (5), Campos de Frutales (6), Zonas de Matorrales (7) y Láminas de Agua (8). Se validó la clasificación haciendo cálculos estadísticos y un análisis pertinente visual de los polígonos donde hubo ganancias o pérdidas en estas categorías. Se estimó un incremento y una pérdida de la cubierta arbustiva-arbórea de un 1,2% y 1,9% % del total de la superficie de la zona de estudio, respectivamente.

En la segunda parte mediante la técnica de Regeneración Natural Asistida, una práctica agroforestal generalizada en los Sistemas agroforestales en Níger desde los años ochenta. Se analizó la contribución antropogénica al "regreening" con datos de campos de la zona de estudio a tres niveles: encuestas a los propietarios de las fincas, toma de muestras de suelos y mediciones de los arbustos de la especie "*Guiera senegalensis*".

**Palabras claves:** Cambio climático, Captura de carbono, Sistemas Agroforestales, Clasificación supervisada, Regeneración Natural Asistida, Regreening, Níger.

## SUMMARY

Climate change is one of the most worrying and up-to-date environmental issues of great magnitude that operates on both a regional and international scale. Many countries today are faced with the inability to reduce their net greenhouse gas emissions. In 2001, within the international negotiations, a great interest has arisen regarding the capture of carbon both by air and in the subterranean soils of the soils of Agroforestry Systems.

In this work whose title: Carbon sequestration by forests as a global climate change mitigation strategy. its application to cases of countries on the African continent. It has been possible to analyze potential "regreening" areas and estimate the carbon captured by the Agroforestry Systems located in the southwestern part of Niger between the period 1985-2017. In the preliminary phase of the investigation using remote sensing techniques, the distribution of the field plots was designed in which different variables such as forest attributes (diameter and height) have been measured and soil samples have been taken.

To assess whether an increase in vegetation cover has been verified, a change detection analysis was carried out with several Landsat 5 and Landsat 8 scenes. The average NDVI of two dates 1985-1995 and 2013-2017 was compared, detecting areas of loss and gain of forest cover. In addition, a supervised classification was carried out and 8 categories were established: Tiger Bush (1), Humid Vegetation (2), Agroforestry Systems (3), Population Center (4), National Park (5), Fruit fields (6), Scrub areas (7) and Water Plains (8). The classification was validated by making statistical calculations and a relevant visual analysis of the polygons where there were gains or losses in these categories. It was estimated an increase and a loss of the shrub-tree cover of 1.2% and 1.9%% of the total surface of the study area, respectively.

In the second part using the Assisted Natural Regeneration technique, a widespread agroforestry practice in agroforestry systems in Niger since the eighties. The anthropogenic contribution to "regreening" was analyzed with data from fields in the study area at three levels: surveys of farm owners, soil sampling and measurements of the "*Guiera senegalensis*" species shrubs.

**Keywords:** Climate change, Carbon sequestration, Agroforestry systems, Supervised classification, Assisted Natural Regeneration, Regreening, Niger.

## LISTA DE ABREVIATURAS

**A:** Área transversal de la sección del diámetro de la base (m<sup>2</sup>)

**a:** Área transversal del diámetro del nudo (m<sup>2</sup>)

**AB:** Área basal (m<sup>2</sup>)

**B:** Biomasa (t)

**D:** Densidad de la madera, t/m<sup>3</sup> (0,5).

**FEBa:** factor de expansión de la biomasa aérea (ramas, hojas) (1,07)

**FEBS:** factor de expansión de la biomasa subterránea (raíces) (1,07)

**C:** Carbono

**C:** carbono en toneladas de carbono

**Fc:** fracción de carbono (0,5)

**CC:** Cambio Climático

**CNIC:** Centro Nacional para la Investigación Científica

**CCL:** Cambios Cobertura Leñosa

**CE:** Comercio de Emisiones

**CF:** Campos de Frutales

**CH<sub>4</sub>:** Metano

**CIC:** Capacidad de Intercambio Catiónico

**CMNUCC:** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

**CO:** Carbono orgánico (%)

**CO<sub>2</sub>:** dióxido de carbono

**COP** las Conferencias de las Partes

**DAP:** Diámetro a la Altura del Pecho

**DN:** Diferencia Normalizada

**EG:** Exactitud Global

**EP:** Exactitud del Productor

**EU:** Exactitud del Usuario

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

**FRA:** Forest Resources Assessment

**GEE:** Google Earth Engine

**GEI:** Gases de Efecto Invernadero  
**GFS:** Global Forest Survey  
**GPS:** Global Positioning System  
**H<sub>2</sub>O:** Vapor de agua  
**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:** Ácido sulfúrico  
**IC:** Implementación Conjunta  
**IPCC:** Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático  
**K:** Índice Kappa  
**K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:** Dicromato de potasio  
**KCl:** Cloruro de potasio  
**L:** altura total del fuste (m)  
**LA:** Láminas de Agua  
**LULUCF:** Uso de la Tierra, Cambio en el Uso de la Tierra y Forestación (Land Use, Land Use Change and Forestry).  
**MDL:** Mecanismo de desarrollo limpio  
**MO:** Materia orgánica (%)  
**N:** Nitrógeno  
**N<sub>2</sub>O:** Óxido nitroso  
**NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada  
**NIR:** Infrarrojo Cercano  
**NP:** Núcleo de Población  
**OLI:** Operational Land Imager  
**OMRI:** Old Mean Reflectance Image  
**ONG:** Organización No Gubernamental  
**ONU:** Organización de Naciones Unidas  
**PK:** Protocolo de Kioto  
**PMA:** Programa Mundial de Alimentos  
**PN:** Parque Nacional  
**PNUMA:** Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente  
**RMRI:** Recent Mean Reflectance Image  
**RNA:** Regeneración Natural Asistida  
**SAF:** Sistemas Agroforestales  
**SRTM:** Shuttle Radar Topography Mission

**TB:** Tiger Bush

**TM:** Thematic Mapper

**USGS:** United States Geological Survey

**USGS:** United States Geological Survey

**V:** Volumen de la sección del fuste (m<sup>3</sup>)

**VH:** Vegetación húmeda

**ZM:** Zonas de Matorral

## **PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO**

El presente trabajo de investigación está estructurado en cinco capítulos. En el primer capítulo se consultó fuentes bibliográficas, las cuales se relacionan con el tema de cobertura y cambios en el uso del suelo, a nivel regional, nacional e internacional que son objeto de la tesis. También los temas vinculados con el Cambio Climático, Efecto Invernadero, Sumideros y fijación de Carbono en Sistemas Agroforestales. En el segundo capítulo se trata del territorio del Sahel explicando su particularidad singularidad en el continente africano. En cuanto el tercero se trata del desarrollo de la metodología del trabajo mediante las técnicas de teledetección. Con esas técnicas se clasifico el área de estudio en tres zonas según las precipitaciones (alta, media y baja). La zona de Falmey con precipitaciones alta, se hizo la toma de suelo en tres pueblos Sakala, Zoukoira, Koumbourfou, la zona de Dantchandou con precipitaciones medias en los siguientes tres pueblos Kampa, Sorney, Taguë y la zona de Fakara con precipitaciones bajas en los pueblos de Kobadaye, Kodo, Marouberizeno. La zona de frutales de dos pueblos tiene precipitaciones altas. Para la toma de muestras de suelo, se establecieron 27 puntos de muestreo, distribuidos en los 11 pueblos: 9 ubicados en zonas de Sistemas Agroforestales y 2 en plantaciones de árboles frutales) de Sur a Norte del área de estudio que se georreferenciaron con GPS Garmin. En el capítulo de los resultados se analizó las muestras de suelo para la determinación de carbono orgánico, la comprobación y validación de los resultados preliminares de las zonas con potenciales “regreening”. Se valoró la contribución antropogénica mediante la técnica de Regeneración Natural Asistida. En el último capítulo como futuras líneas de trabajo se plantea seguir con la investigación de un lado fomentar un mercado de carbono y otro lado estudiar la relación entre las precipitaciones y el “regreening”.

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Cambio Climático. Efecto Invernadero. Sumideros y fijación de Carbono.

El Cambio Climático (CC) en el mundo está causando preocupación en la sociedad, y actualmente existe el consenso en la comunidad científica de que es indispensable reducir *las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de la atmósfera con acciones efectivas* (Torres *et al.*, 2008). Sin embargo, a pesar de que la ciencia ha avanzado considerablemente en relación con el conocimiento sobre el CC, sigue existiendo gran incertidumbre respecto de los impactos futuros a escala planetaria; así como en qué medida afectará a los distintos ecosistemas (Torres *et al.*, 2008); si bien algunas consecuencias empiezan a ser visibles ya en ciertas partes del mundo (Torres *et al.*, 2008). El CC se está poniendo de relieve por un calentamiento global, es decir un incremento gradual de la temperatura del planeta y una variación en el régimen de precipitaciones.

En efecto, diversos estudios demuestran que *la temperatura global se ha incrementado en el último siglo entre 0,3°C y 0,6°C* (Stern 2007). Ávalos (2004) concluyó que *a la década de los 90's se la consideró la más calurosa de los últimos mil años*. Este incremento de la temperatura se ha manifestado tanto en las temperaturas superficiales de la tierra como de los océanos (Delgado y Romero 2007). Pero ahora la actividad humana lo altera directamente con *la emisión de los llamados gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al calentamiento del planeta* (Lash y Wellington, 2007).

La Proyección del Panel Intergubernamental sobre CC (Smith *et al.*; 2014; IPCC 2013) basado en *todos los escenarios de emisión propuestos indica un aumento en la temperatura de la superficie durante el siglo XXI. Se observarán cambios en la temperatura del aire, ciclo del agua, y nivel del mar. El aumento global promedio de la temperatura de la superficie para el período 2016-2035 estará entre 0.3 y 0.7°C*. Los cambios en la precipitación no serán uniformes en el mundo. *Se pronostica una precipitación promedio decreciente en regiones subtropicales áridas y en la mayoría de las regiones de latitudes medias, mientras que se observará un aumento en los humedales después del aumento del nivel del mar al final del siglo veintiuno* (Yobon, 2020).

Esta variación de temperatura y precipitaciones es consecuencia del denominado efecto invernadero. Se trata de un fenómeno atmosférico por el cual algunos gases de la atmosfera retienen parte del calor emitido por el suelo. *El calor que emite esta radiación infrarroja es absorbido por los gases de efecto invernadero y esto retrasa su escape a la atmosfera* (IPCC, 2001). Los más importantes GEI son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), todos ellos presentes en la atmósfera de manera natural, pero cuya *concentración está siendo aumentada por la acción humana* (Colque y Sánchez, 2007). *El CO<sub>2</sub>, el principal GEI, pasó de 270 ppm en la era preindustrial a 379 ppm en la actualidad* (IPCC, 2007, Tabla 1). Este incremento en la cantidad de CO<sub>2</sub> ha contribuido aproximadamente al 70% del efecto invernadero producido por la humanidad, seguido por el CH<sub>4</sub> con el 23% y el N<sub>2</sub>O con el 7% (IPCC, 2007). La emisión de GEI son generadas principalmente en la combustión de hidrocarburos y a las que debemos sumarles las causadas por la deforestación (Barros, 2005). El aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera de la tierra es una preocupación mundial y se considera como uno de los seis principales gases que intervienen en el efecto invernadero, el cual está contribuyendo en el cambio climático (Concha *et al.*, 2007).

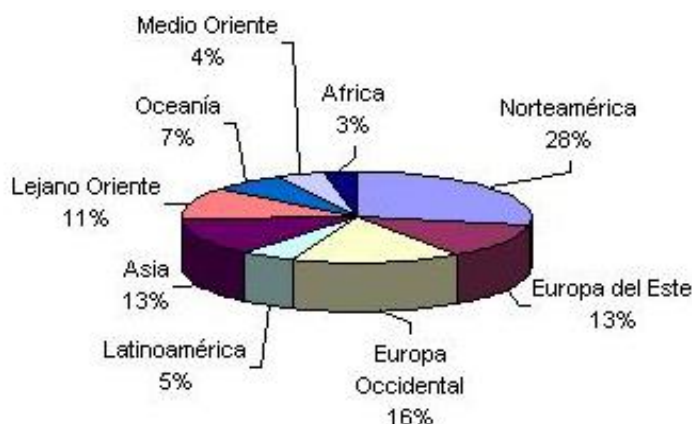
Tabla 1. Gases Efecto Invernadero modificados por acción humana.

<b>Gas</b>	<b>Fuente</b>	<b>Tiempo de residencia</b>	<b>Concentración 2005 ppm (partes por millón).</b>	<b>Crecimiento anual (%)</b>	<b>Potencial de calentamiento (para un horizonte de 100 años)</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Combustión de carburantes fósiles (petróleo, gas, hulla) y madera. Erupciones volcánicas	50-200	379	0.5	1
<b>CH<sub>4</sub></b>	Descomposición anaeróbica de vegetales en tierras húmedas (pantanos, ciénagas, arrozales). Combustión de biomasa Fugas de gas natural	21	1.774	0.9	21
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Prácticas agrícolas y ganaderas (uso de fertilizantes nitrogenados y manejo de estiércol). Combustión de carburantes fósiles	120	319	0.8	310
<b>CFC<sub>11</sub></b>	Origen sintético (propelentes de aerosoles, refrigeración, espumas) Usos industriales Agricultura intensiva	12.5	251	-----	3800
<b>HCFC<sub>2</sub></b>		12.1	169	-----	1500
<b>HFC<sub>23</sub></b>		264	18	-----	11700
<b>SF<sub>6</sub></b>		3200	5.6	-----	23900

Fuente: IPCC 2007.

La distribución de las emisiones de GEI por regiones (Figura 1) pone de relieve que son las regiones más desarrolladas donde más GEI se emiten.

Figura 1: Emisiones de Gases Efecto Invernadero por región.



Fuente: IEA-OECD 2002.

Además, en las nueve regiones consideradas existen ciertos países que tienen mayor contribución según Marlan *et.al.* (2003); tal es el caso de Estados Unidos, que aporta 92.6% de la región de Norteamérica. En Asia, China aporta 92.6% de las emisiones de esta región y es el principal productor de carbón y cemento en el mundo. En Europa del Este influyen Rusia y Ucrania. En el Lejano Oriente 56.5% de las emisiones de la región son aportadas por la India y Corea del Sur, en tanto que Indonesia, Taiwán, Tailandia, Pakistán, Malasia, Singapur y Filipinas contribuyen con 40% (Marlan et al. 2003).

En Europa Occidental dominan Alemania, Reino Unido, Italia, Francia y España, que contribuyen con 74% de las emisiones de la región. En Oceanía, Japón y Australia contribuyen con 97% de las emisiones. En la región de Centro y Sudamérica, México y Brasil contribuyen con el 51.6% de las emisiones. En Medio Oriente Arabia Saudita, Irán y Turquía, aportan el 62% de las emisiones de carbono estimadas. En cuanto África, está dominada por Sudáfrica, que contribuye con 42% de las emisiones, y otro 37% de las mismas es aportado por Egipto, Nigeria, Libia y Argelia (Marlan et al. 2003).

Más recientemente, el Acuerdo de París en 2015, reconoció el secuestro de carbono como una forma de combatir el desequilibrio de la concentración creciente de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Las Partes signatarias del Acuerdo de París reconocieron la importancia de conservar y fortalecer los sumideros y reservorios de GEI frente al problema del calentamiento global (Naciones Unidas, 2015). De hecho, para lograr los objetivos de limitar el calentamiento global acordados por las Partes, el texto del Acuerdo de París afirma que es necesario: "lograr un equilibrio entre las emisiones y las absorciones antropogénicas por sumideros de gases de efecto invernadero, sobre la base de la equidad, y en el contexto del desarrollo sostenible y la reducción de la pobreza" (Naciones Unidas, 2015).

En los últimos años, ante el problema del calentamiento global, los sistemas agroforestales han despertado el interés de diversos gestores e investigadores. En efecto, desde mediados de la década de 1990 se dispone de un gran número de estimaciones e informes sobre el potencial de secuestro de C de varios sistemas agroforestales en diferentes regiones ecológicas a partir de los informes de Dixon et al. (1994). La mayoría de estos informes disponibles sobre el secuestro de C en los Sistemas agroforestales son estimaciones de las existencias de C. Las estimaciones oscilan entre 0,29 y 15,21Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> sobre el suelo, y 30–300 Mg C ha<sup>-1</sup> hasta 1 m de profundidad en el suelo (Nair et al. 2010).

En los Sistemas agroforestales el suelo presenta una capacidad de secuestro de Carbono, mayor que la biomasa vegetal (Lal y Follet 2009; Stockmann et al. 2013). El Carbono orgánico del suelo desempeña un papel crucial en el ciclo global del carbono, dado que, dependiendo del ecosistema y clima de la región, el suelo puede contener tanto o más Carbono que la vegetación que crece sobre ellos (Lal, 2005). Por ello, el IPCC (2007) incluye a los suelos como uno de los compartimientos terrestres de carbono que deberían ser evaluados en los inventarios de Gases de Efecto Invernadero. Además del impacto ambiental, el suelo como sumidero de carbono presenta efectos económicos y sociales positivos; gracias al incremento en la productividad de los suelos, que a su vez incide en la seguridad alimentaria (FAO, ONU, 2002).

Sin embargo, para lograr que el carbono se acumule en los suelos, es necesario implementar medidas de manejo adecuadas. Uno de los retos más importantes del protocolo de Kioto es lograr que los suelos agrícolas de todo el mundo sean un sumidero de carbono y que esta captura sea cuantificable.

## **1.2. El Convenio Marco de las Naciones Unidas. Protocolo de Kioto.**

### **Reparto de emisiones.**

Ante la preocupación a nivel mundial de la creciente concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) adoptada en 1992, estableció un primer marco institucional de principios generales (Stern, 2007; IPCC, 2007, Florides y Christodoulides, 2008). En su artículo 2, la Convención introdujo como objetivo *“lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico proceda de manera sostenible”*. La CMNUCC reconoce como principios básicos de funcionamiento el de las responsabilidades comunes pero diferenciadas de los países, así como el derecho al desarrollo sostenible de los países en desarrollo.

*El principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas se refiere al hecho de que todos los países han de luchar contra el cambio climático, pero de manera que el mayor peso de ese esfuerzo debe recaer en los países que han generado el problema, es decir, los países industrializados. Por otro lado, el derecho al desarrollo sostenible supone reconocer que los países en desarrollo tienen legítimas aspiraciones de desarrollo de sus economías, lo que podrá traducirse, casi inevitablemente, en un incremento de las emisiones en estos países por efecto de la industrialización y el aumento del consumo energético.*

*Adicionalmente, la Convención reconoce que los países desarrollados deben proporcionar recursos financieros nuevos y adicionales para cubrir los gastos que efectúen los países en desarrollo en cumplimiento de sus obligaciones y adoptar todas las medidas posibles para promover, facilitar y financiar la transferencia de tecnología y el acceso a conocimientos sólidos desde un punto de vista ambiental. El cumplimiento de este compromiso financiero, teniendo en cuenta que las prioridades esenciales han de ser el desarrollo económico y social y la erradicación de la pobreza, es condición necesaria para que los países desarrollados cumplan con sus obligaciones en el contexto de la Convención. La CMNUCC obliga a los países firmantes a establecer programas nacionales para reducir las emisiones de GEI y a entregar informes*

periódicamente. Los países se reúnen anualmente para revisar los progresos y debatir futuras medidas. Con el propósito de alcanzar el objetivo de la Convención, en 1997 los países acordaron desarrollar y dotar de un contenido más concreto y jurídicamente vinculante a la CMNUCC, y a estos efectos el 11 de diciembre de 1997 se firmó el denominado Protocolo de Kioto, que entró en vigor en 2005.

El Protocolo de Kioto (PK) es un acuerdo internacional legalmente firmado por las principales economías mundiales y hasta la fecha ha sido ratificada por 163 países (véase Anexo 1). El Protocolo de Kioto comparte las preocupaciones y los principios establecidos en la Convención Marco y basándose en ellos añade nuevos compromisos, más enérgicos y complejos y detallados que los estipulados en la Convención. *En concreto, el Protocolo de Kioto pone en funcionamiento la CMNUCC comprometiendo a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de GEI de conformidad con las metas individuales acordadas.*

El Protocolo de Kioto establece objetivos cuantificados de reducción para los países desarrollados y con economías en transición, países que se detallan en el Anexo I de la CMNUCC. En el acuerdo del Protocolo de Kioto, los países en desarrollo no están obligados a reducir sus emisiones de GEI, mientras que los países industrializados tienen que cumplir objetivos específicos, que pueden ser logrados reduciendo las emisiones de GEI en su propio país, implementando proyectos para reducir las emisiones en otros países, o comerciando. Esto significa que los países que han satisfecho sus obligaciones con Kioto pueden vender sus excesos de créditos de carbono a países que encuentran más caro cumplir sus objetivos.

El objetivo que se establece en Kioto es que *las emisiones de determinados GEI, en concreto del CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, HFC, PFC y el SF<sub>6</sub>, debían reducirse al menos un 5,2% por debajo de los niveles del año base o de referencia (año 1990) para el período 2008-2012.*

El reparto del objetivo de reducción de emisiones (5,2%) entre los países desarrollados no se realizó de modo uniforme pues se tuvieron en cuenta las singularidades de cada país, la combinación de recursos energéticos, niveles de precios, y densidades demográficas. Así, se definieron objetivos individuales de mitigación para cada país Anexo I y se repartieron permisos de emisión entre las empresas establecidas en cada territorio. Como consecuencia, se crearon mercados de carbono, es decir, diferentes

ámbitos donde empresas y países Anexo I comercian sus permisos entre sí y tienen, además, la opción de financiar proyectos de mitigación en países en desarrollo.

Se conoce como sumidero todo sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. Las formaciones vegetales actúan como sumideros de Carbono por su función vital principal, la fotosíntesis. Mediante esta función, *los vegetales absorben CO<sub>2</sub> que compensa tanto las pérdidas de este gas que se producen por la respiración como las emisiones producidas en otros procesos naturales (descomposición de materia orgánica)* (Solomon et al, 2007). El secuestro de carbono lo define la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como *el proceso de eliminar carbono de la atmósfera y depositarlo en un almacén, eso implica la transferencia de dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>) y su almacenamiento en sitios seguros de larga duración* (CMNUCC, 2007). *El secuestro de carbono del Protocolo de Kioto es una de las soluciones, enmarcadas en iniciativas de cooperación internacional, para luchar contra el cambio climático. En esta línea, el Protocolo de Kioto utiliza cálculos estandarizados en términos de estimaciones de absorción de gases de efecto invernadero en el cálculo del balance de GEI mediante una metodología precisa desarrollada por el IPCC* (Naciones Unidas, 2014).

### **1.3. Los Sistemas Agroforestales como sumideros de Carbono**

Para incrementar la intensidad de la captura de carbono de los ecosistemas, se pueden adaptar las estrategias de manejo forestal mediante una variedad de actividades, entre ellas la agroforestería, es decir, el desarrollo de sistemas agroforestales (Birdsey et al., 2000). Según Albrecht y Kandji (2003); Nair et al., (2009); Saha et al., (2010); Kumar y Nair, (2011) los Sistemas agroforestales podrían desempeñar un papel esencial en el almacenamiento y secuestro de carbono porque tienen un alto potencial de almacenamiento en comparación con los monocultivos agrícolas. *Los Sistemas Agroforestales son considerados como una opción que pueden almacenar entre 12 y 228 t C ha<sup>1</sup>* (Alegre et al., 2001; Murty et al., 2013) a fin de poder atenuar los graves efectos que producirá el cambio climático.

La importancia de estos sistemas se incrementa cuando se asocian con especies forestales (maderables, frutales e industriales) que presentan mayor eficiencia en la fijación y almacenamiento de carbono (Somarriba y Harvey, 2003; Concha et al., 2007).

La presencia de los árboles y arbustos tiene además un impacto positivo asociado a la conservación de la biodiversidad, mitigación de la pobreza y seguridad alimentaria ya que funcionan a través de múltiples interacciones entre árboles, cultivos, animales, ambiente y el ser humano, así como en la reducción de costos de producción (Beer *et al.*, 2004).

Los Sistemas Agroforestales producen muchas ventajas positivas, siendo necesario caracterizar sus factores socio económicos y ambientales más relevantes, para mejorar las potencialidades de los agricultores y promoverlos como una alternativa de manejo sostenible (Roa *et al.*, 2009). En los Sistemas Agroforestales, *el secuestro de carbono se materializa mediante la absorción de CO<sub>2</sub> atmosférico durante la fotosíntesis y la transferencia de carbono fijo a la vegetación, y a los reservorios de suelo para el almacenamiento a largo plazo* (Nair *et al.* 2010); por lo tanto, ocurre en dos segmentos principales de los Sistemas Agroforestales: sobre y bajo del suelo.

En base a la noción de que la incorporación de árboles en campos de cultivo y pastos daría lugar a un mayor almacenamiento neto de carbono por encima y por debajo del suelo (Palm *et al.* 2004; Haile *et al.* 2008), se cree que los Sistemas Agroforestales tienen un mayor potencial para secuestrar carbono que los pastos o campo de cultivos que crecen en condiciones ecológicas similares (Roshetko *et al.* 2002; Kirby y Potvin 2007).

A pesar de las diversas características de los Sistemas Agroforestales que se practican a nivel mundial, Montagnini y Nair 2004, Nair *et al.* 2009, Shibu, 2009 apoyan el concepto de que estos sistemas constituyen una oportunidad excelente *para aumentar las reservas de carbono en la biosfera terrestre.*

*En efecto, la agroforestería fomenta prácticas sostenibles de bajos insumos que minimizan la alteración de los suelos y plantas, enfatizando la vegetación perenne y el reciclaje de nutrientes, contribuyendo a almacenar carbono a largo plazo* (Nair, 2004).

Se estimó que *una superficie total de 585 a 1,215 millones de hectáreas con manejo agroforestal tiene potencial para capturar y almacenar 1.1 a 2.2 Pg de carbono en vegetación y suelos en África, Asia y América durante un periodo de 50 años* (Montagnini y Nair 2004, Nair *et al.* 2009, Shibu, 2009).

Las ventajas por las que generalmente se fomentan los Sistemas Agroforestales son:

- ✓ *Aumentos en la fertilidad del suelo (reciclaje de nutrientes)*

- ✓ *Aumentos de la producción y sostenibilidad a largo plazo (condición básica de casi todos los Sistemas Agroforestales)*
- ✓ *Reducción de la incidencia de algunas plagas y malezas*
- ✓ *Diversificación de los sistemas agrícolas y de los ingresos*
- ✓ *Contribución a la seguridad alimentaria*
- ✓ *Contribución a la conservación de la biodiversidad y otros servicios ambientales (Montagnini y Nair 2004, Nair et al. 2009, Shibu, 2009).*

En efecto, los Sistemas Agroforestales han generado especial atención como estrategia de secuestro de Carbono en países del Sahel. En ellos se han implementado técnicas de manejo agrícola que favorecen el crecimiento de biomasa aérea y raíces, así como la incorporación de materia orgánica al suelo (Lal 2008; Sedjo y Sohngen 2012; Stockmann *et al.* 2013).

#### **1.4. Prácticas de manejo o gestión de los Sistemas Agroforestales.**

Las prácticas agroforestales han sido aprobadas como una estrategia para el secuestro de carbono del suelo bajo programas de forestación y reforestación y también bajo los Mecanismos de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto (Watson *et al.* 2000; IPCC 2007; Smith *et al.* 2007). En efecto, el manejo agroforestal tienen un mayor potencial para aumentar el secuestro de carbono en los Sistemas Agroforestales que la agricultura de monocultivo (Lee y Jose 2003; Nair y Nair 2003; Nair *et al.* 2009; Schoeneberger 2009; Morgan *et al.* 2010).

La incorporación de árboles y arbustos en los Sistemas Agroforestales ayuda a abordar la inseguridad alimentaria, aumentar el secuestro de CO<sub>2</sub> (FAO,2010) y reducir la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas (Thornton y Lipper, 2013). Se estima que el 30% de la población rural del mundo usa árboles que están presentes en el 46% de todas las tierras agrícolas (FAO,2010), con un 55% de las personas en África subsahariana que viven en tierras con al menos un 10% de cobertura forestal (Zomer *et al.*; 2009).

Diversas practicas agroforestales están siendo exitosas en África en general y en particular en los países del Sahel, entre otras:

##### **1.4.1 Los "árboles fertilizantes"**

Se trata de especies arbóreas y arbustivas que capturan nitrógeno de la atmósfera y lo fijan en el suelo. Estos árboles están siendo utilizados en Malawi, Zambia,

Kenia, Tanzania, Níger y Burkina Faso. Además, las ramas y hojarasca puede servir como alimento para el ganado en épocas de escasez. Otros ejemplos son las especies de árboles fertilizantes que están aumentando sustancialmente los rendimientos de maíz en comparación con la producción de maíz sin arboles fertilizante en Zambia (Syampungani *et al.*; 2010).

#### **1.4.2 Técnicas de retención de agua.**

Zai En el Sahel, en países como Níger, Burkina Faso y Mali se ha desarrollado esta técnica de manejo de suelo para enfrentarse a la sequía. Es por tanto una de las más reconocidas y utilizadas por los agricultores en el territorio del Sahel para restaurar las tierras áridas y aumentar la fertilidad de los suelos.

Se trata de pequeñas fosas de forma media luna (Figura 12)., que se realizan en el suelo desnudo antes de sembrar, para recolectar agua. Estas fosas han permitido a los suelos desnudos aumentar su capacidad de retención de agua.

Zai es una técnica que consiste en cavar hoyos de 20 a 40 cm de diámetro y de 10 a 15 cm de profundidad, que se cubren con materia orgánica para recoger el agua superficial y aumentar la infiltración. El cúmulo de hojas atrae a las termitas que cavan canales y mejoran así la estructura del suelo, y por tanto mejora la infiltración del agua que se mantiene en el suelo durante más tiempo (Mando 1997).

La técnica zai también ayuda a la vegetación local a regenerarse: por ejemplo, Kaboré (1994) informó de la aparición de 20 especies herbáceas y 15 especies leñosas después de dos años de aplicación de zai. La técnica de Zai está muy extendida y está bien adaptada a la zona sudano-saheliana (Bengalia, 2008). En la mayoría de los casos los agricultores producen el mijo o sorgo o ambos en el propio zai (Figura 12) junto con la siembra o plantación de árboles En la cosecha, los agricultores cortan los tallos a una altura aproximada de 50-75cm, que de esta forma protegen a los árboles jóvenes contra el pastoreo de animales.

Según Reij y Waters 2001, los agricultores cavan entre 9.000 a 18.000 hoyos por hectárea, con aplicaciones de compost que van desde 5,6 a 11 t/ha. A través de los años, muchos países de la región del Sahel como Níger, Mali y Burkina Faso han utilizado esta técnica localmente para recuperar centenares de hectáreas de tierras degradadas.

Los agricultores cada vez se han interesado más en el zai en tanto que observan que los hoyos recogen y concentran el agua eficientemente y funcionan con pequeñas cantidades de compost y estiércol. El uso del zai permite a los agricultores ampliar su base de recursos y aumenten la seguridad alimentaria de sus hogares. Los rendimientos obtenidos en los campos manejados con zai son consistentemente más altos (entre 870 a 1.590 kg/ha) que aquellas obtenidas en campos sin zai (promedio 500-800 kg/ha) (Reij y Waters, 2001). Reij y Smaling (2008) estimaron los costos de establecimiento y mantenimiento de pozos zai para el manejo del agua y la fertilidad del suelo en US \$ 250 / ha / año y US \$ 65 / ha / año respectivamente.

Figura 2: Técnica de zai de Gobira Sanguina (pueblo de la zona de estudio).



Fuente: Elaboración propia (mayo, 2016).

#### **1.4.3 Distribución de estiércol.**

Una técnica muy frecuente para restaurar las tierras áridas y secas es la distribución de hojarasca, materia orgánica, estiércol en los Sistemas Agroforestales. En los años ochenta, pocos agricultores usaban abono orgánico en los campos de cultivo. El estiércol disponible se utilizaba solo en tierras de regadío. En 2005, al menos el 80% (Adam et al., 2006) de los agricultores entrevistados usaron estiércol orgánico en sus campos de cereales. La mayoría de los agricultores que invierten en la rehabilitación de sus tierras utilizan abono orgánico. En suelos arenosos, la regeneración de la vegetación

muestra una reducción de la erosión eólica y la disponibilidad de basura para fertilizar los suelos. El desarrollo de los Sistemas Agroforestales ha contribuido a aumentar la materia orgánica en los campos de los agricultores, especialmente donde domina *Faidherbia albida* (Larwanou *et al.*, 2006). En áreas donde han intervenido proyectos de gestión de recursos naturales, del 40% al 100% de los agricultores entrevistados afirmaron que hay una mejora en términos de fertilidad del suelo y producción agrícola.

#### **1.4.4 Regeneración Natural Asistida un servicio ambiental y socioeconómico**

En la década de los 70 y 80 del siglo XX, se sucedieron en Sahel graves de sequías que ocasionaron importantes episodios de hambruna y migración de población. El gobierno de Níger planificó y ejecutó un ambicioso proyecto de Reforestación del país. Este programa fracasó por el elevado porcentaje de marras de las especies repobladas (Reij *et al.*, 2009). Sin embargo, gracias a la colaboración de diversas ONGs, en la década de los 80 del siglo pasado, empezaron a implantarse unas técnicas de manejo de los Sistemas Agroforestales que han favorecido el desarrollo de la cubierta arbolado-arbustiva. Estas prácticas se denominan Regeneración Natural Asistida (en francés RNA: *Regeneration Naturelle Assistée*) o bien en inglés *Farmer Managed Natural Regeneration* (FMNR).

Estas técnicas fueron desarrolladas conjuntamente con la población local, lo cual ha sido fundamental para su éxito e implantación (Marou *et al.*, 2002). Además, los gobiernos han desarrollado programas con enfoque participativo donde los científicos, agricultores y agentes de desarrollo colaboran en un proceso de creación y difusión de conocimiento conjunto, capitalizando la experiencia de los agricultores y sus estrategias de intercambio de conocimientos. Las actividades tienen lugar dentro de un proceso continuo de investigación y desarrollo que vincula la protección ambiental y el aumento de los ingresos de los agricultores, además de conectar los problemas locales y globales. Esta práctica se ha convertido en un catalizador para la restauración ambiental a gran escala en el Sahel (Pye, 2013, Reij *et al.*; 2009, Dinesh *et al.*; 2015b).

La RNA consiste en el manejo y protección de árboles y arbustos no plantados con el objetivo de incrementar la cantidad de la vegetación leñosa en los Sistemas Agroforestales. Se basa en la selección de los brotes de cepa de las especies arbóreas y arbustivas que acompañan a los cultivos.

Los agricultores utilizan estos pasos para aplicar la mejora de Regeneración Natural Asistida (WRI 2008; Reij et al., 2009).

- ✚ Cuando preparan terreno para cultivo, seleccionan los tocones de las especies que quieren preservar, basándose en la utilidad de la especie para alimento (frutas y hojas nutritivas), combustible o forraje. Los productos de la mayoría de estas especies, además del uso doméstico pueden ser comercializados.
- ✚ En cada uno de los tocones seleccionados, los agricultores seleccionan los brotes más altos y rectos que van a mantener en cada tocón.
- ✚ Se podan o eliminan los brotes y las ramas laterales no deseados.

El modelo original, desarrollado por Tony Rinaudo de Serving in Mission (SIM), en Níger durante las décadas de 1970 y 1980, involucró cosechar uno de los cinco tallos originales cada año, con una nueva planta recién germinada elegida como reemplazo. Los agricultores adaptaron las técnicas a su propia situación y objetivos. Algunos agricultores favorecieron la aparición de bosques al volver a crecer muchos más tallos por tocón, a veces permitiendo más de 200 tocones por hectárea para regenerar (WRI 2008).

Tres factores determinan qué especies de árboles se regeneran: (1) los tocones y raíces presentes en el campo, que brota; (2) las semillas de árboles y arbustos en la "memoria de semillas" del suelo (semillas que permanecen latentes hasta que la lluvia u otro evento les permita crecer); y (3) semillas presentes en el estiércol de ganado y excrementos de pájaros.

Con esta técnica los agricultores regeneran y protegen la vegetación local existente, y mejoran los medios de subsistencia de la población local, al aumentar la producción de alimentos y mejorar los ingresos de los hogares. Para llevar a cabo la RNA, los agricultores estudian sus tierras y eligen entre las especies locales más adecuadas para regenerarse. Luego seleccionan algunos tallos que desean cultivar, mientras cortan el resto para utilizarlos como forraje o abono y después los tallos seleccionados se cortan hasta la mitad del tronco. Las plantas leñosas perennes interactúan con los suelos y cultivos para crear un sistema agroecológico que mejora las condiciones para el crecimiento del cultivo (World Resources Institute, 2008).

En concierto con estas técnicas de manejo forestal, muchas comunidades rurales también están utilizando programas simples de conservación de suelo y agua para conducir la transformación ecológica (WRI, 2008).

Las ventajas de la RNA incluyen un costo muy económico, un crecimiento rápido y facilidad de reproducción. Además, la RNA puede contribuir a atenuar la inseguridad alimentaria a través de la restauración ambiental y la generación de ingresos de los agricultores. También mediante la práctica de RNA se puede obtener una mayor disponibilidad de hojas y vainas comestibles para el ganado, así como la protección de los cultivos contra el viento y la provisión de combustible (leña) en el uso doméstico.

Es una práctica que mejora la estructura del suelo reduciendo los daños causados por el viento y la evaporación del agua del suelo, almacena humedad en los campos de cultivos y aumenta la resistencia del suelo a la erosión, además permite que los cultivos soporten períodos largos de sequía según las encuestas realizadas durante el trabajo de campo (Reij 2008).

Figura 3: Demostración de la Regeneración Natural Asistida en el campo sobre la especie de *Guiera senegalensis*

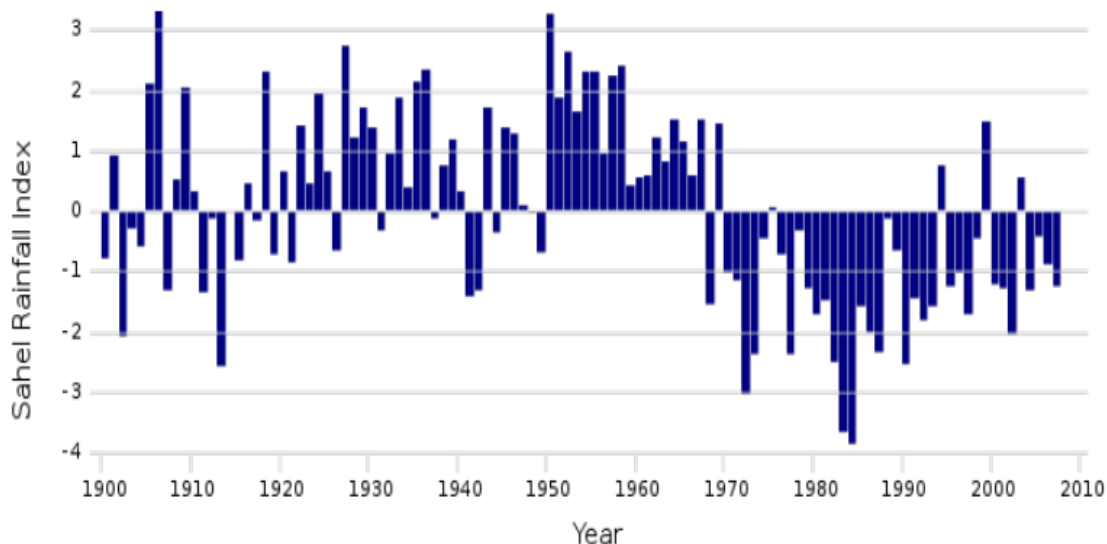


Fuente: Elaboración propia en distintas zonas del trabajo. Níger (2016).

### **1.5 Antecedentes de la investigación.**

En la historia del Sahel (Figura 4) han tenido lugar sequías extremas en 1972, 1973, 1977 y 1984. En 1984 la sequía afectó de forma muy adversa a todos los países del Sahel desde Mauritania a Etiopía. En cambio, la sequía registrada en 1973 fue más localizada, y afectó sobre todo a Malí, Níger y el Chad (Nicholson, 2000). A estas sequías crónicas del medio, se añade una fuerte variabilidad espacio-temporal, característica del régimen de las lluvias del Sahel.

Figura 4: Anomalías en las precipitaciones del Sahel entre 1900 y 2010.



Fuente: JISAO, (2016).

Durante los últimos 30 años se han hecho estudios para profundizar en las causas de la sequía. Algunos autores consideran estas sequías como uno de los primeros signos de cambio climático global. En efecto Mahé y Paturel (2009), consideran que desde 1970 África Occidental ha experimentado uno de los cambios climáticos más duros y perdurables. Forkel *et al.*, (2013); Cook y Pau (2013) y Dardel *et al.* (2014) también han puesto de relieve que la región del Sahel ha sido golpeada por el cambio climático, dando lugar a hambrunas debido a las fluctuaciones en la producción agrícola provocada por la gran variabilidad de la precipitación.

Otros autores apuntan hacia causas antropogénicas, principalmente la degradación del suelo como consecuencia de una mayor presión de la población sobre el territorio, junto a una incorrecta gestión de los recursos naturales (Brooks, 2004)..

A pesar de la degradación asociada a las anomalías en las precipitaciones en el Sahel, Tougiani (2009) y Bégué *et al.* (2011) han comprobado que en muchas regiones la tendencia a la degradación de la tierra es compensada por un efecto de “revegetación” o “regreening”. En efecto estudios e informes describen un aumento de la cobertura arbórea arbustiva a largo plazo en algunas partes del Sahel africano,

contradiendo afirmaciones anteriores de desertificación irreversible en la región (Herrmann et al., 2005; Olsson et al., 2005).

El aumento de las precipitaciones parece haber contribuido al "reverdecimiento" del Sahel, pero estos estudios sugieren que las precipitaciones son insuficientes para explicar el alcance del cambio en la cobertura de la vegetación, apuntando los cambios inducidos por los humanos como una posible explicación (Adam et al., 2006; Larwanou et al., 2006; Reij et al., 2009; Abasse et al., 2009; Leroux et al., 2015). Una narración predominante del reverdecimiento antropogénico de Níger, repetido en múltiples medios de comunicación tanto nacional como internacionales, describe un escenario en el que la degradación ambiental indujo a los agricultores a cambiar sus prácticas de manejo del uso del suelo para proteger y administrar los árboles nativos.

Los análisis realizados por Herrmann *et al.*, 2005, Anyambaa y Tucker 2005, Sendzimir *et al.*, 2011, con datos satelitales de los años 80 mostraron una notable tendencia de crecimiento en la cobertura de la vegetación arbórea-arbustiva. De allí surgió un interés científico en la región del Sahel en África. Los primeros resultados aparecieron en 2003 y mostraron un fuerte aumento en el verdor estacional que se observó en grandes áreas del Sahel durante el período 1982-1999 (Eklundh y Olsson 2003). Los análisis de los datos de precipitación también indicaron un aumento de la precipitación durante el mismo período. Varios estudios han relacionado el aumento del verdor con el aumento de la precipitación mediante el análisis de correlación entre la precipitación observada y el verdor estimado por los satélites (Herrmann *et al.* 2005, Anyambaa y Tucker 2005). Estos mismos investigadores apuntaron que este fenómeno de cambio de cobertura de la región del Sahel debe ser observado con mayores niveles de detalle para establecer las causas y comprender mejor los posibles efectos. Otros investigadores como Milich y Weiss, 2000; Herrmann y Tappan, 2013; Brandt *et al.*, 2014a, 2014b; Herrmann *et al.*, 2014 a través de las encuestas de campo y entrevistas con propietarios locales de las fincas han estudiado los cambios de la cobertura vegetal identificados por alta resolución. Estos resultados fueron seguidos por estudios más recientes verificando los resultados anteriores. Es el caso de algunos países de la región del Sahel como Níger donde se observó tendencias positivas en las imágenes del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en las regiones de Tahoua y Maradi. Se ha identificado un amplio programa de desarrollo rural centrado en la gestión de los recursos naturales y la conservación del suelo a principios de los años ochenta con el apoyo de la

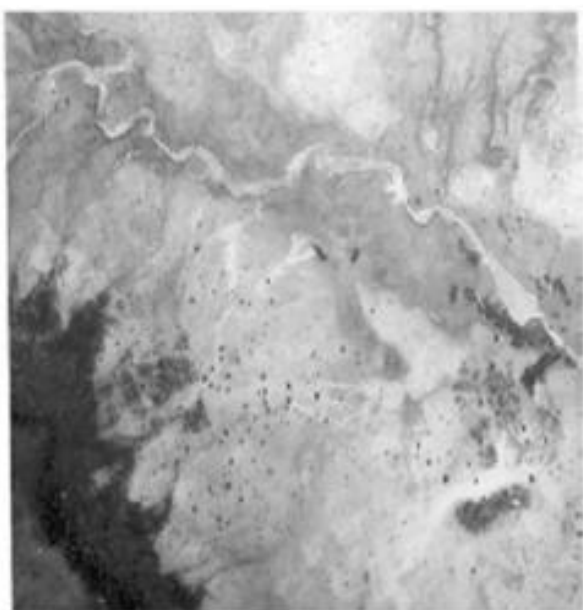
Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y el Programa Mundial de Alimentos (PMA) de las Naciones Unidas. Muchos trabajos recientes hablan sobre la paradoja del Sahel indican la sequía de 80's y los satélites observan una recuperación de la cobertura vegetal (Figura 5b y Figura 6c).

En 1975 (Figura 5a) la cobertura arbórea arbustiva según los estudios realizados en las regiones de Tahoua, Maradi y Zinder de Níger, hay un decrecimiento drástico de la biomasa vegetal. Lo cual coincide con la gran sequía que golpeo los países del Sahel y además en esta época el avance del desierto es uno de los factores que perturba el equilibrio del ecosistema.

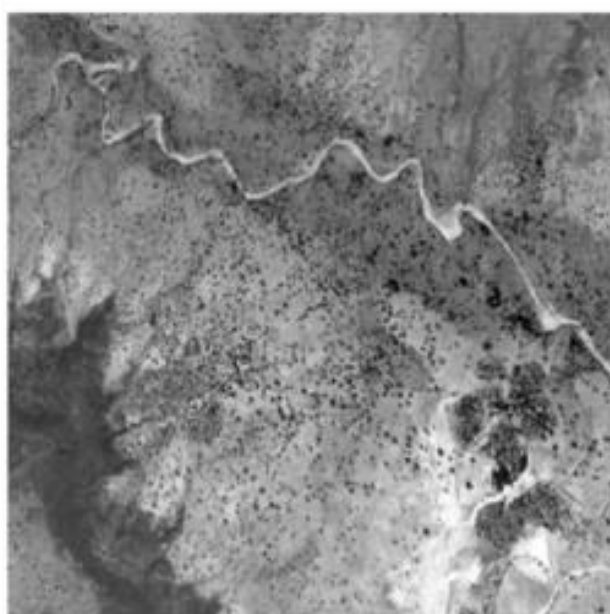
En 2003 (Figura 5b) hubo una recuperación muy importante de la cobertura arbórea arbustiva debido a la iniciativa de los agricultores locales. A lo largo de todos estos años se han puestos en prácticas muchos manejos del uso de suelo con el fin de rehabilitar la cobertura vegetal.

Figura 5: Comparación de imágenes satelitales que muestran la cobertura arbórea en Níger en 1975 a y 2003 b.

a)



b)



Fuente: Etude sahel (2006).

En la Figura 6 (a,b,c) tenemos senario diferentes. En 1955 (Figura 6a) antes la independencia de Níger la cobertura del suelo no estaba degradada y se practicaba la agricultura familiar. En los años 1975 (Figura 6b) los problemas empezaron a surgir por

causa de las sequias y el avance del desierto provocando una degradación total de los suelos.

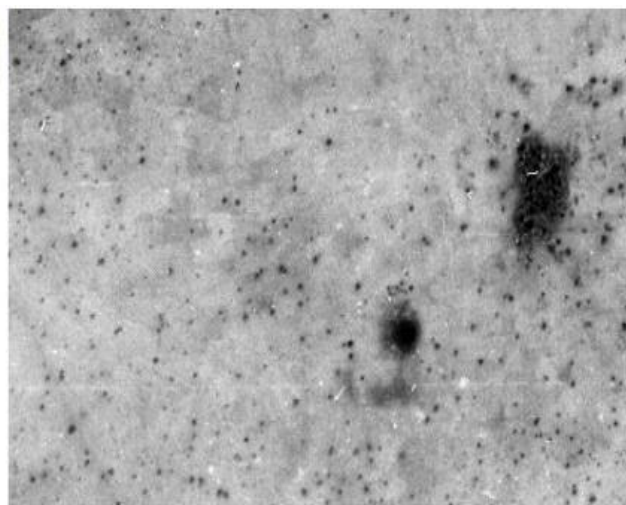
En 2005 (Figura 6c) se ve una aumentación de la cobertura arbórea arbustiva debido a la rehabilitación de los suelos degradados, además hubo un incremento de la población.

Figura 6: Evolución del uso de la tierra y la vegetación en el sur de Níger desde 1955 hasta 2005.

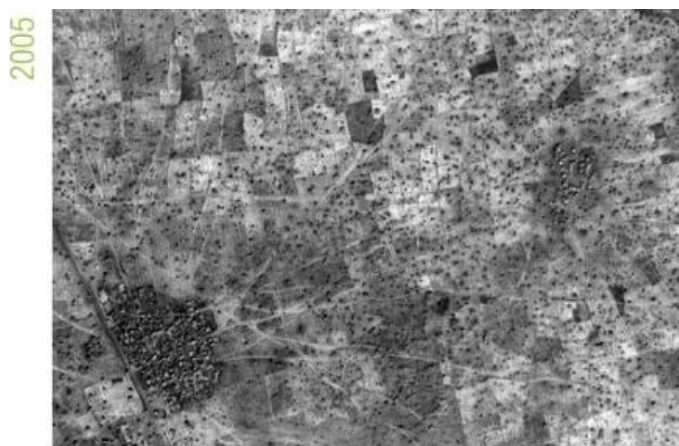
a)



b)



c)



Fuente: Sendzimir *et al*, 2011.

## **1.6. Hipótesis y objetivos de la investigación.**

### **1.6.1 Método de investigación: hipótesis**

En el anterior contexto, la hipótesis de partida de la presente Tesis Doctoral se plantea con una doble formulación: i) En un Sistema Agroforestal del Suroeste de Níger se ha observado un incremento de la cubierta arbóreo-arbustiva en los últimos 30 años y ii) El incremento de la cubierta arbóreo-arbustiva se ha visto influenciado por las prácticas de manejo de los Sistemas Agroforestales en el Suroeste de Níger, en particular por la aplicación de las técnicas de Regeneración Natural Asistida.

Para abordar dicha hipótesis se han planteado los siguientes objetivos de investigación:

### **1.6.2 Objetivos de investigación.**

#### **OBJETIVOS GENERALES:**

- 1) Identificar cambios en la cobertura arbórea-arbustiva de una región en el Sureste de Níger mediante análisis multitemporal de imágenes Landsat.
- 2) Evaluar la influencia de las técnicas de manejo de los Sistemas Agroforestales en los cambios de cobertura arbóreo-arbustiva de la zona de estudio.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- 1) Evaluar los cambios de cobertura arbórea-arbustiva en las distintas formaciones y usos del suelo de la zona de estudio.
- 2) Analizar la influencia de las técnicas de manejo agroforestal en el suelo de los Sistemas Agroforestales de la zona de estudio.
- 3) Analizar la percepción de población local en relación a las técnicas de manejo agroforestal empleadas en la zona de estudio.
- 4) Estimar el carbono captado de la cobertura arbórea-arbustiva en los Sistemas Agroforestales de la zona de estudio.

## **CAPÍTULO II: ANÁLISIS GEOGRÁFICO: CONOCIENDO EL SAHEL.**

### **2.1 Localización y presentación de los países del territorio del Sahel.**

El Sahel es la zona de transición entre el desierto del Sáhara en el norte y la sabana sudanesa en el sur (Figura 7). Ferran y Induráin, (2002) definen las sábanas como ecosistemas de enormes extensiones que están formadas por una mezcla de características de bosques con un estrato arbóreo-arbustivo en el cual la parte arbórea tiene una escasa cobertura de arbustos y árboles muy dispersos. Las formaciones de sabana ocupan 43% de la superficie terrestre, y se producen en todos los continentes del mundo y la mayor extensión se encuentra en las regiones tropicales húmedas y secas de África, América del Sur y Australia (Faleiro y Farías Neto, 2008). Según Hien (2004), las sábanas son muy importantes por tener una capacidad enorme de atenuar el dióxido de carbono. Sus ecosistemas juegan un papel muy importante como sumideros de dióxido de carbono y además ayudan a mitigar el cambio climático. Según Grace et al., (2006) la producción primaria neta global de la biomasa vegetal es de aproximadamente 67,6 Gt C/ año, de los cuales casi el 30% se produce en los ecosistemas de sabana 19,9 Gt /año. Estos mismos autores apuntan que las sábanas son ecosistemas relativamente productivos, pero están sujetos a frecuentes perturbaciones, como incendios que limitan la acumulación de biomasa. La media de producción primaria neta en las sábanas se ha estimado en 7.2 t C ha / año.

El territorio del Sahel se extiende a través del norte del continente africano entre el Océano Atlántico y el Mar Rojo, y cubre un espacio inmenso con más de 5.000 km de largo y casi 1.000 km de ancho con un área de 3.053.200 km<sup>2</sup> (Ballesteros, 2015). El Sahel está compuesto por los siguientes países: Senegal, Mauritania, Mali, Burkina Faso, Níger, Nigeria, Chad, Sudán, Eritrea, Etiopía y Somalia. Debido a su posición geográfico, climático y social, el territorio del Sahel presenta características tanto humanas como naturales que la vuelven un espacio singular. En esta región se unen los pueblos árabes y bereberes del norte con los pueblos negros al sur. Las fronteras en la región son muy porosas y difíciles de controlar. La gran extensión territorial de los países hace que existan muchas zonas que escapan del control del Estado caracterizado por lo general por la debilidad de sus instituciones.

Los países que conforman la zona geográfica del Sahel son los siguientes:

**SENEGAL:** el nombre oficial es la República de Senegal y tiene su capital en Dakar. Está limitado al norte con Mauritania, al este con Mali al sur con Guinea-Bissau. El oeste de Senegal se sitúa en la costa del Océano Atlántico donde comparte frontera con Gambia. El idioma oficial del Estado es el francés, pero se reconocen otras lenguas nacionales como: wolof, serer, peul, mandinga, soninké y diola. La moneda es el Franco CFA. Se ubica en una llanura que se extiende desde la costa este hacia el sudeste, alcanzando una altitud máxima de 581m. La vegetación de esta zona es la propia de la sabana saheliana. En la región del sur se encuentra la selva subtropical. En cuanto a recursos naturales el país posee importantes reservas de petróleo, de oro, fosfatos, hierro, mármol, turba y titanio.

**MAURITANIA:** La capital es Nuakchott y su moneda se llama Ouguiya. Las lenguas oficiales son el árabe, poular, soninké y wolof. Gran parte de la población habla francés. El país está dividido en cuatro zonas: el sur caracterizado por la existencia de dunas fijas anuales y con cierta vegetación herbácea que ofrece pastos para ganado ovino y bovino, lo que constituye la zona saheliana en Mauritania. El norte, inmerso en el desierto del Sahara y con una pluviometría inferior a 100mm y con pocos puntos de agua. En tercer lugar, se encuentra la costa que es de difícil acceso por la abundancia de bancos de arena, siendo la parte más seca del país. Y, por último, las mesetas de Adrar (500 m) y Tagant (300 m), donde las lluvias son más abundantes y por tanto más vegetación. El país posee una importante industria ligada al hierro. Se han encontrado recientemente yacimientos de gas, oro, cobre y fosfato.

**MALI:** es un país extenso compartiendo frontera con Argelia al norte, Mauritania y Senegal al oeste, con Guinea y Costa de Marfil al sur, y al este con Burkina Faso y Níger. Su capital es Bamako y la moneda es el Franco CFA. Se distingue dos zonas, el norte, con un clima muy árido. La región está inmersa en el desierto del Sahara. Se extiende a través vastas llanuras interrumpidas por el Adrar de los Iforas que alcanza los 1000m de altitud y al sur se encuentra la sabana saheliana, recorrida por el río Níger. El país posee una gran producción de oro.

**BURKINA FASO:** esta limita con Costa de Marfil, Ghana y Togo al sur, Benín al sureste, Malí al noroeste, Níger al este. Su capital es Ouagadougou, y su moneda es el Franco FCA. La lengua oficial es el francés, sin embargo, la población habla otras

lenguas, principalmente el diula o moré según la etnia. En el suroeste del país, dónde se encuentra el monte más alto, Ténakourou (749m), el resto se halla en una meseta a unos 200m-300m. El clima es árido, y la vegetación de tipo sabana con matorrales y árboles dispersos (baobabs y acacias). Principalmente se extrae oro y también posee manganeso, bauxita, fosfatos, cobre, zinc, plomo, hierro y níquel.

**NÍGER:** La República de Níger tiene capital Niamey y su moneda es el Franco CFA. Esta limitado al norte con Argelia y Libia, al este con Chad, al sur con Nigeria, Benín y Burkina Faso, y al oeste con Mali. Sus zonas septentrional y central se encuentran en las áreas desérticas del Sahara. Se localizan macizos montañosos que alcanzan los 2000m. Los recursos más importantes del país son los depósitos de petróleo, uranio y gas, también posee oro, carbón, hierro, piedra caliza y fosfatos.

**NIGERIA:** El país, oficialmente se llama la República Federal de Nigeria, está situado en el Golfo de Guinea, limitando con Benín al oeste, con Níger y Chad al norte y con Camerún al este. Su capital es Abuja. La moneda oficial es el naira y el idioma es el inglés. Sin embargo, se reconocen más de doscientas lenguas y dialectos locales, como el hausa, yoruba, igbo. Es un país muy rico en recursos, poseyendo cerca de 34 tipos diferentes de minerales, entre ellos oro, hierro, carbón y piedra caliza. Además, es el primer productor de petróleo y gas de África y el décimo del Mundo.

**CHAD:** La República de Chad se encuentra en el centro de África, limitando al norte con Libia, al sur con la República Centroafricana y Camerún, al este con Sudán y al oeste con Níger, Nigeria y Camerún. Su capital es Yamena. La lengua oficial es el francés y también la población habla el árabe y la sara. Su moneda es el Franco CFA. El país se divide en tres áreas geográficas: el norte, inmerso en el desierto del Sahara, cuyo relieve forma una gran depresión desértica rodeada de montañas y mesetas; el centro con clima saheliano, formado por una sabana árida y seca, que contrasta con el paisaje del lago Chad, en el este de la región; y, por último, el sur, con un clima subtropical y una vegetación de tipo boscoso. El país posee una industria muy importante que se dedica a la extracción de petróleo.

**SUDÁN:** La República de Sudán limita al norte con Egipto, al este con Eritrea y Etiopía y con el Mar Rojo y al oeste con Libia, Chad y la República Centroafricana. La lengua oficial es el árabe, aunque convive con multitud de dialectos locales. La moneda es la libra sudanesa. En el centro se encuentra una llanura, bordeada al este y al oeste por montañas. En el sur el clima es tropical, mientras que en el norte es desértico donde las

temperaturas sobrepasan diariamente los 42 °C. Con la división de Sudán en dos partes, el Sur perdió importantes yacimientos petrolíferos. A pesar de ello, la industria petrolera continúa siendo importante, así como la extracción de oro. Además, cuenta con yacimientos de potasio, cromita, plata, hierro, cobre, diamantes, amianto, uranio sin explotar.

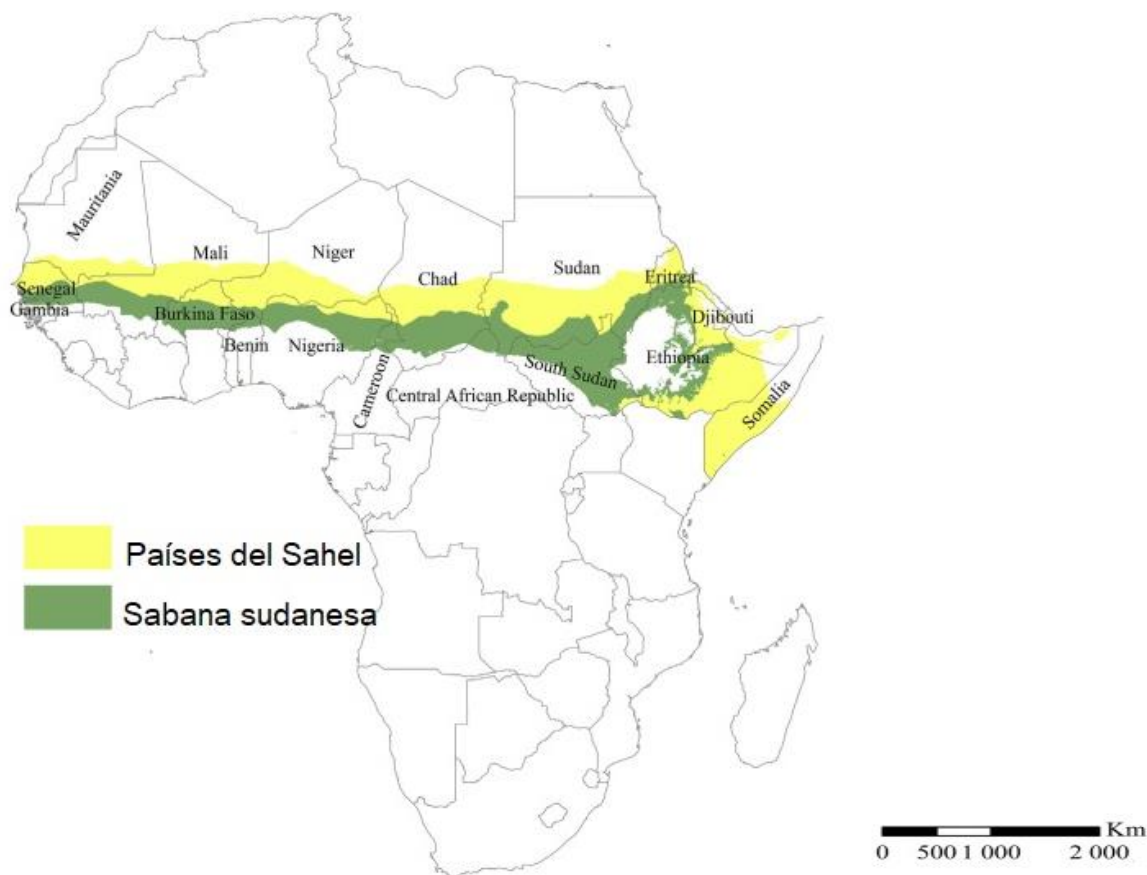
**ERITREA:** tiene su capital en Asmara. Está limitado con Sudán al norte y oeste, con Etiopía al sur, Djibouti al sureste y el Mar Rojo al este. Las lenguas mayoritarias son el árabe y el tigrinya. La moneda oficial es el Nakfa. Desde el norte hacia el sureste de Eritrea se encuentra el Gran Valle del Rift. Se distinguen varias zonas climáticas: por un lado, la franja costera al este, muy seca y donde se alcanzan máximas de 50° C. Por otro lado, la zona oeste del país, donde el terreno es cada vez más desértico. Finalmente, al sur se encuentran los macizos de más de 2500m de altura, en los que se dan características climáticas tropicales. A parte de importantes yacimientos de oro y plata, el país tiene reservas de cobre, zinc, níquel y cromita.

**ETIOPÍA:** El nombre oficial del país es el de República Democrática Federal de Etiopía, su capital se sitúa en Addis Abeba. Comparte fronteras con Djibouti al norte, con Sudán y Sudán del Sur al oeste, al sur con Kenia y con Somalia al este y parte del sur. La lengua oficial es el amárico y la moneda de curso legal es el Birr. La topografía de Etiopía está compuesta por una gran meseta dividida por dos amplias cadenas montañosas atravesadas por el Valle del Rift. En el Lago Tana, al noroeste del país, nace el Nilo Azul, el afluente más caudaloso del Nilo. El clima en la mitad norte del país se extiende la sabana saheliana, mientras que al sur se halla clima de tipo tropical. En cuanto a los recursos naturales se explota mayoritariamente el oro; pero también tiene reservas de piedras preciosas como diamantes y zafiros, y otros minerales de uso industrial como el potasio.

**SOMALIA:** Se encuentra en el Cuerno de África, donde comparte fronteras con Kenia al sur y al suroeste, Etiopía al oeste y Yibuti al norte. Su capital es Mogadiscio. Las lenguas oficiales son el somalí y el árabe. El país se encuentra en una zona árida. El territorio es más yermo y accidentado al norte y llano en la zona centro y sur. El clima es árido y muy cálido, con dos estaciones de lluvias vinculadas a la orientación del monzón, con periodos secos intermedios. Diariamente, el país se ve azotado por fenómenos meteorológicos extremos, alternando periodos de sequía e inundaciones. En casos extremos, como en 1974, 1980, 2010- 2011 y 2017, la sequía ha llegado a provocar

graves hambrunas. El país posee sal, estaño, cinc, cobre, yeso, manganeso, uranio, reservas de petróleo y gas natural.

Figura 7: Los países que constituyen el Sahel.



Fuente: Elaboración propia modificado de Hijmans et al., 2005

## **2.2. Estudio del medio físico de un espacio singular.**

Se describe el territorio del Sahel por las altas temperaturas y la escasez de lluvias. Se identifica también por la existencia de dos estaciones climáticas, una larga que es seca e invernal (coincide con el invierno europeo) y otra lluviosa corta y caluroso (el verano en Europa). La altitud media de la región del Sahel oscila entre los 200 y los 400 metros sobre el nivel del mar. La topografía del Sahel es principalmente llana y se compone generalmente de un paisaje de mesetas planas arenosas y ferruginosa en la superficie. Existen multitud de mesetas aisladas y pequeñas cadenas montañosas con baja elevación. Las mesetas están recubiertas por una vegetación principalmente por acacias, típica de las regiones secas.

En el Sahel hay un fenómeno conocido como el Monzón Africano, que se produce al colisionar los vientos secos y muy cálidos del Sahara (conocidos como Harmattan),

con los vientos fríos y húmedos que se forman gracias a la existencia de la Zona de Convergencia Intertropical (un cinturón de bajas presiones a lo largo de la línea del Ecuador). Durante los meses de mayo hasta octubre, esta masa húmeda se desplaza hacia el norte, y al chocar con el “Harmattan”, provoca una serie de lluvias de forma torrencial. La época del monzón en el Sahel se concentra únicamente en dos meses: julio y agosto (Masih y Maskey, 2014).

La formación vegetal característica del Sahel es la sabana, amplias extensiones en las que se reparten matorrales, arbustos, y especies arbóreas (acacias, eucaliptos, mimosas, baobabs y plantas espinosas). En esta zona se encuentra “brousse *tigrée*” una vegetación que se le conoce como matorral con cobertura en manchas, de difícil acceso, y constituye la principal fuente de material combustible de las poblaciones. Hay también las estepas semiáridas que están cubiertas de pastos naturales y arbustos espinosos que sirven de forraje para el ganado típico de la región (camellos, bueyes, ovejas). Excepto algunas especies de acacias y baobabs apenas crecen árboles.

### **2.3. Los factores demográfico y económico de la zona del Sahel**

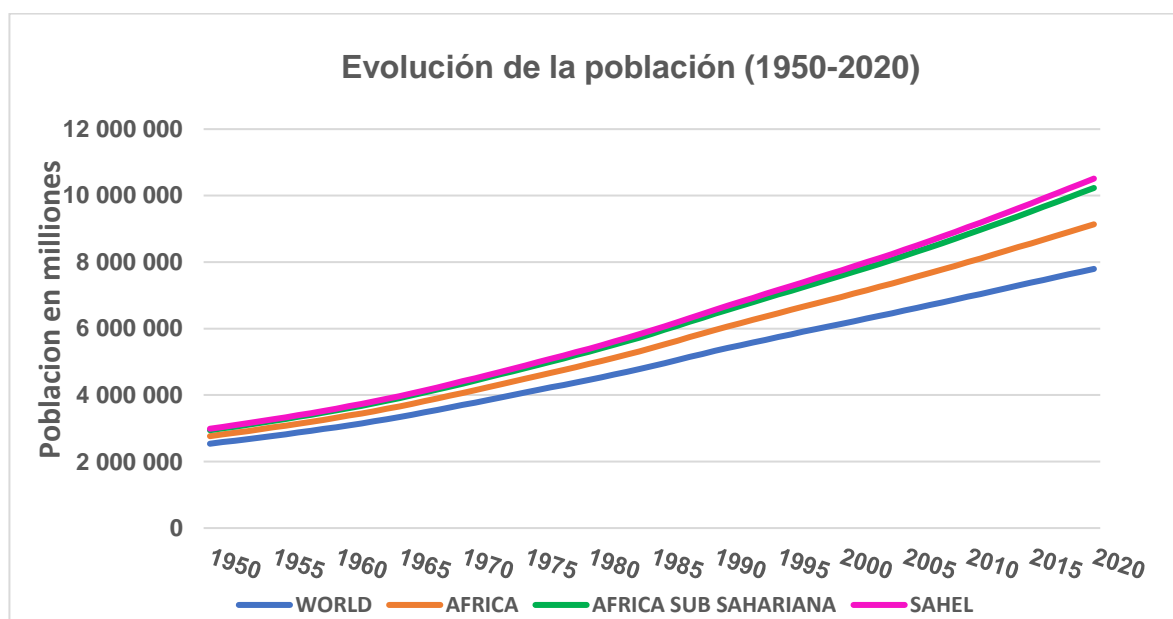
Según las Naciones Unidas *la mitad del crecimiento de la población mundial de aquí a 2030 se producirá en África. En concreto, casi el 24 % del aumento demográfico global, entre hoy y el año 2050, ocurrirá en diez de los once países de la franja del Sahel* (UNDP-DESA ,2017). Estos países serán los responsables del 48 % del incremento poblacional de todo el continente africano durante la próxima década según datos de la ONU (Figura 8). Según los datos de World Population Prospects (2019) de Naciones Unidas muestran que las tendencias demográficas en esta región del África subsahariana tendrá un crecimiento poblacional descontrolado si los países del Sahel continúan a este ritmo (Figura 8). Las figuras 8 y 9 muestran un crecimiento alto de los países del Sahel. Etiopía es el país que presentará un mayor aumento en cuanto al número de personas (Figura 9).

El Sahel cuenta con una de las tasas de nacimiento más altas del mundo. Es una región de población muy joven y registra los índices de natalidad más altos del mundo. En los países del Sahel, la media es de 4,9 hijos por mujer, con un pico de 7,1 en Níger según los datos de UNDP tasa de fertilidad por mujer. Esto se debe a que la labor de las mujeres se concentra en las tareas del hogar. Desde el punto de vista demográfico, esta situación no es sostenible porque la región se enfrenta a muchos desafíos en todos los

planes social, económico y ambiental. El caso de Níger es una catástrofe humanitaria debido a una tasa de fecundidad superior a 7 hijos por mujer y además se trata de un país que la mayor parte es desértica.

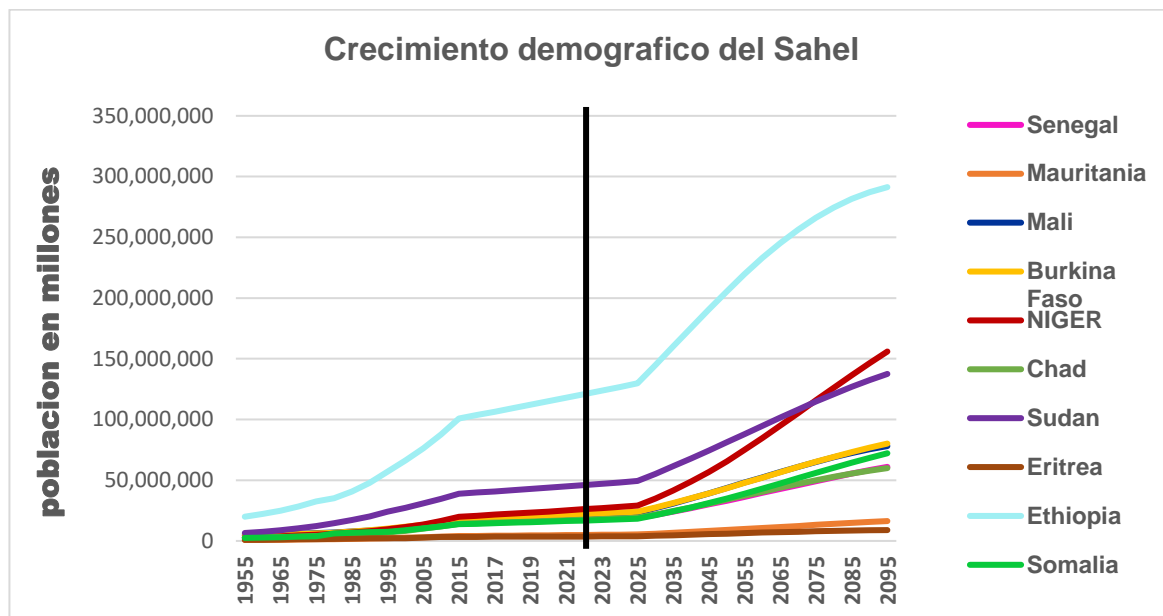
La tasa de natalidad contabilizada como el número de nacimientos por cada 1.000 habitantes es de 50 en Mali, 46 en Chad, 34 en Mauritania, 33 en Sudán y 36 en Sudan del Sur; todas ellas excesivamente altas, y especialmente si las comparamos con los 9 de España (Ballesteros, 2015). Los nacimientos en esta región son cinco veces superiores al de los países europeos. Sin embargo, su esperanza de vida es de las más bajas del mundo, en Mali es de 55 años, 58 en Níger, 51 en Chad, y 62 en Sudán y en Mauritania, que, si lo comparamos con España, que tiene una esperanza de vida de 82 años, arroja una diferencia de casi 1,5 veces menor en los países africanos (Ballesteros, 2015). Otra característica de la población del entorno del Sahel es su concentración en los grandes núcleos urbanos, así, en Eritrea, de los casi 5 millones de habitantes, el 10% vive en su capital, Asmara. Según los datos de World Population Prospects (2019 Revision) de los 3.889.880 de habitantes de Mauritania, la mitad viven en la capital Nuakchot o en los suburbios que la circundan. En Mali, la población asciende a 15.301.650 de personas, de los que más del 10% vive en la capital, Bamako. Por su parte, Níger tiene 16.068.994 habitantes de los que más de 800.000 viven en Niamey; mientras que Chad, con 12.825.314 habitantes más de 1 millón viven en la capital, Yamena.

**Figura 8:** Crecimiento rápido de la población africana en particular el Sahel.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Review.

Figura 9: Crecimiento histórico y previsión demográfico del Sahel (1955-2095).



Fuente: Elaboración propia en base a datos de World Population Prospects (2019)

En cuanto la economía, históricamente el Sahel ha sido protagonista de importantes y dinámicas rutas comerciales. El comercio de oro, sal, algodón y pieles enriquecía a importantes reinos y ciudades. La economía familiar también juega un papel importante. Para las poblaciones saharianas, sobre todo las que habitan en zonas rurales, el tener una familia numerosa es también símbolo de poder económico, pues no solo constituye una fuente de ingresos en el presente (cuidan el ganado, trabajan las tierras), sino que son el equivalente a un «plan de pensiones», pues serán los hijos los que cuiden de los padres en la vejez.

*África y, en concreto, la región del Sahel tiene abundantes y significativos recursos naturales, minerales y energéticos, tales como oro, uranio, diamantes, bauxita, zinc, litio y petróleo. Esta condición, la posiciona en un lugar destacado en los mercados internacionales a la vez que genera interés tanto para las grandes economías tradicionales como para las potencias emergentes. A pesar de la abundancia de recursos estratégicos, su explotación no está interrelacionada con el desarrollo social y económico de la región, porque los escasos beneficios obtenidos no permiten financiar*

*grandes infraestructuras, están mal repartidos, solo benefician a una pequeña minoría cercana al poder y no son generadores de empleo (Michailof, 2015).*

A pesar de los importantes recursos naturales, minerales y energéticos que posee la región, estos países son extremadamente dependientes tanto del sector primario como de un fluctuante mercado internacional de materias primas que incide en las economías nacionales ralentizándolas. Otro aspecto que considerar es la escasa diversificación de las economías del Sahel, basadas en las materias primas, agricultura y en la industria extractiva.

Hoy en día el territorio del Sahel se convierte en la agenda geopolítica internacional por las fuentes de riquezas fundamentales que alberga su suelo: la tecnología, las energías y por su diversidad de recursos naturales. Todas ellas se sitúan en la región del Sahel y en concreto en el espacio transfronterizo marcado por el este de Mauritania, norte y sur de Mali y norte de Níger.

#### **2.4. “Regreening” en los Sistemas Agroforestales del Sahel**

Básicamente, el “Regreening” se relaciona con un aumento en la biomasa de la vegetación (Olsson et al. 2005). La tendencia del “Regreening” es confirmada por los datos de lluvia (Hickler et al. 2005, Huber et al. 2011) y por datos de teledetección (Eklundh y Olsson 2003, Herrmann et al. 2005, Olsson et al. 2005). Algunos autores sostienen que las actividades de las organizaciones no gubernamentales (ONG) y las prácticas mejoradas de gestión de la tierra, como la instalación de muros de piedra y la reintroducción de técnicas agrícolas tradicionales, han contribuido en gran medida a la reverberación del Sahel (Reij y Kaborée 2004, Reij et al. 2005).

Según estudios hechos por el IPCC, Ackerley *et al.*, (2011), Biasutti, (2013), Lebel y Ali, (2009), y Nicholson, (2000), en general las precipitaciones en el Sahel se han experimentado una recuperación. Hubo un aumento significativo en la precipitación en la región del Sahel que explica el aumento de la cobertura arbórea arbustiva de 1994 a 2012. (Anyamba *et al.* 2014). Sin embargo, después de controlar las condiciones más húmedas, Herrmann *et al.* (2005) observaron un aumento residual en el verdor (Figura 10) que no se explica por el aumento de la precipitación. Varios estudios proporcionan evidencia de un aumento de la cobertura arbórea-arbustiva en el Sahel (Brandt et al., 2018; Dardel et al., 2014). Es el caso de las dos regiones al sur de Níger, Maradi y

Zinder, que ponen a la vista una cubierta arbórea en aumento y una mejor precipitación (Sendzimir et al., 2011).

Brandt et al., señalan que, en el Sahel, los árboles son más abundantes en los Sistemas Agroforestales, pero son menos abundantes en áreas más residenciales (Brandt et al., 2018). Hanan explica señalando que los agricultores en las regiones más áridas promueven activamente el crecimiento de árboles para el pastoreo del ganado y también pueden irrigar activamente las plántulas para estimular el crecimiento (Hanan, 2018). Este enfoque de la Regeneración Natural Asistida ha sido documentada y promovida por Reij et al., 2009; Reij y Winterbottom, 2015; Reij y Garrity 2016). Sin embargo, el alcance exacto de la regeneración de la cobertura arbórea-arbustiva en el Sahel es más complejo. Si bien múltiples fuentes ilustran que ha habido cierto éxito en algunas regiones, por ejemplo, Burkina Faso, Malí y Níger (Sendzimir et al., 2011; Reij y Garrity, 2016; Tappan et al., 2016; Brandt et al., 2018). Ciertamente, una limitación ha sido el uso de la teledetección como técnica para evaluar el cambio de crecimiento de la cobertura arbórea-arbustiva a lo largo del tiempo. Dado que gran parte de la mejora de la cobertura arbórea-arbustiva se debe a que los agricultores regeneran activamente los árboles y arbustos en los Sistemas Agroforestales. Herrmann y Tappan, por ejemplo, encuentran una pérdida creciente de árboles grandes y un exceso de arbustos (Herrmann y Tappan, 2013), mientras que Descroix et al. sugieren que se necesitaría considerablemente más regeneración natural para asegurar el almacenamiento adecuado de la humedad del suelo, la infiltración y la recarga de las aguas subterráneas (Descroix et al., 2012; Descroix et al., 2018).

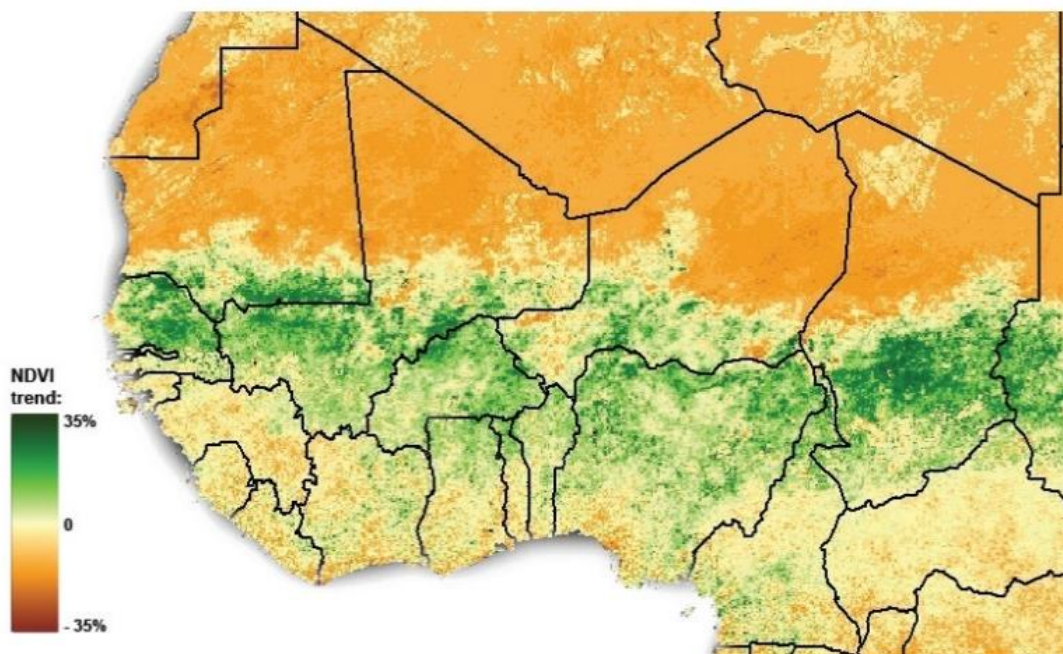
En 2005 ante la Unión Africana, el expresidente Obasanjo de Nigeria expresó la idea de plantar árboles que pueden frenar los vientos del desierto, creando un ambiente propicio para la agricultura (reduciendo la erosión eólica y mejorando el suelo con la fijación del nitrógeno por parte de algunas plantas. Dos años después de la cumbre africana se aprobó el plan creando el programa de la Gran Muralla Verde para el Sahara y la iniciativa del Sahel y ese mismo año muchas regiones iniciaron las primeras plantaciones. Cada país implementa medidas concretas en función de sus características particulares. Así, se han plantado nuevas especies de árboles y arbustos que resisten a la sequía. La restauración de la sabana y la implementación de nuevos planes para su gestión han favorecido la restauración natural del ecosistema. Hoy en día muchas poblaciones de los países del Sahel están logrando muchos beneficios entre

ellos atenuar el cambio climático mediante la plantación de árboles-arbustos lo impacta la mejora calidad ambiental local, evitar la pérdida de suelo fértil, crear un ambiente adecuado para la agricultura de subsistencia, crear pequeñas Sistemas Agroforestales y negocios que mejoren la calidad de vida de la población local, crear un sitio potencial para vivir dignamente y evitar migraciones para buscar nuevos recursos.

Uno de los estudios más recientes, publicado conjuntamente por investigadores de la Universidad de Estocolmo en Suecia, el grupo de científicos de expertos de la NASA en Estados Unidos, del Centro Nacional para la Investigación Científica (CNIC) en Francia y del Centro de Monitoreo Ecológico de Dakar en Senegal, descubrieron un bosque con casi 2 millones de árboles en el Sahel del continente africano. Científicos europeos también han localizado con la ayuda de imágenes por satélite de alta precisión y la inteligencia artificial una zona verde en el desierto africano y están contando cuántos árboles han crecido en este lugar, donde no creían poder encontrar árboles. Esta nueva perspectiva, que combina la inteligencia artificial y los satélites de última generación, puede ayudar a identificar no sólo el número de árboles, sino las diferentes especies. Aunque es difícil saber el número exacto de árboles, debido a las copas que se superponen en las imágenes, los científicos aseguran que esta tecnología establece un nuevo punto de partida para muchas otras investigaciones.

El éxito del “Regreening” en el Sahel y en particular Níger se explica por los cambios de comportamiento de los agricultores y los cambios institucionales El país tiene uno de los Sistemas Agroforestales más grandes de África Occidental (FAO 2007). Por ejemplo, Mortimore et al. (2001) encontraron que a pesar de la decreciente de bosques naturales en Maradi una región pionera del “Regreening” de Níger, las densidades de árboles en los Sistemas Agroforestales estaban aumentando como resultado de la práctica de la Regeneración Natural Asistida por parte de los agricultores. En este sentido según Reij et al. (2009) se han reforestado más de 3 millones de hectáreas mediante esta práctica desde mediados de la década de 1980.

Figura 10: The 'Regreening' del Sahel, 1982 -2006



Fuente: Herrmann *et al.* 2005

## **2.5. Los Sistemas Agroforestales y su contribución a fijación de carbono.**

Muchos estudios en el Sahel de África en relación con el cambio climático se han centrado en el potencial de secuestro de carbono de los Sistemas Agroforestales (SAFs) y su efecto sobre la fertilidad del suelo (Asare *et al.* 2008; Takimoto *et al.* 2008; Woomer *et al.* 2004). Los Sistemas Agroforestales (Figura 11) son más antiguos y extendidos en África Occidental y en particular en los países del Sahel. Bayala *et al.* (2002); Kho *et al.* (2001) definen los Sistemas Agroforestales como parques tradicionales del Sahel. Son campos de cultivo donde también se desarrollan especies leñosas dispersas con múltiples usos (Faye *et al.* 2011, Garrity *et al.* 2010) que los agricultores potencian y ayudan a regenerar. los Sistemas Agroforestales imitan a la sabana natural, dado que se preservan árboles maduros de una variedad de especies entremedias de los cuales se siembran cultivos anuales.

los Sistemas Agroforestales del Sahel son fuentes importantes de bienes y de servicios y realizan funciones ecológicas para las poblaciones rurales. Producen alimentos como frutas, aceites, vegetales de hoja, nueces y condimentos, que complementan los cultivos de alimentos básicos en la dieta local (Faye *et al.* 2011,

Kalinganire *et al.* 2007). Además, los árboles de los Sistemas Agroforestales suministran leña, materiales de construcción, medicamentos y materiales para implementos domésticos y artesanías (Faye *et al.* 2011, Kalinganire *et al.* 2007; Kindt *et al.* 2008 y Bassirou *et al.* 2007). Por su parte estos sistemas también proporcionan servicios ambientales como moderar la temperatura del suelo, controlar la erosión del suelo, mejorar su fertilidad mediante la fijación de nitrógeno y el ciclo de nutrientes de su biomasa foliar (Kalinganire *et al.* 2007), así como la belleza del paisaje. El uso de árboles y arbustos en los Sistemas Agroforestales ayuda a abordar el desafío de lograr mitigar el cambio climático y aumentar la adaptabilidad de los sistemas agrícolas (Torquebiau 2013; FAO 2010). Tal como se indicó anteriormente, una importante contribución de los Sistemas Agroforestales, a la mitigación del Cambio Climático es la fijación de Carbono en los suelos.

La presencia de especies arbustivas y arbóreas en los Sistemas Agroforestales también contribuye a la fijación de Carbono en las estructuras aéreas. En este sentido Kindt *et al.* (2008) identificaron 110 especies de árboles en los Sistemas Agroforestales del Sahel, siendo las principales especies *Adansonia digitata* L., *Faidherbia albida* (Delile) A.Chev., *Guiera senegalensis* J.F.Gmel y *Vitellaria paradoxa* C.F.Gaertn. En estas zonas muchos proyectos pretenden secuestrar carbono mediante el crecimiento natural de los árboles es el caso de países como Níger, Burkina Faso y Senegal. Muchos investigadores reconocieron los Sistemas Agroforestales como una actividad de secuestro de Carbono bajo el enfoque de forestación y reforestación (Albrecht y Kandji, 2003; Makundi y Sathaye, 2004; Sharrow y Ismail, 2004; Haile *et al.*, 2008; Takimoto *et al.*, 2008a; Nair *et al.*, 2009). Varios autores han explicado que los Sistemas Agroforestales tienen un mayor potencial para secuestrar Carbono en los campos de cultivos (Sanchez, 2000; Roshetko *et al.*, 2002; Sharrow y Ismail, 2004; Kirby y Potvin, 2007). Esto se basa en el conocimiento de que la incorporación de árboles en campos de cultivo suministra un mayor secuestro de carbono neto tanto por encima como por debajo del suelo (Palm *et al.*, 2004; Haile *et al.*, 2008; Nair *et al.*, 2009). Sin embargo, Blackie *et al.*, 2014 apuntan que la producción de los árboles es más resistente frente a condiciones ecológicas adversas que la producción agrícola por lo que constituyen una red de seguridad en situaciones de pérdida en los rendimientos de cultivos anuales, así como en periodos de carencia de alimentos entre dos cosechas.

Autores como Albrecht y Kandji, (2003) indican que el potencial para el secuestro de carbono total en Sistemas Agroforestales se estima entre 12 y 228 Mg C ha<sup>-1</sup>. Muchos estudios apuntan que, desde el punto de vista ambiental, el secuestro de Carbono implica principalmente la absorción de CO<sub>2</sub> atmosférico durante la fotosíntesis y la transferencia de Carbono fijo a la vegetación, los detritos y los reservorios de suelo para el almacenamiento a largo plazo (Nair *et al.* 2010).

Esto ocurre en dos segmentos principales de los Sistemas Agroforestales: sobre el suelo y bajo tierra. Cada uno se puede dividir en subsegmentos: el primero en partes específicas de la planta (tallos, hojas, etc., de árboles y componentes herbáceos), y el segundo en biomasa viva como raíces y otras partes de plantas subterráneas, organismos del suelo y Carbono almacenado en varios horizontes del suelo. Con la noción de incorporar árboles en campos de cultivo y pastos resultaría en un mayor almacenamiento neto de C sobre y bajo el suelo (Palm *et al.* 2004; Haile *et al.* 2008). Se cree que los Sistemas Agroforestales tienen un mayor potencial para secuestrar Carbono que los pastos o campos de cultivos que crecen en condiciones ecológicas similares (Roshetko *et al.* 2002; Kirby y Potvin 2007). La mayoría de los estudios disponibles sobre el secuestro de Carbono en los Sistemas Agroforestales son estimaciones de las existencias de Carbono: cuánto Carbono es o podría ser potencialmente, acumulado y almacenado en sitios de Sistemas Agroforestales por encima y por debajo del suelo en diferentes condiciones de ecología y gestión. Las estimaciones varían de 0.29 a 15.21 Mg/ha/año sobre el suelo, y 30–300 Mg C/ha hasta 1 m de profundidad en el suelo (Nair *et al.* 2010).

Figura 11 Sistema Agroforestal en Níger.



Fuente: Larwanou *et al.*, 2006.



## CAPÍTULO III: MATERIALES Y METODOS

### 3.1 Estudio de caso: Níger, un país en el centro del Sahel.

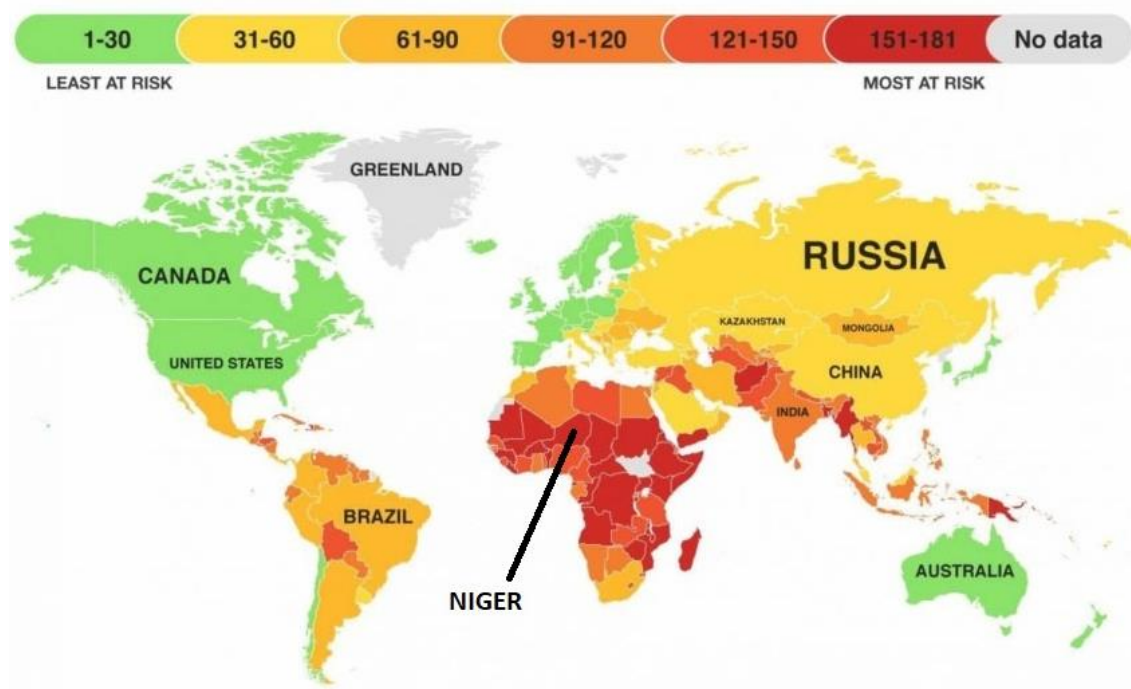
Níger un país en el centro del Sahel es especialmente vulnerable a los impactos del Cambio climático por su ubicación geográfica y aspectos socioeconómicos. Tiene una temporada de lluvias corta y muy variable de 1 a 3 meses durante julio, agosto y septiembre. Esto es seguido por una larga estación seca que se calienta mucho con fuertes vientos harmattanes y tormentas de arena que soplan desde el desierto del Sahara en mayo y junio.

Según el índice ND-GAIN, que refleja la vulnerabilidad de un país al cambio climático y otros desafíos importantes, todos los países del Sahel se encuentran entre el 20% de los más vulnerables y los menos preparados para atenuar el cambio climático. De ellos, tres países Níger, Chad y Mali se encuentran entre el 10% de mayor riesgo.

*El Índice ND-GAIN es un programa de código abierto de la Iniciativa de Adaptación Global que indica qué países son más vulnerables ante el avance del cambio climático. El índice ND-Gain se basa en dos dimensiones: la vulnerabilidad y la resiliencia de los países. La vulnerabilidad busca medir la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación de un país al cambio climático considerando seis sectores que son clave para la vida: la alimentación, el agua, la salud, los servicios de los ecosistemas, el hábitat humano e infraestructura. Por otro lado, el índice toma en cuenta la preparación de los países con base en tres dimensiones: económica, gobernanza y social. El objetivo es medir la capacidad que tiene una nación para "aprovechar las inversiones y convertirlas en acciones de adaptación". Según los datos del Índice ND-Gain, los países más vulnerables al cambio climático son las naciones más pobres y menos desarrolladas del mundo. Son países, en general, que tienen menos posibilidades de sobrevivir a sus graves efectos debido a que muchos de ellos muestran gobiernos inestables y cuyas medidas para combatir y mitigar el cambio climático no acaban de ponerse en marcha. También muestran malas infraestructuras, falta de atención médica, escasez de alimentos y acceso al agua y a un saneamiento adecuado. Georgetown Climate Center (2011).*

Según la figura 13 casi toda África y en particular los países del Sahel se ven con mayor riesgo.

Figura 12: los países más vulnerables al cambio climático según el ND-Gain

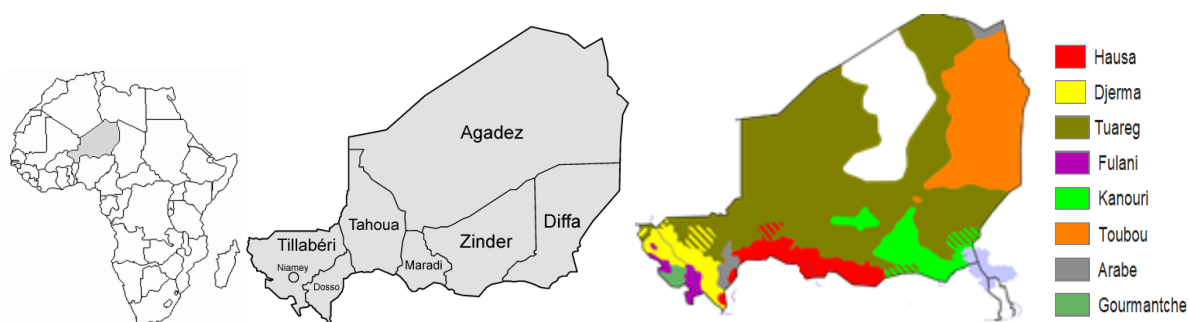


Fuente: Índice de Adaptación Global de la Universidad de Notre Dame.

### 3.1.1) Situación geográfica y divisiones administrativas.

Níger es un país de 1.267.000 km<sup>2</sup> situado en el medio de África Occidental, desértico en tres cuartas partes de su territorio y sin acceso directo al mar. Administrativamente, Níger está organizado en ocho regiones (Figura 16) Niamey, Tillabery, Dosso, Tahoua, Maradi, Zinder, Diffa y Agadez. Las regiones se dividen en 36 departamentos, que a su vez se dividen en 265 comunas, de las cuales 52 son urbanas y 213 rurales (INS & Macro International Inc., 2007). La capital es Niamey. La población estimada en 18.045.729 habitantes en 2015 se distribuye en varios grupos étnicos: hausa (56% de la población), Djerma-Songhai (22%), Fulani (8.5%), Tuaregs (8%), Kanouri (4%), Toubous, árabes y Gurmantche (1%) (Figura 13).

**Figura 13:** Regiones administrativas de la Republica de Níger y distribución de los grupos socio culturales.



**Fuente:** Elaboración propia a partir de Mahamane *et al*, 2012.

El relieve de Níger tiene pocos contrastes. Al nordeste, de difícil acceso, se encuentran las mesetas altas (800 a 1000 m) sobre terrenos escarpados. Al oeste y al sur se encuentran las mesetas bajas (200-500 m), mientras que al norte se encuentra el macizo del Air, limitado al oeste y al sur por una depresión periférica (INS y Macro International Inc., 2007).

La hidrografía del Níger se caracteriza principalmente por la presencia del río Níger que lleva el nombre del país, recorre/fluye a lo largo de unos 550 km a través del oeste del país, es la principal fuente de agua dulce, así como el lago Chad, al sureste del país y algunos cursos de agua semipermanente. La mayor parte del resto de corrientes de aguas son ríos estacionales.

Níger se presenta como una gran llanura antigua muy grande. El país está básicamente ocupado por una extensa meseta, con una elevación promedio de 500 m, de colinas y montañas en el sur.

Tres grandes áreas lo comparten.

- ✚ El suroeste de Níger que es una franja de 1.300 km de largo que sigue la frontera de Nigeria a Malí. Su ancho no supera los 200 km (N'Guigmi, Tanout, Tahoua, Mali). Es la parte menos árida del territorio nacional y, por lo tanto, constituye la parte agrícola donde la lluvia es favorable. Al este, los relieves de Damagaram dividen el agua de drenaje entre la zona de captación del lago Chad y la del Atlántico. Las cuencas de arcilla pueden retener un carácter lacustre. Esta región incluye principalmente mesetas de arenisca con chapas de arena, depresiones y valles fósiles (dallols) reactivados en la temporada de lluvias. Hacia el oeste, la

meseta está cortada por el valle del río Níger, los antiguos valles de los valles de Bosso y Maouri.

- ✚ El Aire que es una cadena montañosa ubicada en el noroeste del país, que se extiende a lo largo de 300 km de norte a sur y 200 km de este a oeste. Presenta un conjunto de altos macizos cristalinos y volcánicos que emergen de una base antigua. Las altitudes a menudo superan los 1000 m: el punto más alto del aire es el monte Bagzane (2.022 m). La ladera sur se hunde en una depresión dominada por el acantilado de Tiguidit. La vertiente oriental está en contacto con la zona arenosa de Ténéré. En el oeste, la transición se lleva a cabo rápidamente con la llanura de Talak y las regiones de Azawak y Tamesna. El Aïr presenta así una variada facies en el centro de una zona de llanuras hiperáridas monótonas.
- ✚ El Tenere que constituye la mayor parte del noreste del país. Es una llanura arenosa hiperárida que termina en el este por el acantilado de Kaouar y en el norte por las mesetas de Djado y Mangueni. Es, con el Majabat al Koubra y el desierto de Libia, la zona más árida del Sahara actual.

### 3.1.2) Clima, vegetación, agricultura y ganadería

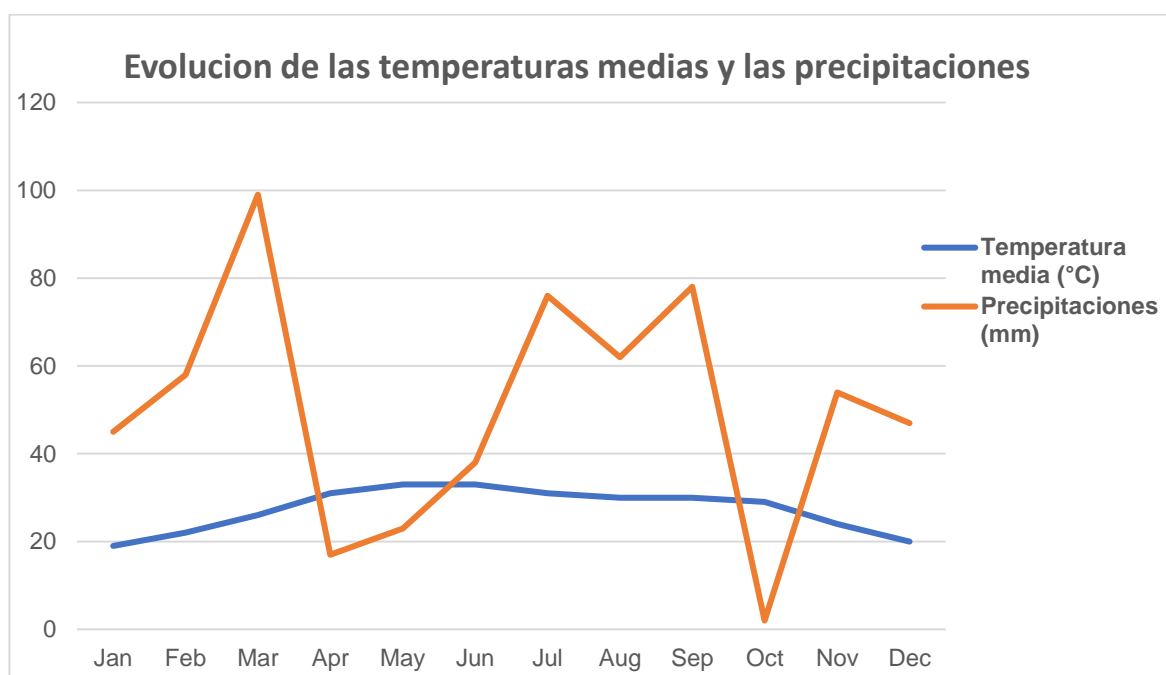
#### CLIMA

En Níger, el largo período de sequías empezó en 1970 y continuó de manera más persistente hasta 1980. Los valores de la precipitación anual de 1983 y 1984 fueron los más bajos jamás registrados en la historia de la región del Sahel, pero también hubo sequías severas en 1972, 1973 y 1977 (Hulme, 2001). Aunque las sequías en las regiones áridas y semiáridas están consideradas como parte de un patrón climático «normal» (Tschakert *et al.*, 2010), la comunidad científica considera las hambrunas catastróficas asociadas a las grandes sequías de 1970 y 1980 como una evidencia indiscutible de cambio climático (Dai *et al.*, 2004). Como parte de la región del Sahel de África Occidental, Níger tiene un clima cálido caracterizado por temperaturas muy altas durante todo el año; una estación seca larga e intensa de octubre a mayo; y una temporada de lluvias breve e irregular vinculada al monzón de África occidental. Las temperaturas medias oscilan entre 21,9 ° y 36,4 ° C, con temperaturas sustancialmente más frías en las regiones montañosas. La precipitación media anual varía de un año a otro, pero generalmente es menor en el norte (100–200 mm) que en el sur (500–600 mm) y se limita a los meses de verano de junio a septiembre. La duración de la

temporada de lluvias varía de uno a dos meses en el norte y de cuatro a cinco meses en el sur.

Según el USAID, las tendencias climáticas históricas incluyen temperatura y precipitación. La temperatura media anual aumentó entre 0,6 ° y 0,8 ° C entre 1970 y 2010, un poco más alto que el promedio mundial. Se ha observado un aumento en el número de días / noches cálidos y una disminución en el número de días / noches fríos. La precipitación acumulada no ha vuelto a los niveles anteriores a la década de 1960 y ciertas características han cambiado: las lluvias parecen ser menos frecuentes y de menor duración con mayor intensidad. Sin embargo, Níger ha visto un regreso de condiciones más húmedas. Entre 2000 y 2009, la precipitación media fue inferior a la media en Níger en un 8%. Se ha observado un aumento en la frecuencia de las lluvias e inundaciones.

**Figura 14:** Historial de las temperaturas y precipitaciones en Níger de 1991 hasta 2020.



**Fuente:** Elaboración propia a partir de los datos de Climate Change Knowledge Portal of The World Bank 1991-2020.

## VEGETACION

Níger perdió una gran cantidad de cobertura arbórea; solo el departamento de Keita se transformó de mesetas, laderas y valles cubiertos de bosques a un paisaje completamente árido en 1984 (Divecchia *et al.*, 2007). El sector forestal en su conjunto

se caracteriza por un déficit enorme de datos. La estimación de superficies forestales se hace a partir de inventarios localizados en distintas regiones (PFN, 2012). A pesar de las limitaciones debido a las condiciones ecológicas extremas que sufre el país, los recursos forestales juegan un papel estratégico para las comunidades locales. Estas aprovechan sus productos para la alimentación, farmacopea, forraje para el ganado, para consumo propio o como productos comerciales. Además, la biomasa leñosa todavía constituye la principal fuente de energía para más del 90% de los hogares.

La vegetación es leñosa de tipo arbóreo y arbustivo. En las mesetas del oeste del país, la vegetación está dominada por un mosaico de estepas y sabanas saharianas cubiertas de hierba. Al este del país en las regiones de Maradi y Zinder se ve un paisaje homogéneo y totalmente agrícola. A lo largo del río Níger se encuentran principalmente las zonas de regadío. En el extremo suroeste de Níger se encuentra el parque nacional W donde viven varios mamíferos grandes, como elefantes, leones, hipopótamos, hienas, guepardos, jabalíes, babuinos, monos verdes y muchas especies de aves (UICN / PACO, 2010). La cubierta vegetal se compone de un mosaico de tres diferentes unidades básicas (D'Herbès y Valentin, 1997): brousse-tigrée en las mesetas, sabana en barbecho y mijo perla en las laderas arenosas. Brousse tigrée "Tiger Bush" consiste en matorrales alternos y tiras desnudas. Las densas franjas de vegetación, que dominan en la naturaleza (Ambouta, 1984), consisten principalmente en especies leñosas, tales como Combretaceae (*Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*, *Combretum glutinosum*, *Guiera senegalensis*). Ahora están ampliamente explotados para obtener leña (con una demanda considerable de la ciudad de Niamey) y los pastos, contribuyendo a su severa degradación. Las laderas y valles fueron cubiertos inicialmente por Sabana arbolada, con mayor densidad de árboles en los fondos del valle. La sabana ahora permanece solo como campos en barbecho de varias edades. La capa leñosa está dominada por *Guiera senegalensis* arbusto, con algunos árboles restantes como Combretaceae, *Piliostigma reticulata*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia spp*, *Faidherbia albida* y algunas *Prosopis africana*. El estrato de hierba en su mayoría consiste en especies anuales principalmente Graminaceae (*Cenchrus biflorus*, *Aristida mutabilis*) y Dicotyledons (*Zornia glochidiata*, *Mitracarpus scaber*), con una gran variabilidad anual (Hiernaux *et al.*, 2009). La cubierta vegetal de la zona de estudio está marcada por el predominio de *Guiera senegalensis*, que no solo es el principal recurso forrajero sino también la primera fuente de leña. Es una especie de la familia

Combretaceae, género Guiera, especie senegalensis. Es un arbusto de unos 3 metros de altura, a veces en forma de arbustos que no superan los 1,5 m (Arbonnier, 2009). Tiene pequeñas hojas perennes y opuestas que son más o menos gris verdosas, ovaladas y redondeadas, un poco suaves en ambos lados (Arbonnier, 2009). Es una especie de las zonas sudano-sahelianas que prospera en suelos pobres, arenosos (Arbonnier, 2009, Thiombiano *et al.*, 2006).

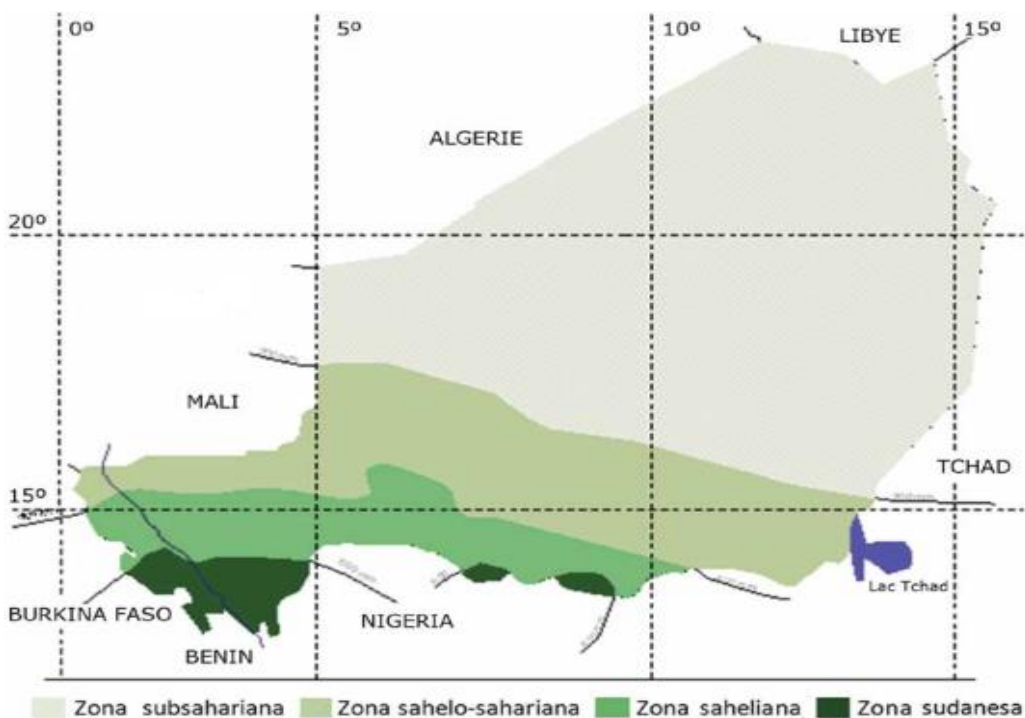
Según CILSS (2016) Las estepas siguen siendo el uso dominante de la tierra y su superficie permanece más o menos estable a lo largo de los años hasta 2013. Respecto a otras clases de vegetación natural, más productivas que las estepas, han disminuido considerablemente como la sabana y los bosques de galería, que representan las formaciones de plantas más densas. Estas formaciones ocupan principalmente valles, ahora despejadas y puestas en cultura (CILSS, 2016). Sin embargo, los sistemas agroforestales, se observa un crecimiento del interés de los agricultores por conservar la regeneración natural, si bien no existen estimaciones al respecto (FAO, 2010).

Según Mahamane *et al.*, (2012), de norte a sur, las lluvias varían desde menos de 100 mm/año a 700-800 mm/año, dividiendo el país en cuatro zonas agroecológicas (Figura 15):

- ✚ la zona subsahariana representa un 68% de la superficie total, de clima seco y desértico con una vegetación, cuando existe, tipo estepa arbustiva, refugiada en las depresiones u oasis. Predomina la actividad ganadera nómada y la agricultura en los oasis dispersos. La mayor parte de la región nororiental, extremadamente árida, es inhabitable.
- ✚ La zona sahelio-sahariana un 10% del territorio, marcada por unas condiciones áridas, de vocación pastoral, con una vegetación leñosa en forma de pseudo estepas dominada por el género *Acacia* acompañada de otras especies como *Commiphora africana* (A.Rich.) Endl., *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile y *Maerua crassifolia* Forssk. Predomina el pastoreo seminómada y la agricultura de subsistencia de secano.
- ✚ La zona saheliana un 19% de la superficie de condiciones semiáridas y con formación arbustiva clara o arbolada. Las especies dominantes son: *Acacia albida* Delile, *Acacia Senegal* (L.) Willd., *Borassus aethiopicum*, *Hyphaene thebaica* (L.) Mart., *Combretum glutinosum* Perr. Predomina la agricultura de secano.

✚ En fin la zona sudanesa un 3% del territorio, cubre la parte más meridional del país en una estrecha franja de tierra a lo largo de la frontera de Benín y Nigeria. La vegetación está compuesta por un estrato herbáceo más o menos continuo. El estrato leñoso formado por árboles y arbustos puede constituir localmente poblaciones más o menos cerradas. Está compuesto principalmente por Combretaceae y por otras especies como *Vitellaria paradoxa* C.F.Gaertn., *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. Y Perr., *Cassia siberiana* DC., *Bombax costatum* Pellegr. y Vuill., *Khaya senegalensis* (Desr.) A.Juss. y especies de galería como *Lanea acida* A. Rich, *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Daniellia oliveri* (Rolfe) Hutch.

Figura 15: Zonas agroecológicas en Níger.



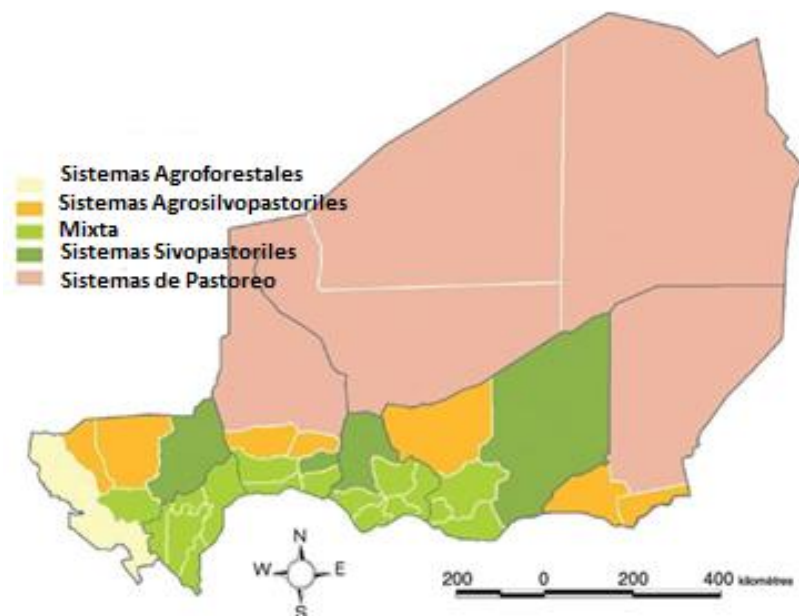
Fuente: Mahamane *et al.*, 2012.

## AGRICULTURA Y GANADERIA

La mayoría de la población obtienen sus ingresos de la agricultura y la ganadería (Figura16) y son muy vulnerables a las sequías periódicas y la desertificación. Se trata de uno de los países más pobres del mundo, si bien es un productor líder de uranio y es rico en muchos otros minerales: carbón, mineral de hierro, estaño, fosfatos, oro,

molibdeno, yeso, sal, petróleo, etc. CILSS (2016). La agricultura de secano y la ganadería realizada principalmente a través del trabajo manual, emplea al 82 por ciento de la población y genera alrededor del 39 por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) del país (FAOSTAT, 2011). La producción primaria de cultivos de secano incluye mijo, sorgo, mandioca, arroz, maíz, hortalizas y caña de azúcar para el consumo local. Los principales cultivos comerciales son: el niébé (carilla), cacahuete, algodón, cebolla, sésamo, garbanzo (FAO, 2009). El ganado (ovejas, cabras, camellos y ganado) se exporta a la vecina Nigeria, donde exigen un precio más alto que en Níger. A pesar del carácter agrario y el papel fundamental de las exportaciones de ganado, la mayor parte de los ingresos de exportación del país proviene de la minería de uranio con sede al norte en la región de Agadez. Dada la dependencia de la mayoría de la población en cultivos de secano, pastos y agua para el pastoreo, la seguridad de los medios de vida en Níger está profundamente relacionada con las tendencias climáticas y las condiciones ambientales.

Figura 16: zona de agricultura y de pastoreo.



Fuente: Elaboración propia modificado a partir de Centre Régional AGRHYMET (2002).

### 3.1.3) Tipologías y ocupación de los suelos de Níger.

En general en el Sahel y en particular Níger sufre en su mayor parte de la doble acción: del hombre y el clima a través de la explotación abusiva de los recursos naturales. Los suelos en el Sahel carecen de un nutriente crítico de las plantas, el

fósforo, y tienen bajo contenido de nitrógeno, un elemento orgánico según algunos estudios realizados en la región. En algunos países del Sahel como Malí y Níger World Resource Institute (1998), indica una disminución general de la fertilidad del suelo en el Sahel de África occidental. La presión demográfica y las prácticas agrícolas insostenibles han llevado a cambios en el uso de la tierra y la saturación completa de la tierra. Como consecuencia en algunas regiones los árboles y arbustos están completamente cortados y el área se quema para la preparación de la tierra. En el pasado, solo la madera muerta se recolectaba como leña. Hoy, la madera verde también se corta para fines comerciales. Algunos estudios de Neef (1999) en Níger apunta que la disminución de la cantidad de especies leñosas y la degradación de las áreas forestales no es causada principalmente por la población rural, sino como consecuencia de la corta de fines comercial con la ayuda de oficiales forestales corruptos. Según LE HOUEROU, 1992 los suelos sahelianos son pobres y estas condiciones generan dificultades para mantener la productividad, porque la mayoría de los agricultores no tienen acceso al uso de fertilizantes minerales.

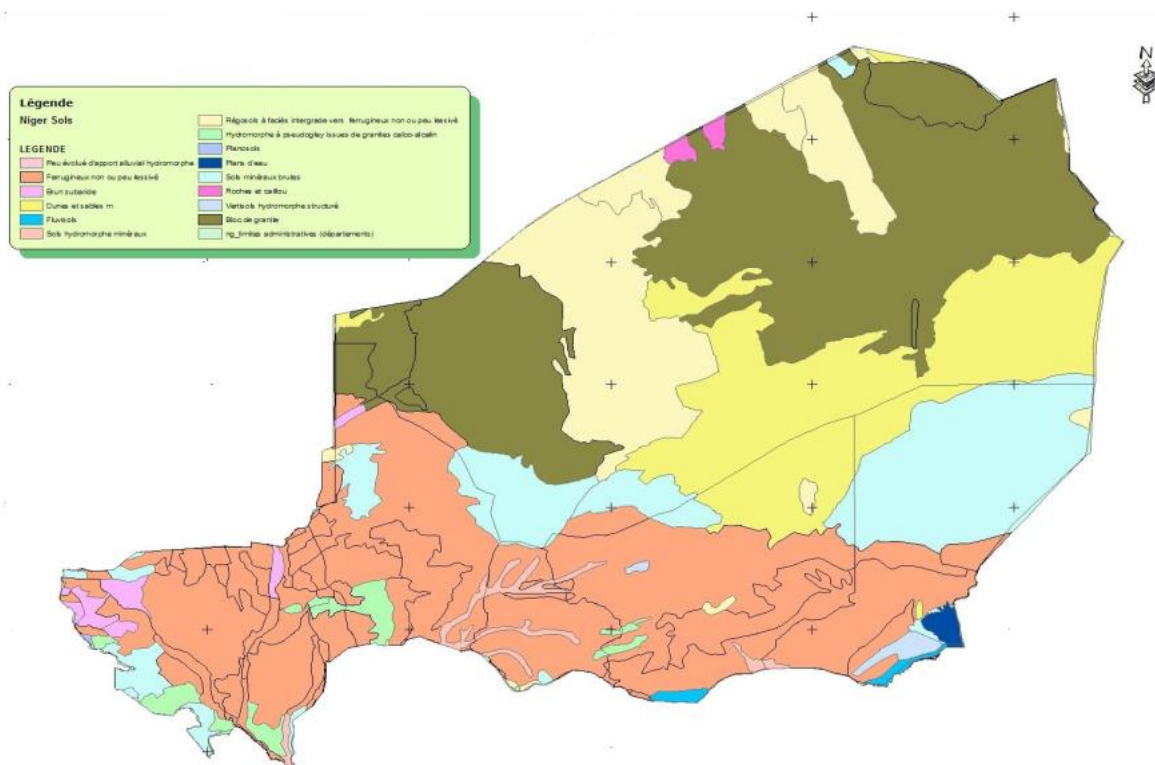
En Níger los suelos cultivados tienen una deficiencia generalizada de materia orgánica y fósforo por ser tierras áridas. Se ven afectados por una disminución continua de la fertilidad de los suelos por el hecho del avance del desierto. Cuando habla de la agricultura del Sahel, se hace referente a que el agua es el factor más limitante, pero la fertilidad del suelo es igual de importante. Los campesinos han tratado de mejorar tradicionalmente la calidad del suelo aplicando abono animal a la tierra o dejando ramas de árboles o arbustos como cobertura al suelo. Principalmente estos agricultores aplican mayores cantidades de residuos de cultivos solo a áreas con muy baja fertilidad del suelo según las encuestas. Para combatir la disminución de la fertilidad, los agricultores recurren a dos técnicas: barbecho y abonado orgánico. En otras regiones del Sahel de África occidental, al menos parte de la vegetación leñosa se deja sin cortar en los campos. Por ejemplo, en Mali, las hojas de los arbustos *G. senegalensis* y *Combretum glutinosum* son reconocidas como fuentes de enriquecimiento del suelo según Kassogue y sus colaboradores (1996). Este manejo es un método tradicional utilizado por los agricultores en Níger para fertilizar áreas infértiles en sus campos o para la rehabilitación de suelos desnudos según Mabrouk *et al.*, 1998. Este método tradicional de Burkina Faso y Mali fue introducido con éxito por proyectos de desarrollo en Níger a principios de la década de 1990 (Hassane *et al.*, 2000). Hay también algunos métodos similares por

ejemplo las medias lunas se usan para rehabilitar los suelos degradados (Hassane et al., 2000). Estas medias lunas tienen un tamaño de 3 a 4 m para captar mayores cantidades de agua de lluvia. Como en el caso de la siembra de estiércol en pequeños pozos que se aplica para mejorar la fertilidad del suelo. Por lo tanto, los agricultores en Níger cambiaron sus estrategias de manejo dejando campos enteros en barbechos para restaurar o mantener al menos en parte la fertilidad del suelo (Haigis, 2000). En efecto, los agricultores luchan contra la pérdida de fertilidad de la tierra poniéndolas en barbecho o bien, después de la cosecha, trayendo el ganado a pastorear a los campos de cultivo y dejando las heces y orina en la superficie. De hecho, según un estudio realizado en el Sahel, los Sistemas AgroForestales mitigan el riesgo climático y mantienen la producción agrícola (Bayala *et al.*, 2014), lo que aumenta su importancia ante el cambio climático futuro esperado (Kassie *et al.*, 2014).

Según las encuestas del mayo 2016 se cortaba los arbustos y árboles en los Sistemas AgroForestales antes y durante el periodo lluvioso para tener más espacio en el campo. Algunos estudios apuntan también que los campesinos cortan los arbustos porque compiten con los cultivos al nivel de los nutrientes en el suelo. Sin embargo, después de cortar los arbustos, se produce rápidamente nuevos brotes. Alrededor de los arbustos cortados, las plantas crecen densamente lo cual aumenta el rendimiento de la producción en algunos campos de cultivos en el parte semiárido de Níger.

Un estudio realizado por Global Soil Partnership (2013) apunta que en Níger 82,36 Mha (65%) se encuentran en la zona sahariana correspondiendo a tipos de suelos minerales, 15,46 Mha (12,2%) en la zona sahelo sahariana con suelos poco desarrollados: suelos de color pardo rojizo con dominancia arenosa, 27,74 Mha (21,9%) en la zona sahelo sudanesa con tipo de suelo ferruginosos tropical; y por último 1,14 Mha (0,9%) en la zona sudanesa con tipo de suelos ferruginosos y fersialíticos (Garba, 2000). En detalle los suelos minerales se encuentran en el desierto y ocupan más de la mitad del territorio nacional. No son cultivables. Los suelos poco desarrollados se sitúan en el oeste del país. El suelo pardo rojizo se extiende desde la frontera con Mali hasta con la de Chad y los suelos ferruginosos que se encuentran en la parte Sur del país donde las lluvias son abundantes (Figura17).

Figura 17: Tipos de suelo en Níger.

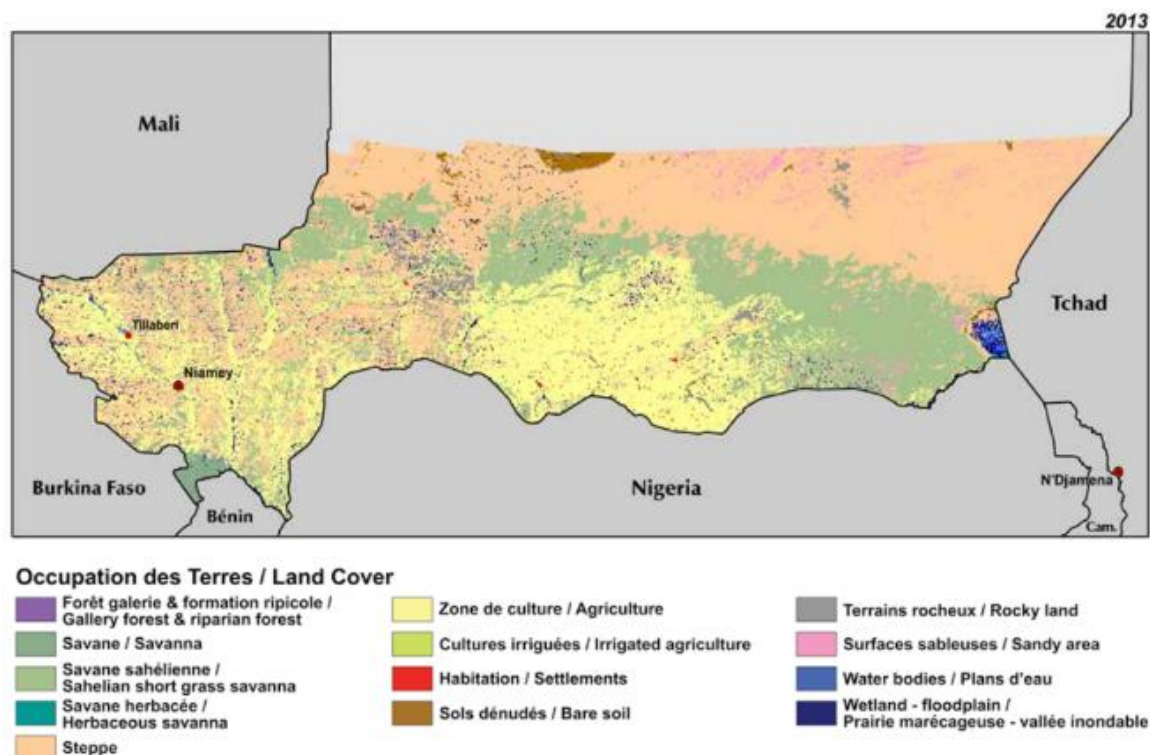


Fuente: Global Soil Partnership (2013).

Los suelos (Figura 20) son esencialmente del tipo ferralítico tropical, arenoso y débilmente estructurado (D'Herbès y Valentin, 1997). Los fondos de los valles tienen suelos ferruginosos arenosos de lixiviación débil. Todos son ricos en sesquióxidos ( $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$ ), pobres en materia orgánica (0.5-3%), y tienen poca fertilidad (bajo contenido de nitrógeno y contenido de fósforo). Su frágil estructura los hace altamente propensos a la formación de capas en la superficie inducida por la lluvia y al agua y a la erosión del viento. Estos procesos, generalmente favorecidos por el cultivo de la tierra y ciclos de barbecho (Valentin y Bresson, 1992; Valentin *et al.*, 2004), transforman los suelos permeables en superficies productoras de escorrentía alta. La topografía-paisaje de la zona se describe en D'Herbe y Valentin (1997) y Cappelaere *et al.* (2001). Básicamente consiste en una meseta (plateaux) de laterita, con laderas de pendiente suave, predominantemente arenosa, generalmente compuesta por dos elementos: una capa endurecida de pendiente media y una incisa red de barrancos. En el fondo del valle arenoso, un gran lecho de río fósil aloja una cadena de estanques aislados durante la temporada de lluvias.

Las estepas (Figura 18) siguen siendo el uso dominante del suelo y su superficie permanece más o menos estable a lo largo de los años. Sin embargo, otras zonas de vegetación natural, más productivas que las estepas, han disminuido considerablemente. Por ejemplo, en las sábanas del Sahel, se ha perdido mucho la cobertura de árboles después de las sequías y el corte de árboles para abastecer leña según CILSS, 2016.

Figura 18: El uso de los suelos de 2013.



Fuente: CILSS (2016).

En suelos arenosos, la regeneración de la vegetación muestra una reducción de la erosión eólica y la disponibilidad de basura para fertilizar los suelos. El desarrollo de los Sistemas Agroforestales ha contribuido a aumentar la materia orgánica en los campos de los agricultores, especialmente donde domina *Faidherbia albida* (Larwanou *et al.*, 2006). Se percibió un cambio positivo en la estructura del suelo y la fertilidad a través de la caída y descomposición de la hojarasca, y captura de pequeños materiales orgánicos traídos por el viento, especialmente donde se desarrollan prácticas agroforestales. En áreas donde han intervenido proyectos de gestión de recursos naturales, del 40% al 100% de los agricultores entrevistados afirmaron que hay una

mejora en términos de fertilidad del suelo y producción agrícola. En 2005, al menos el 80% (Adam et al., 2006) de los agricultores entrevistados usaron estiércol orgánico en sus campos de cereales. La mayoría de los agricultores que invierten en la rehabilitación de sus tierras utilizan abono orgánico. La fertilidad del suelo bajo los árboles y arbustos sombreado fue mayor que el suelo sin sombra (Asare et al. 2008).

Según Descroix (2014) cada vez más se observa una fase de erosión activa tierras degradadas, suelos desnudos y erosionados por la erosión hídrica y eólica (Figura 19). La erosión, el sobrepastoreo y la pérdida de cobertura leñosa como resultado de la sequía de los años setenta y ochenta y la deforestación conducen a la degradación de la tierra y agravan el proceso de desertificación.

Figura19: Terrenos degradados de la zona de estudio.



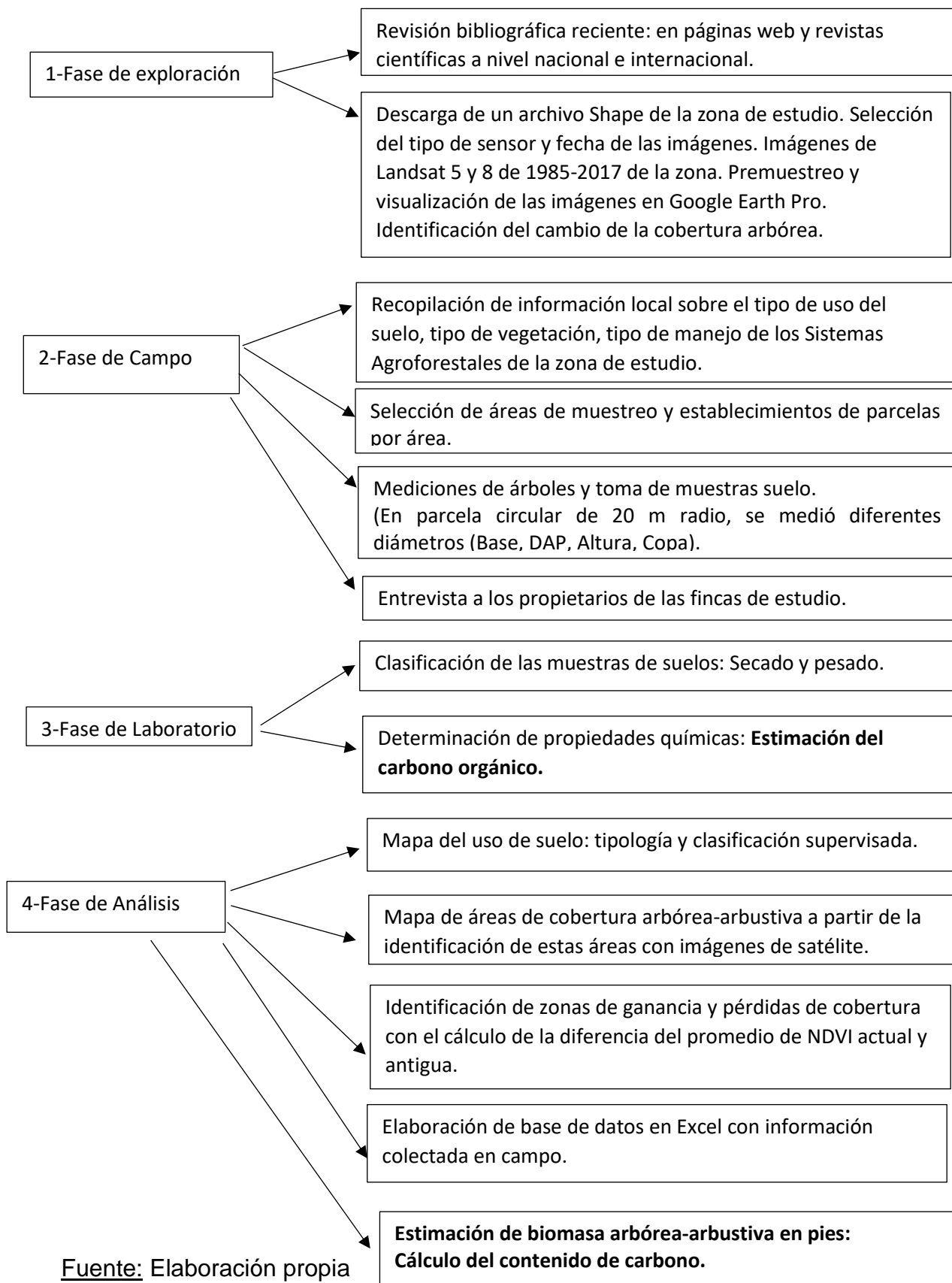
Fuente: Elaboración propia (2016).

### **3.2 Las fases de la investigación**

En esta tesis se pone de relieve la Captura de Carbono en las Sabanas del Sahel como una herramienta de mitigación al cambio climático. Nos enfocamos a una realidad que está pasando en la región y que al mismo tiempo es una paradoja para los científicos. Para alcanzar los objetivos de la investigación se pretende estimar la biomasa en zonas de cambio de cobertura de los Sistemas Agroforestales mediante análisis multitemporal de imágenes landsat en la región de Dosso situada al Suroeste de Níger. La dispersión de las parcelas en cuanto a las distancias entre los pueblos de la zona de estudio y el mal estado de las carreteras hacen que se dificulte enormemente el trabajo a pie de campo. Por eso se estableció una metodología apoyada en una

combinación de tecnologías de teledetección remota: imágenes de alta resolución, el algoritmo de Google Earth Engine, ArcMap, Collect Earth. Todo ellos apoyado con datos de campo. Para llevar a cabo la investigación se plantea las siguientes herramientas metodológicas utilizadas durante el trabajo (Figura 20).

**Figura 20:** Herramientas metodológicas usadas durante las distintas fases de la investigación.



### 3.3 Fase preliminar: diseño del trabajo de campo.

En esta etapa preliminar del trabajo se ha utilizado Collect Earth que es una herramienta que permite la recopilación de datos a través de Google Earth Pro junto con Bing Maps, Here Maps y Google Earth Engine, los usuarios pueden analizar imágenes satelitales de muy alta resolución para una amplia variedad de propósitos (Figura 21).

Figura 21: Collect Earth con varios tipos de software libre.



Fuente: Openforis, FAO.

Para llevar a cabo este ensayo previo primero se hizo una colección de imágenes de alta resolución de la zona de estudio de los sensores Landsat 4, 5 y 8 que fueron descargadas y corregidas desde la base de datos de imágenes gratuitas del USGS

(United States Geological Survey). Se utilizaron las imágenes Landsat de path/row (192/51) y path/row (193/51) como información inicial. Las imágenes fueron seleccionadas de diferentes fechas y sensores que se obtuvieron del catálogo de datos de Google Earth Engine basado en la disponibilidad y seleccionando aquellas que no hay cobertura de nube. Teniendo en cuenta estos criterios, las imágenes provenientes de los tres sensores de la serie Landsat TM para los años antiguos y OLI para los años recientes cuyas características se resumen en la tabla 3

**Tabla 3:** Las imágenes Landsat path/row 192/51 y path/row 193/51 utilizados.

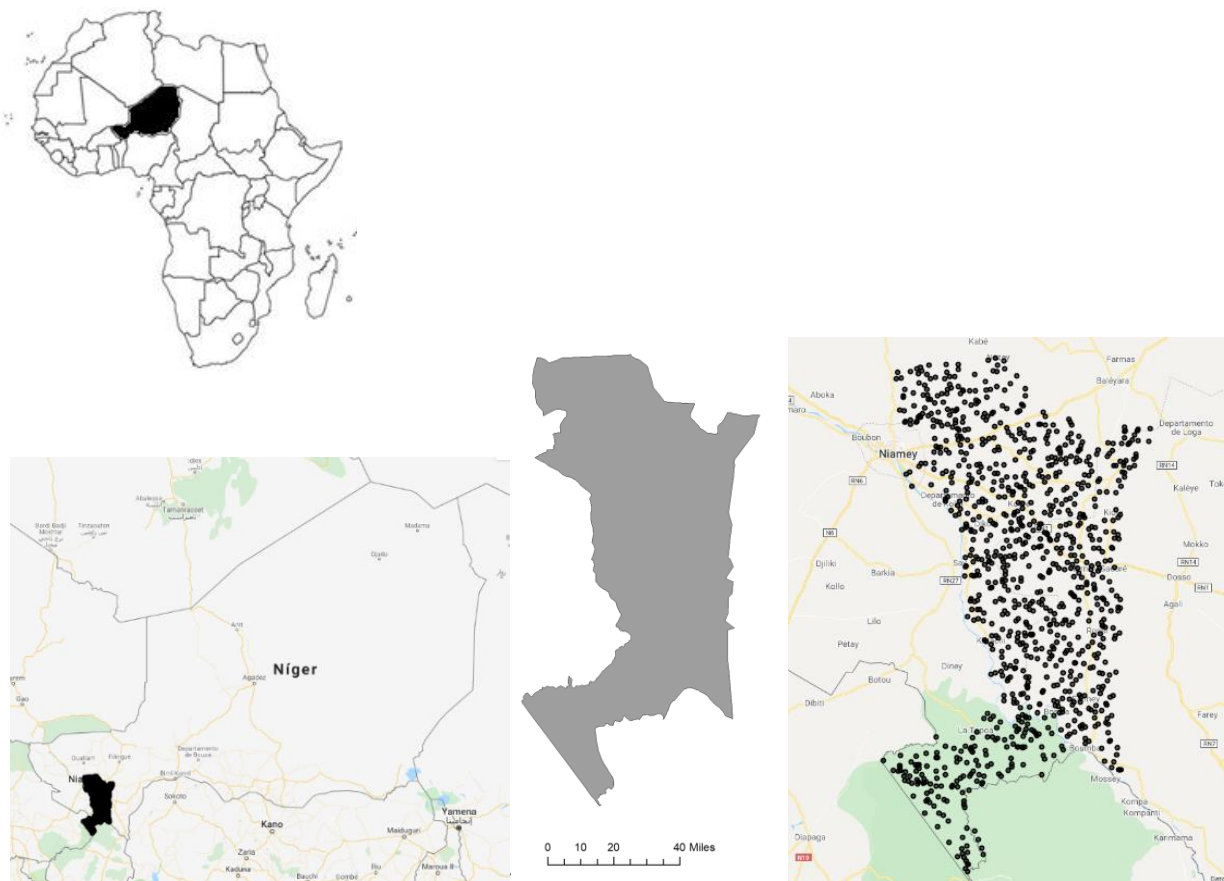
	<b>Año</b>	<b>Path/row</b>	<b>Fechas</b>		<b>Año</b>	<b>Path/row</b>	<b>Fechas</b>
<b>Landsat 8 OLI</b>	2016	192/51	20 de marzo	<b>Landsat 4-5 TM</b>	1985	192/51	15 de marzo
	2016	193/51	27 de marzo		1985	193/51	7 de Abril
	2015	192/51	3 de Abril		1986	192/51	2 de marzo
	2015	193/51	9 de marzo		1986	193/51	5 de febrero
	2014	192/51	15 de marzo		1987	192/51	5 de marzo
	2014	193/51	6 de marzo		1987	193/51	23 de enero
				1988	192/51	27 de enero	
				1988	193/51	3 de enero	

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de USGS.

Se realizó un muestreo mediante la herramienta Collect Earth de forma aleatorio diseñado en el área de estudio que consta de 1000 parcelas (Figura 22). Para crear la malla de muestreo de la zona de estudio para Collect Earth, se ha descargado los datos espaciales del nivel administrativo del país en shapefile, disponible en el sitio web de GADM (<http://www.gadm.org/>). Se identificó la extensión espacial de áreas de interés, agregando las coordenadas, datos de elevación digital SRTM, pendiente y aspecto a la

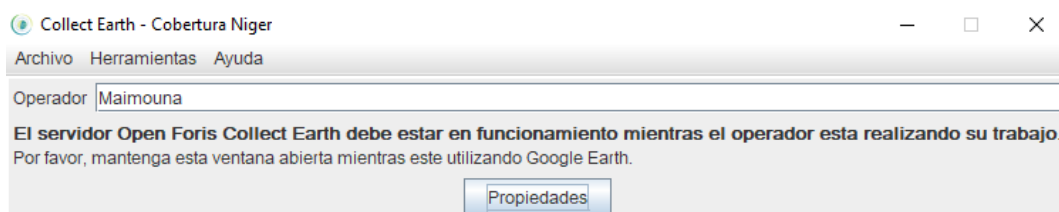
tabla de atributos de la malla. Al final se obtiene de la malla un fichero de formato CSV compatible con Collect Earth visualizado en Google Earth Pro al mismo tiempo (Figura 23).

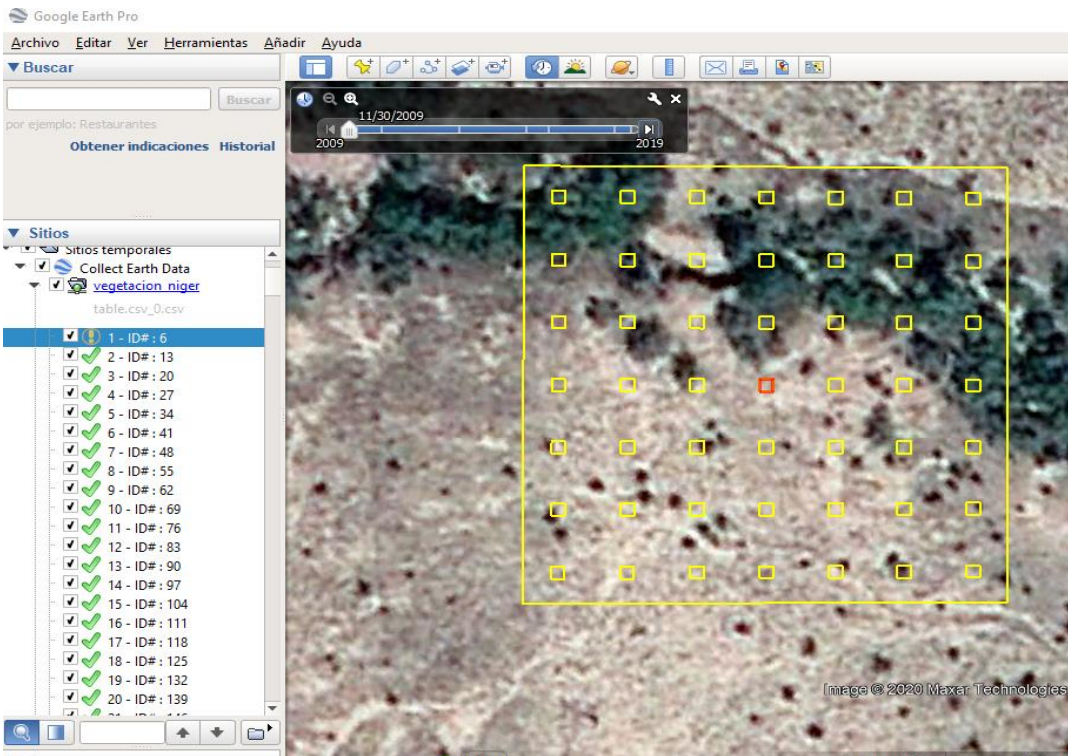
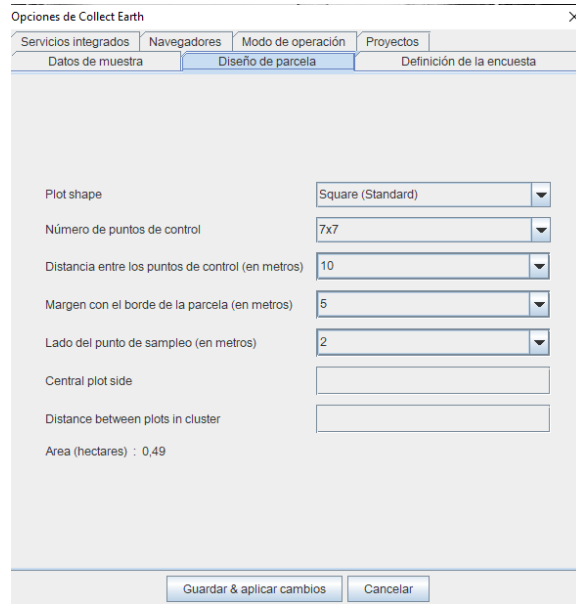
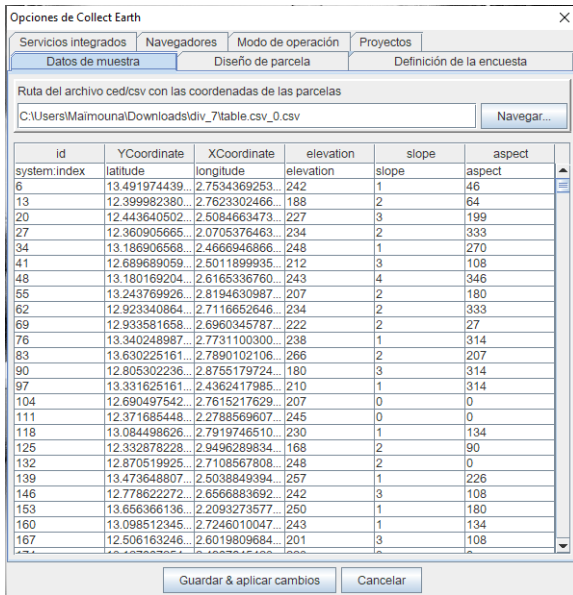
**Figura 22:** Las parcelas de la zona de estudio.



**Fuente:** Elaboracion propia

**Figura 23:** Diseñar de las parcelas

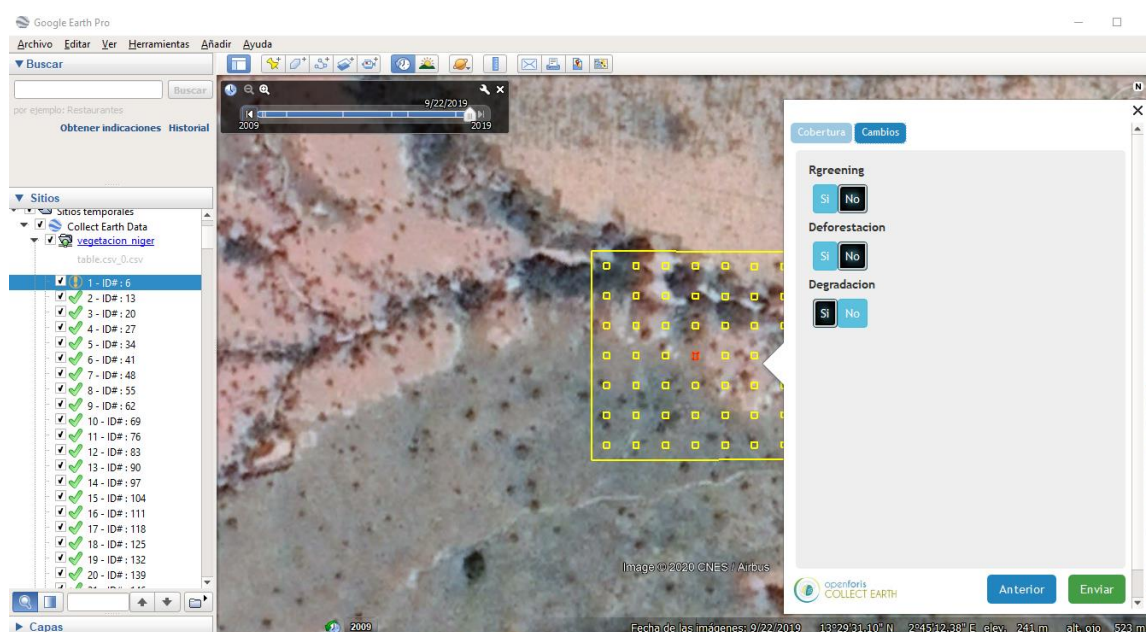
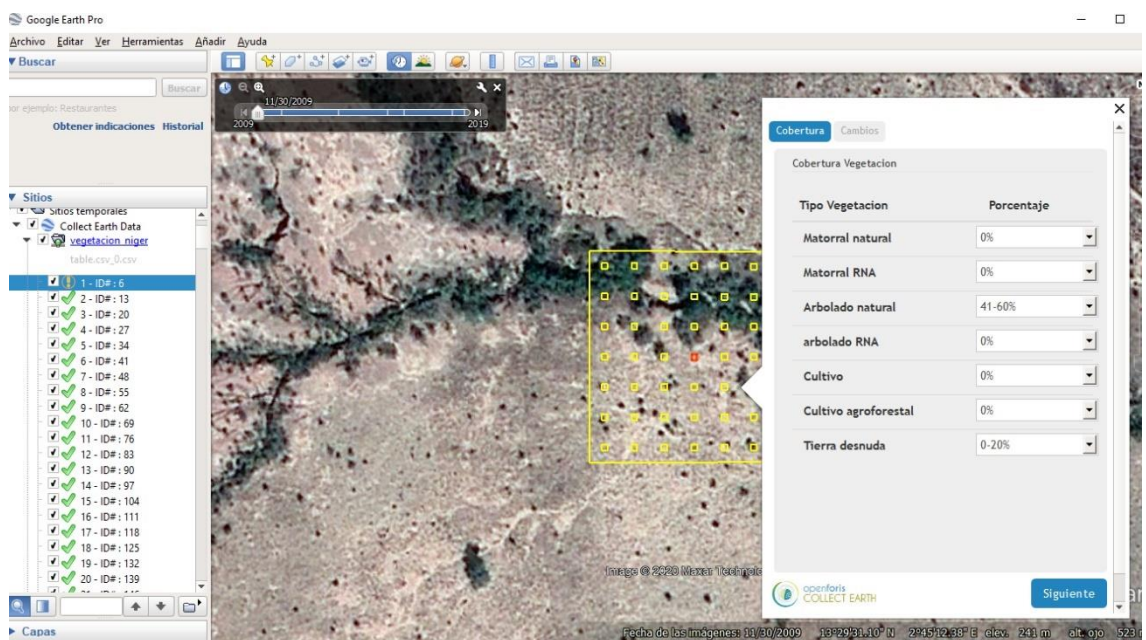




Fuente: Elaboración propia.

En cada parcela se asocia una encuesta de un análisis biofísico (tipo de la cobertura de la vegetación y el porcentaje de la cubierta), los impactos sobre la parcela (deforestación, desertificación, reverdecimiento), información del satélite (fecha de adquisición y tipo) (Figura 24).

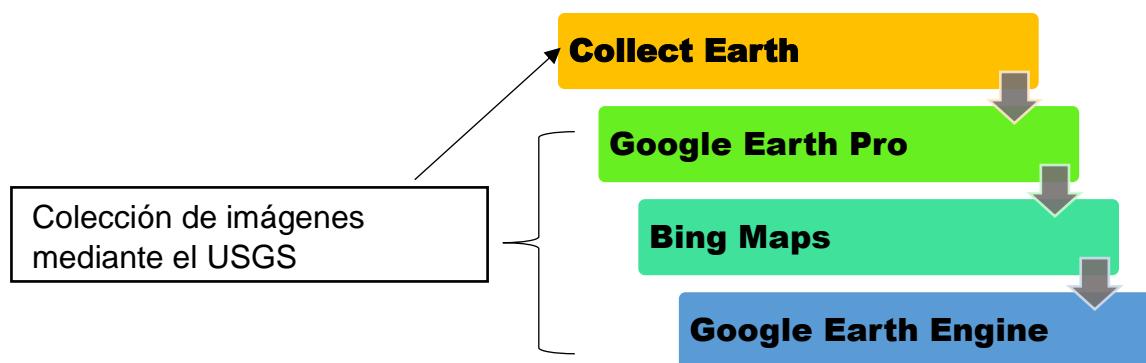
Figura 24: diseño de encuesta asociada a una parcela.



Fuente: Elaboración propia.

Con la interconexión de las plataformas (Figura 25) se asocia Google Earth Pro y Collect Earth para realizar una interpretación visual a cada parcela para obtener información del uso del suelo y cambio de este de la cobertura arbórea-arbustiva. Esta interpretación visual de las parcelas del software Collect Earth de Openforis asociada con las plataformas Google Earth Pro, el Editor de código Earth Engine, ArcMap y la fotointerpretación visual de las imágenes descargados de alta resolución, todo este paquete de información previa nos permitió de validar las áreas de greening potencial una vez que se concretizó la recogida de los datos durante la fase de campo.

Figura 25: las plataformas para la visualización de las imágenes descargadas.



Fuente: Elaboración propia.

Luego, basando en el análisis de series temporales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de imágenes antiguas (Old Mean Reflectance Image: OMRI) y recientes (Recent Mean Reflectance Image: RMRI) procedentes de los tres Landsat 4, 5 y 8. Las series temporales de imágenes del NDVI con alta resolución temporal constituyen una excelente herramienta para analizar los cambios de tendencia de la vegetación, la estacionalidad, la fenología del ecosistema y la estabilidad de este; en definitiva, permiten conocer la evolución de la vegetación de una zona extensa indican estos autores: Anyamba *et al.*, 2014; Anyamba y Tucker, 2005; Fensholt *et al.*, 2009; Herrmann *et al.*, 2005; Olsson, 2005. Los sensores que proporcionan datos del NDVI a escala global son el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) desde 1981; el Système Pour l'Observation de la Terre VEGETATION (SPOT-VGT) desde 1998 y el Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), desde el 2000 y se encuentran en los satélites NOAA y TERRA-AQUA. Estos instrumentos ofrecen datos con diferente resolución espacial y temporal debido principalmente al diseño de la órbita.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es uno de los indicadores más utilizados, es una simple relación entre las bandas del espectro electromagnético rojo y al infrarrojo cercano (Tucker, 1979). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse *et al.*, 1974). Este índice espectral está fuertemente relacionado con la fracción de la radiación fotosintética activa interceptada por la vegetación y se utiliza habitualmente en la monitorización de los cambios de los ecosistemas (Anyamba *et al.*, 2014; Eastman *et al.*,

2013), en la detección de tendencias a largo plazo del crecimiento de la vegetación y en fenología (de Jong y de Bruin, 2012; Heumann *et al.*, 2007) cita en la tesis de Carolina Puig Polo (2015). Este índice se basa en el propio comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta. La clorofila presente en los organismos vegetales absorbe la luz visible de 0.4 a 0.7 micrómetros en la fotosíntesis. En cambio, las células vegetales reflejan la luz infrarroja cercana de 0.7 a 1.1 micrómetros. Si existe mucha más radiación reflejada en la porción de infrarrojo cercano que en la luz visible se puede establecer que la vegetación analizada es más densa propia de un bosque, si por el contrario si la diferencia entre el infrarrojo cercano y la luz visible la vegetación es escasa entonces la vegetación analizada es menos densa o vigorosa, propia de ecosistemas como pastizales o desiertos (Agencia Espacial Europea, 2014). En este índice se analiza el componente Rojo de la Luz Visible 0.6 a 0.7 micrómetros por lo que se utiliza esta banda en los análisis (Tovar, 2012). Estos valores se pueden relacionar con el vigor de la vegetación presente en el área de estudio. Valores negativos entre -1 y 0 corresponden a cuerpos de agua, roca expuesta y, en general, a territorio desprovisto de vegetación. Valores comprendidos entre 0.1 a 0.4 corresponden a coberturas de pasto o similares. Valores cercanos a 1 corresponden a zonas boscosas (Román y Colón, 2009), mientras que los valores más altos son indicadores de la actividad fotosintética de las zonas de matorral, bosque templado, selva y de la actividad agrícola (Meneses, 2011).

La respuesta espectral que tiene la vegetación sana muestra un claro contraste entre el espectro del visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR). Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas. La vegetación tiene una reflectividad baja en el visible, aunque con un pico en el color verde, la clorofila absorbe el rojo y el azul reflejando más en el verde. La reflectividad es muy alta en el infrarrojo reflejado o

próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua contenida en la planta absorbe la energía. En el caso de la vegetación enferma en la que disminuye el infrarrojo y aumenta la reflectividad en el rojo y azul.

Con la utilización de este índice es posible identificar espacialmente vegetación en sus diferentes estados de conservación y su variación temporal. Hay que tener en cuenta al momento de analizar información que estas variaciones responden a las condiciones climáticas y a la naturaleza de las coberturas vegetales lo que puede presentar oscilaciones y ciclos naturales y demás cambios (Merg *et al.*, 2011). Este índice de vegetación justifica su aplicación debido a las diferencias en el comportamiento espectral entre la vegetación verde sana, la vegetación muerta, y los suelos secos y desnudos permitiendo de este modo, activar el proceso de detección. La vegetación sana tiene una reflectividad baja en el visible, aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila. La reflectividad de la vegetación es muy alta en el infrarrojo próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En cuanto a la vegetación enferma se presenta una disminución de la reflectividad en las bandas infrarrojas y un incremento en el rojo y azul. Se observa también que la reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. Cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta.

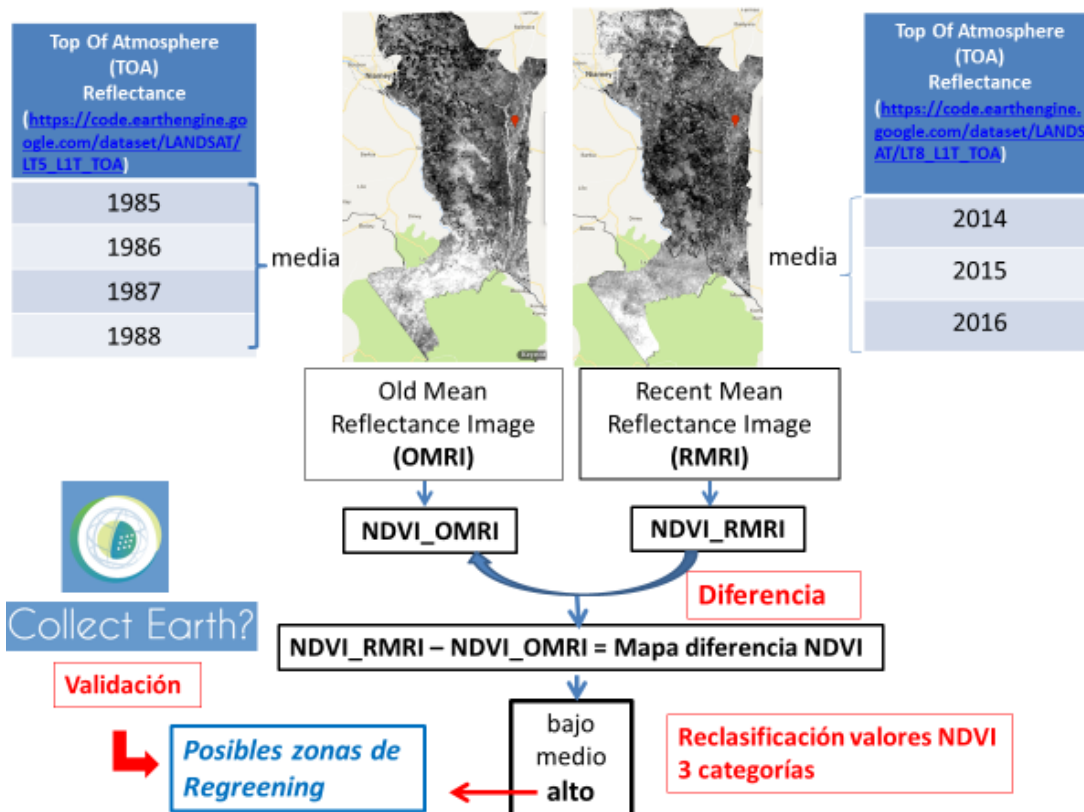
Para la estimación de la biomasa arbórea-arbustiva, muchos estudios han demostrado que los índices de vegetación y su relación simple con datos de satélite ofrecen estimaciones útiles acerca del contenido de carbono en la biomasa (Foody *et al.*, 2003). Los índices de vegetación son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen (Esperanza y Zerda, 2002). Son medidas cuantitativas basadas en los valores digitales que tienden a medir la biomasa vegetal. Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Permittiéndonos estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan. La respuesta a la

reflectancia de la luz roja e infrarroja de la vegetación verde es que, a mayor cantidad de clorofila, mayor absorción de la luz incidente roja; a mayor volumen foliar, mayor reflectancia de la luz infrarroja cercana. Considerando que pueden existir otras coberturas con alta reflectancia en el infrarrojo, u otras con alta absorción en el rojo, el empleo de solo una banda puede conducir a errores. Sin embargo, solo la vegetación viva produce invariablemente ambas respuestas, de modo que, si se calcula el cociente de la reflectancia infrarroja por la roja, o su diferencia, como la primera siempre aumenta conforme la segunda disminuye, el cociente (o diferencia) será mayor cuanto más vegetación haya, por el efecto aditivo que una mayor abundancia de vegetación produce (Towers, 2002). Hay dos métodos para medir la biomasa: destructivo (directa) y no destructivo (indirecta). La directa se realiza a través del corte, secado y pesado de material vegetal (Fernández, 2004). Tiene una claridad a nivel local, a pesar de que puede acumular ciertos errores (Scarabotti et al., 2002), pero representa un gran costo en términos de tiempo y recursos y presenta además la desventaja de tener limitaciones en la extrapolación de los resultados a grandes áreas. En el caso de la indirecta provoca poco o ningún daño en la vegetación, y es por lo que han cobrado importancia técnica. Dentro de dichos métodos se cuentan estimaciones visuales, medida de altura, volúmenes de los árboles, fotografías, uso de imágenes satelitales (Medina et al., 2009). Los métodos no destructivos, aunque son menos precisos que los destructivos tienen la ventaja de requerir menos tiempo y esfuerzo. Su uso se justifica en áreas muy grandes y cuando no hay suficientes recursos para realizar un muestreo destructivo. Estos dos métodos citados arriba están apoyando por muchos investigadores (Segura y Kanninen, 2002, Snowdon *et al.* 2002, Gibbs *et al.* 2007). El método indirecto por su parte consiste en utilizar las ecuaciones alométricas (Chave *et al.* 2005) o factores de expansión (IPCC 2006, Rüginitz *et al.* 2009) que actualmente existen en la literatura y que fueron generados a partir del método directo, con el fin de realizar los cálculos de biomasa necesarios. Este caso solo es necesario medir las variables más relevantes en campo (diámetro, altura). El método indirecto usa modelos de regresión con variables obtenidas en el campo, se usan modelos de biomasa para cada espécimen donde los valores de diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura se transforma a biomasa con ayuda de estos modelos. Diversos autores han puesto énfasis en la importancia de encontrar buenos estimadores de la biomasa aérea a través de métodos indirectos (t'Mannetje, 2000; Sala y Austin, 2000). Sousa, *et al.* (2013) desarrollaron una metodología para

estimar biomasa de imágenes de alta resolución relacionando los datos satelitales y las variables de diámetro a la altura del pecho, altura y radio de la copa que son datos de inventarios en campo. De las variables tomadas en cuenta, las principales son diámetro normal y altura (Vidal *et al.*, 2004; Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Carrillo *et al.*, 2014).

Se calculó el promedio para obtener dos imágenes de NDVI (Figura 26) que se obtuvieron de las imágenes de OMRI y RMRI, las que nos referimos como NDVI\_OMRI y NDVI\_RMRI respectivamente. El paso posterior consistió en la sustracción de los valores de NDVI de imágenes de fechas recientes (NDVI\_RMRI) y valores de NDVI de imágenes de fechas más antiguas (NDVI\_OMRI). Todas estas operaciones fueron programadas utilizando el Editor de código Earth Engine. El mapa de la diferencia final de NDVI se clasificó en tres niveles: valores bajos, medianos y altos. Estos últimos se supone que corresponden a las áreas donde se ha incrementado la cobertura arbórea-arbustiva a lo largo de los 30 años examinados (1985-2015). Estas áreas se denominan "zonas de greening potencial".

Figura 26: Mapa de diferencias de NDVI.



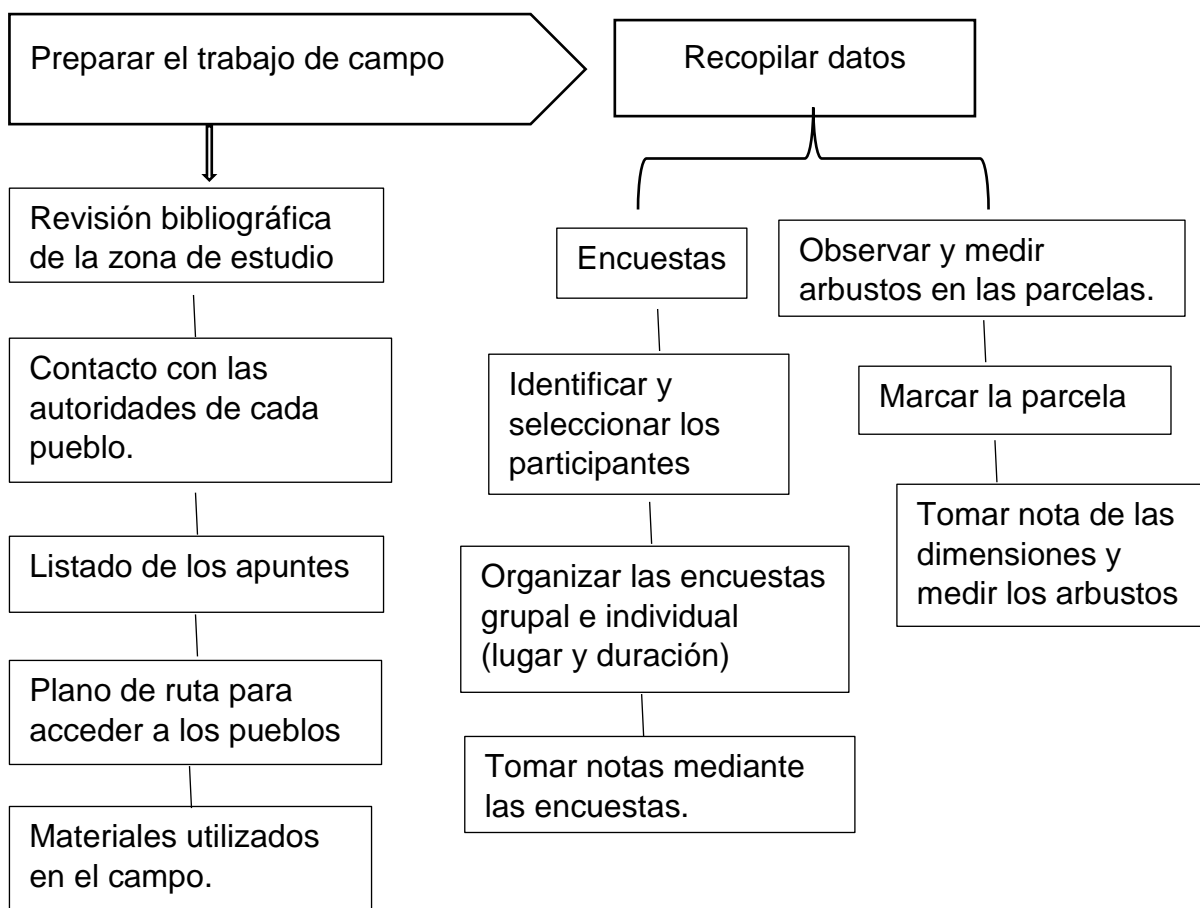
Fuente: Elaboración propia

El mapa de diferencia de imágenes de NDVI consiste a restar entre las imágenes de NDVI de dos fechas, que permite discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios entre esas fechas. Las zonas estables presentarán un valor cercano a cero mientras las que hayan experimentado cambios ofrecerán valores significativamente distintos a cero (positivos o negativos). Los resultados serán guardados en una nueva imagen de cambios que se detallará a continuación.

### 3.4 Fase de campo: Recogida de datos.

Para llevar a cabo la fase de campo, en los procedimientos reflejan dos etapas fundamentales: preparar el trabajo de campo y recopilar datos en los distintos pueblos de la zona de estudio (Figura 27).

Figura 27: procedimientos para la recogida de datos del trabajo de campo.



Fuente: Elaboración propia.

Para la realización del estudio se ha obtenido una autorización previa por parte de las autoridades locales de cada pueblo. Luego se realizó una visita del área de estudio con la finalidad de ubicar las zonas más significativas con presencia de especies leñosas (*Guiera Senegalensis*) de interés para la tesis.

Los Sistemas Agroforestales seleccionados para el estudio de las encuestas son de la zona sudanesa. La vegetación de la región se caracteriza por una sabana arbórea-arbustiva (BAHAN, 2009). Para la recogida de datos, se ha realizado el trabajo de campo entre abril y junio de 2016 que se llevó a cabo durante el periodo seco. Se ha realizado una encuesta coordinada por ayuda de una ONGs local que trabajaba en aquel momento en esta parte y con la presencia de la autora de este trabajo. Aunque la lengua oficial de Níger sea el francés, las poblaciones locales de los pueblos hablan en sus propias lenguas: Zarma, Haoussa y Peul. Por no tratarse de un estudio botánico durante la fase de campo, se ha realizado la identificación de las especies que se encuentran en los campos de cultivos con nombre local en sus propias lenguas maternas (Anexo 3). Además, a posterior se ha hecho una consulta para identificar en el laboratorio de Biología Garba Mounkaila de la Facultad de Ciencias Técnicas de la Universidad Abdou Moumouni de Niamey donde dispone una recolección de muestras de herbario en nombres locales y científicos. Los datos recogidos en los formularios de campo en papel se pasaron a una hoja Excel.

#### **3.4.1) Las encuestas.**

La revisión bibliográfica sobre temas de RNA permitió refinar mejor la hoja de ruta de la investigación y orientar mejor la recogida de datos.

Para la realización de la encuesta y toma de muestras de suelo se contó con la colaboración de la Organización No Gubernamental (ONG) Amenagement des Terroirs et Productions Forestieres (ATPF), responsable del proyecto piloto “Gestión de Tierras y Producciones Forestales” en las regiones de Tillabéri y Dosso al sur oeste de Níger. Este proyecto tiene como objetivo general la implementación de la Regeneración Natural Asistida (RNA) en veinticuatro localidades de la zona de intervención formada por cinco municipios (Kouré, Harikanassou, Dantchandou, Fakara y N’Gonga).

En mayo 2016 en Niamey, se mantuvo una entrevista con el Sr. Lawali Malam Karami, Coordinador Nacional de la ONG ATP para recabar su colaboración en la realización de las encuestas para evaluar la contribución antropogénica al

reverdecimiento en la zona de estudio de la tesis. La ONG facilitó los contactos de 90 agricultores de 9 pueblos de la zona de estudio que estaban implicados en este proyecto piloto nacional y aplicaban técnicas RNA en sus campos de cultivos.

La encuesta a los participantes se realizó a través de la interacción mutua y mediante la aplicación del método activo en la investigación participativa (FAO, 1995). La FAO lo concibe como un método participativo para el diagnóstico rápido de las condiciones físicas y socioeconómicas a nivel del terreno y para el diseño de un plan de desarrollo integral. Se realizó una selección de las poblaciones sin importar la edad con el objetivo de hacer una encuesta en grupo focal (Flick, 2007) y encuesta individual en cada pueblo. Para la selección de los participantes de las encuestas se utilizó el nivel de instrucción de los agricultores. Las personas seleccionadas para las encuestas tenían conocimiento tanto de la región, como de las técnicas de RNA; con este criterio, en cada uno de los 9 pueblos se seleccionaron 10 agricultores, obteniéndose un total de 90 agricultores. El 56% de los participantes eran los jefes de la unidad familiar (varones) pero también se realizaron encuestas a mujeres jefas de la casa, por ser viudas o porque el hombre estuviera ausente en busca de trabajo en otra región del país. Los participantes estaban constituidos por jóvenes y adultos (Figuras 28). Las encuestas individuales se realizaron casa por casa; para las de grupo, el jefe del pueblo convocaba una reunión en su casa o en la mezquita. A continuación de la encuesta, se realizaba un inventario de las especies vegetales presentes en las fincas de cada persona seleccionada.

El cuestionario (Anexo 2) consistió en un cuadro de múltiples preguntas abiertas que ha permitido flexibilidad y dinámica de la encuesta (Bowen, 2005). Las preguntas del cuestionario trataban de la regeneración natural asistida y también se preguntaba a los agricultores sobre las especies más preferidas, los usos principales de las especies de árboles y arbustos y las amenazas a estas especies. Para llevar a cabo las encuestas en los distintos pueblos de la zona de estudio se ha utilizado diferentes medios de transporte de campo a campo (Figura 29).

Figura 28: Las personas que han participado en las encuestas grupales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29: Medios de transporte utilizados en los desplazamientos por la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.2) las mediciones y toma de muestra de suelo.

La elección de los pueblos se basó en la densidad de árboles en los campos señalada por estudios anteriores (Dramé y Berti, 2008; Reij y Botoni, 2009). La selección de especies por parte de los agricultores está guiada por su capacidad de regeneración y su utilidad en términos de usos y prestación de servicios (Akpo et al., 2003).

- **mediciones de variables dasométricas de los arbustos**

En este trabajo se ha optado a medir dos fuentes de biomasa (por encima y por debajo del suelo). La biomasa por encima del suelo está compuesta por la vegetación arbolada-arbustiva y la vegetación herbácea. En este caso es muy importante señalar que el componente principal para medir es la vegetación arbolada arbustiva. Ya que la medición fue durante la época seca y que no se encuentra la vegetación herbácea por lo tanto puede dejar de hacer un muestreo.

Se realizó el recorrido de la zona de estudio principalmente en los SAFs a fin de observar y localizar los arbustos de especies de *Guiera Senegalensis* y ubicar las distintas parcelas con el GPS de garmin, con el cual se determinó las coordenadas geográficas de cada parcela.

Para la medición se ha utilizado machetes, estacas de madera (conseguido en el campo), cámara digital, una cinta métrica de 50 m, una balanza, bolsas plásticas y marcadores, lápiz, formularios (Figura 30). En parcela circular de tamaño 20m de radio desde la base hasta el ápice del árbol se hizo la medición de los diferentes diámetros con la ayuda de una cinta métrica y con el clinómetro la altura total del arbusto. Se midió el diámetro copa de las dos direcciones, diámetro de la base, diámetro a 0.50 m, el diámetro a la altura del pecho de los árboles a 1.30 m (DAP), el diámetro del nudo donde empieza a ramificar el arbusto y la altura total del fuste (Figura 31). Posteriormente se tomó muestras de suelo en estas parcelas para su estudio en el laboratorio.

Figura 30: Materiales de trabajo utilizados.



. Fuente: Elaboración propia.

Figura 31: Mediciones de diferentes diámetros.





Fuente: Elaboración propia.

- **Toma de muestra de suelo**

Se realizó entre los meses de mayo y junio de 2016, correspondiendo con el final de período seco. Los suelos de la zona de estudio son generalmente muy arenosos e infértiles, y se clasifican como arenosoles en la mayor parte de la zona de estudio (FAO 2007).

El diseño de la distribución de parcelas para los campos de cultivo atendió a los siguientes tratamientos relacionados con la aplicación de las técnicas RNA. Así se tomaron muestras en: i) zonas donde no se cortan los brotes de matorrales y se cultiva en el espacio disponible (denominado en adelante **matorrales densos**); ii) zonas de cultivo donde se aplican las técnicas RNA, es decir se poda una parte de los brotes (denominado en adelante **RNA**) y iii) zonas de cultivo donde no se aplican las técnicas RNA, es decir se cortan todos los brotes (denominado en adelante **no RNA**).

La recogida de las muestras se realizó (Figura 32) en tres puntos diferentes de la parcela (bajo y fuera del arbusto, y al borde de la parcela). En cada punto se limpió la superficie del suelo descartando piedras, hojas. Para ello se tomaron 3 submuestras de cada sitio a una profundidad de 5 cm (Saha *et al.*, 2009); que posteriormente se mezclaron y homogenizaron a fin de obtener una muestra representativa que se llevó al laboratorio.

Figura 32: toma de muestras de suelo en distintos pueblos de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

### **3.5 Procedimiento para calcular el carbono capturado en biomasa de la especie de “*Guiera senegalensis*”.**

Para estimar la biomasa arbórea-arbustiva aérea y subterránea en los SAF del Sahel, algunos autores han utilizado ecuaciones alométricas en Malí y Senegal (Woomer et al., 2004; Takimoto et al., 2008). Estas ecuaciones fueron recomendadas por la CMNUCC (2006) para evaluar la biomasa leñosa en varias áreas a pesar de los contrastes de lluvia. Es el caso de los estudios realizados por Takimoto et al. (2008) que siguieron las recomendaciones de la CMNUCC (2006) de utilizar las ecuaciones generales de Brown (1997) para los SAFs.

En el contexto de este estudio, se utilizó el método no destructivo (Schlegel (2001); Vallejo *et al.* (2005)) para estimar la cantidad de carbono contenido en la biomasa aérea y debajo del suelo de la especie leñosa *Guiera senegalensis*. No se ha evaluado el

contenido de carbono de la biomasa muerta y la hojarasca. Se ha creado una base de datos en Excel de las mediciones hechas durante la fase de campo. Para llevar a cabo los cálculos del Área Basal (AB) en m<sup>2</sup>/ha, el volumen en m<sup>3</sup>/ha, la biomasa y el carbono almacenado ton/ha de la zona de estudio, se utilizó la fórmula de Smalian para calcular el volumen y en el caso de la biomasa y el carbono capturado se utilizaron las fórmulas recomendadas en las Directrices del IPCC (2006), y la fracción de carbono 0,5 que propone el IPCC (2003) en estudios no destructivos.

### **Estimación del área basal**

El área basal se calculó aplicando la siguiente fórmula de Cancino (2006):

$$AB = \frac{\pi}{4} * (DAP^2)$$

Dónde:

AB= Área basal (m<sup>2</sup>)

$\pi/4$ = Constante

DAP= diámetro a la altura del pecho (m).

### **Estimación del volumen de árboles**

Se utilizó la fórmula de Smalian para calcular el volumen de los arbustos de la especie *Guiera Senegalensis* por la siguiente fórmula:

$$V = \pi/4 * [(A+a)/2]*L$$

Donde:

V = Volumen de la sección del fuste (m<sup>3</sup>);

A = Área transversal de la sección del diámetro de la base (m<sup>2</sup>)

a = Área transversal del diámetro del nudo (m<sup>2</sup>)

L = la altura total del fuste (m);

### **Estimación de la biomasa**

Según las Directrices del IPCC (2006) para estimar la biomasa de la cobertura arbórea-arbustiva el valor recomendado para los factores de expansión de biomasa aérea y subterránea es de 1,07 para África del Oeste (FRA 2010). Para la densidad de madera se propone un valor de 0,5. La siguiente formula es empleada para obtener el valor de la biomasa del área de estudio:

$$B= V*D*FEBa*FEBs$$

Dónde:

B= Biomasa (t)

V= Volumen de los árboles

D = Densidad de la madera, t/m<sup>3</sup> (0,5).

FEBa= factor de expansión de la biomasa aérea (ramas, hojas) (1,07)

FEBS= factor de expansión de la biomasa subterránea (raíces) (1,07)

### **Estimación del carbono almacenado**

Siguiendo las Directrices de IPCC (2006) y mediante la fórmula de Arévalo (2015) se calculó el depósito de carbono a partir de los datos obtenidos de biomasa de la cobertura arbórea-arbustiva del área de estudio multiplicando por la fracción de carbono 0.5.

$$C = B * Fc$$

Dónde:

C= carbono en toneladas de carbono

B= biomasa

Fc= fracción de carbono (0,5)

### **Estimación del CO<sub>2</sub> almacenado**

Una vez obtenido el carbono almacenado, se estimó la cantidad de dióxido de carbono capturado en toneladas multiplicando por la fracción 3,67 (Forest Trend y The Katoomba Group, 2010).

$$CO_2 = C * 3,67$$

Dónde:

CO<sub>2</sub>= cantidad de dióxido de carbono capturado en toneladas de CO<sub>2</sub> 3,67=fracción que se utiliza para la conversión del carbono en toneladas de CO<sub>2</sub>, que es un valor constante.

### **3.6 Fase de laboratorio: Métodos Analíticos realizados en la valoración del “Regreening” a nivel del suelo.**

Una vez en laboratorio, las muestras de suelos se secaron a temperatura ambiente (22–25°C) y posteriormente fueron trituradas y tamizadas con un tamiz de malla de 10 mm.

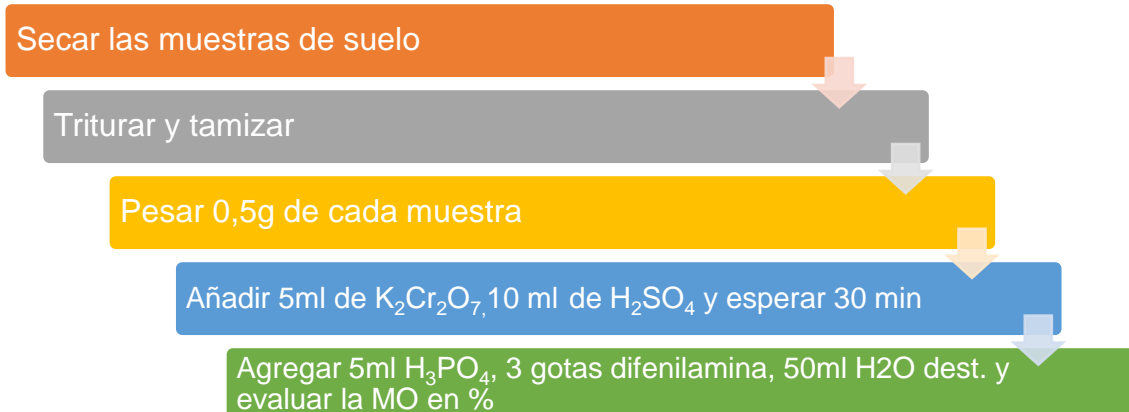
Se llevaron a cabo las siguientes determinaciones en el laboratorio:

- i) **pH.** Se midió el pH sobrenadante de una suspensión en cloruro de potasio (KCl) (Blak, 1965).
- ii) **Materia orgánica.** Para la determinación del contenido de materia orgánica se utilizó el método de Walkley y Black (USDA, 1982). Las muestras se machacaron para eliminar agregados grandes y se pesaron en una balanza de precisión 0,001g. El método de Walkley y Black se basa en la oxidación del carbono orgánico (CO) del suelo con dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) en un medio de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).
- iii) **Caliza activa (g  $CO_3Ca/100$  g suelo).** Se determinó mediante el método DROUINEAU, cuyo fundamento es solubilizar el calcio activo del carbonato cálcico con oxalato amónico.
- iv) **Nitrógeno total.** Para la determinación de la concentración del nitrógeno total se empleó el método de Kjeldahl (Pansu & Gautheyrou, 2006). En el método de Kjeldahl la reacción ocurre en medio ácido (sulfúrico concentrado) a temperaturas elevadas ( $400^{\circ}C$ ), donde el nitrógeno orgánico es transformado a ion amonio, el cual es cuantificado a través de una destilación alcalina y su posterior titulación. El método Kjeldahl se utiliza para la determinación del contenido de nitrógeno en muestras orgánicas e inorgánicas.
- v) **Fósforo asimilable.** Se utilizó el método Bray II (Pansu & Gautheyrou, 2006) para determinar la concentración del fósforo asimilable. El método Bray II es un método desarrollado para extraer fosfatos tanto de suelos de pH ácido que contienen fosfatos asociados a Fe y Al, como de suelos de pH alcalino cuyos fosfatos están ampliamente asociados a Ca.
- vi) **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).** En el caso de la Capacidad de Intercambio Catiónico [Calcium ( $Ca^{2+}$ ), Magnesium ( $Mg^{2+}$ ), Potassium ( $K^+$ ) y Sodium ( $Na^+$ )] se usó la técnica de percolación de tubos. Se midió Na y K por Fotómetro de llama, Ca y Mg por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).
- vii) **Carbono orgánico del suelo.** Se determinó a partir del análisis de la materia orgánica haciendo uso de la metodología de Walkey y Black (Álvarez y Marín, 2011). El método consiste en la oxidación del carbono orgánico dado por la reacción de una cantidad conocida de dicromato de Potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) que actúa como oxidante en medio de Ácido Sulfúrico concentrado. El resultado de

la mezcla sulfo-crómica proporciona una temperatura suficiente para alcanzar la oxidación del carbono orgánico presente en la muestra de suelo (Carreira, 2011). En la reacción se considera que el dicromato reducido es equivalente al carbono orgánico existente en la muestra. Para expresar el resultado en porcentaje de materia orgánica se debe multiplicar el resultado obtenido por el factor de corrección de Van Bemmelen (1,724) debido a la combustión incompleta del carbono (Eyherabide et al., 2014). Para obtener la materia orgánica mediante este método se ha utilizado los siguientes pasos que se describen a continuación. La estimación del carbono orgánico se determinó a partir de la siguiente ecuación:  $\% \text{CO} = \% \text{MO} / 1.724$ .

Donde: CO = Carbono orgánico (%), MO = Materia orgánica (%), 1.724 es el factor de Van Bemmelen.

**Figura 33:** procedimientos para la determinación del carbono orgánico



Fuente: Elaboración propia.

Todos los análisis de suelo se realizaron en el Laboratorio de Química Ambiental de la Escuela de Ingenieros de Montes, Forestal y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Madrid., excepto la determinación del CIC que se llevó a cabo en el

laboratorio del Departamento de Edafología de la Facultad de Farmacia (Universidad Complutense de Madrid).

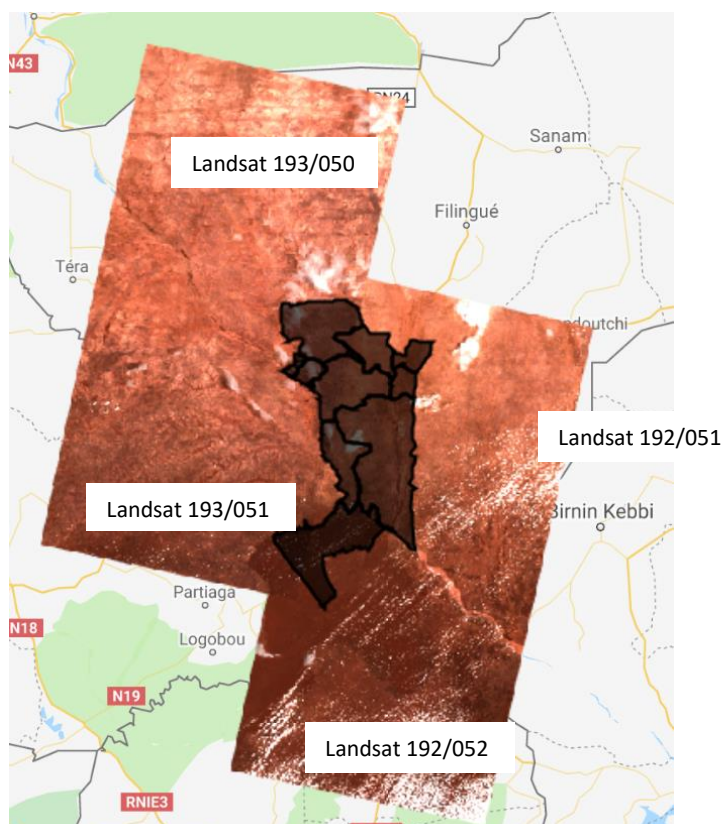
El análisis estadístico de las determinaciones de laboratorio: pH, materia orgánica, caliza activa, nitrógeno total, fósforo asimilable y CIC, consistió en un Análisis de la Varianza (ANOVA) considerando como factor el tipo de tratamiento: a) matorrales densos, b) RNA y c) no RNA, con análisis pos-hoc Tukey HSD (Honestly-Significant-Difference). El objetivo era evaluar si las determinaciones de las muestras de suelo presentaban diferencias significativas según el tipo de tratamiento. Previamente se verificó la normalidad de los datos (test Shapiro-Wilks).

### **3.7 Fase de análisis:**

#### **3.7.1) Cálculo de la evolución del NDVI entre los períodos 1985-1995 y 2013-2017.**

Los análisis de las imágenes se han realizado con la herramienta Google Earth Engine (GEE). Esta es una plataforma on-line para el análisis geoespacial a gran escala que aporta gran capacidad de procesamiento y está vinculada a un gran volumen de imágenes de satélite e información geoespacial de libre disposición

**Figura 34:** Composición de las 4 escenas Landsat (192/051, 192/052, 193/050, 193/051) que contienen el área de estudio.



Fuente: elaboración propia

El análisis de la evolución de la cobertura arbórea-arbustiva en la zona de estudio mediante imágenes Landsat se realizó comparando la media del índice de vegetación NDVI entre dos períodos: primer período (1985–1995) y segundo período (2013 – 2017). Las imágenes Landsat se distribuyen en cuadrículas de 185 km de lado, siguiendo un sistema de identificación fila-columna (WRS path/row). Para completar el área de estudio fue necesario utilizar parte de 4 escenas Landsat (Figura 34).

Se emplearon un total de 119 imágenes de Landsat 5 entre 1985 y 1995 y 382 imágenes de Landsat 8 entre 2013 y 2017 (tabla 4). A todas las imágenes se les aplicó una máscara que elimina los píxeles identificados como nubes, nieve y sombra utilizando el algoritmo CFMASK de la plataforma GEE (Zhu *et al.*, 2015).

Para la detección cambios utilizando imágenes de satélite de distintas fechas, es necesario realizar una corrección atmosférica de las imágenes. Este preprocesado reduce los efectos de dispersión y emisión que la presencia de la atmósfera ocasiona en

la radiación electromagnética. El objeto final de estas correcciones es que no se interpreten como cambios, lo que realmente son errores o ruido (Chuvieco,2008). Por todo ello, se seleccionaron imágenes de la colección *Landsat Surface Reflectance* que se distribuyen corregidas atmosféricamente.

**Tabla 4:** Imágenes satelitales empleadas de los sensores Landsat 5 (TM) y Landsat 8 (OLI).

Sensor	Path/row	Fecha	
		Periodo humedo	Periodo seco
<b>Landsat 5 (TM)</b>	192/051	Desde 1988-07-13 Hasta 1990-09-21	Desde 1986-01-13 Hasta 1989-12-07
	192/052	Desde 1988-06-27 Hasta 1990-09-21	Desde 1986-01-13 Hasta 1988-12-20
	193/050	Desde 1988-07-04 Hasta 1990-09-28	Desde 1986-02-05 Hasta 1989-12-14
	193/051	Desde 1988-07-04 Hasta 1990-09-28	Desde 1986-02-05 Hasta 1989-12-14

Sensor	Path/row	Fecha	
		Periodo humedo	Periodo seco
<b>Landsat 8 (OLI)</b>	192/051	Desde 2014-06-03 Hasta 2017-09-15	Desde 2014-11-10 Hasta 2017-12-20
	192/052	Desde 2014-06-03 Hasta 2017-09-15	Desde 2014-11-10 Hasta 2017-12-20
	193/050	Desde 2014-06-10 Hasta 2017-09-22	Desde 2014-11-01 Hasta 2017-12-27
	193/051	Desde 2014-06-10 Hasta 2017-09-06	Desde 2014-11-01 Hasta 2017-12-27

Se programó un algoritmo en GEE para calcular el NDVI de todas las imágenes y obtener la media y desviación típica de los dos períodos antiguo (1985-1995) y reciente (2013- 2017) y cada una de las estaciones seca y húmeda. Estas imágenes se denotaron como mNDVI85\_95s, mNDVI85\_95H, que representan la media de los NDVI de las imágenes del período 1985-1995 de la estación seca y húmeda respectivamente y mNDVI13\_17s, mNDVI13\_17H, que análogamente es la media de los NDVI de las imágenes del período 2013-2017 de la estación seca y húmeda respectivamente.

### **3.7.2) Detección de cambios.**

Para comparar resultados y estudiar la evolución del NDVI se realizó la diferencia normalizada (DN) para la estación seca:

$$DN_{cambios} = \frac{(mNDVI13_{17s} - mNDVI85_{95s})}{(mNDVI13_{17s} + mNDVI85_{95s})}$$

El resultado de la imagen DNcambios es una imagen continua cuyos valores oscilan entre -1 y 1. Los valores elevados de NDVI se asocian con cobertura vegetal extensa; por tanto, píxeles de valores negativos de la imagen DNcambios se interpretan como áreas de pérdida de la cubierta vegetal y píxeles de valores positivos como zonas de ganancia de vegetación arbustiva-arbórea.

Para discriminar los cambios en la cubierta vegetal leñoso, fue necesario segmentar la imagen continua (DNcambios) en una imagen de tres categorías (ganancia, pérdida y zonas estables). Para ello, a partir de los parámetros estadísticos de la media ( $\mu$ ) y la desviación típica ( $\sigma$ ) de la imagen DNcambios, se obtuvo el umbral de cambio:  $\mu \pm n\sigma$ , donde  $n$  es un parámetro empírico establecido por el usuario, y que en este estudio se fijó en  $n = 2$  (Vazquez-Jiménez *et al.*, 2017). Esta segmentación se realizó con el software ArcGIS y así se obtuvo la imagen “Cambios Cobertura Leñosa” (CCL).

### **3.7.3) Validación del algoritmo de cambio**

Para validar y comprobar los resultados del cambio de cobertura detectado, es decir para validar la imagen CCL se hizo una comprobación visual en Google Earth Pro y Collect Earth, utilizando las imágenes de muy alta resolución espacial en distintas fechas disponibles.

La imagen CCL se transformó a formato vectorial y se filtraron los polígonos de cambio con área mayor de 1000 m<sup>2</sup>. Finalmente se seleccionaron un total de 310 polígonos distribuidos por el área de estudio para la comprobación visual de los cambios. En cada uno de estos 310 puntos se comprobó de forma visual con imágenes de alta resolución espacial de distintas fechas si se había verificado una pérdida o ganancia de la cubierta arbóreo-arbustiva.

#### **3.7.4) Tipología del uso de suelo mediante una clasificación supervisada.**

Para ayudar al análisis de los resultados de ganancias y pérdidas de la imagen CCL, se han obtenido una cartografía de usos del suelo del área de estudio. El mapa de usos del suelo se ha realizado mediante clasificación supervisada de una imagen Landsat 8, utilizando la plataforma GEE. Se ha empleado una composición de imágenes Landsat 8 del periodo seco (1-1-2017 al 31-03-2017) y período húmedo (1-07-2017 al 30-09-2017).

Para las fases de entrenamiento y validación se han utilizado 221 puntos (126 entrenamiento y 85 validación) distribuidos aleatoriamente en las distintas categorías establecidas. La identificación de los usos de cada uno de los puntos se ha realizado mediante un análisis visual con las herramientas Google Earth Pro y Collect Earth. El algoritmo de asignación de la clasificación ha sido Random Forest (Breiman, 2001).



## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1) Resultados de la fase preliminar

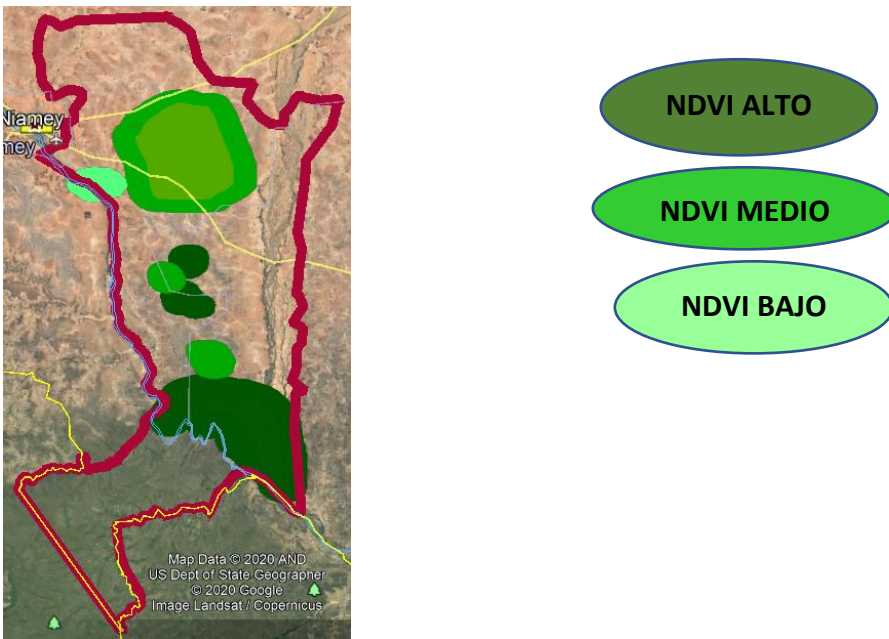
Se observa en los resultados preliminares (Figura 38) la variación de los niveles de cambios de NDVI de la zona de estudio. El análisis e interpretación visual de fotografías junto con Google Earth Pro y Collect Earth permite de clasificar el área de estudio de Norte hacia el Sur. Se detectó el nivel bajo de NDVI en la parte Norte de los pueblos de Aoula kwara, Dinki, el NDVI medio se visualizó en los pueblos de Kouré Nyamadé Talawal, y el nivel alto de NDVI en la parte Sur de los pueblos de Falmey-Boumba.

Estos resultados observados coinciden con muchos trabajos recientes es el caso de los trabajos publicados por Giannini et al. (2003) en los cuales se apuntan el interés de modelos climáticos sobre la paradoja del Sahel de un lado las sequías en las décadas de 1970 y 1980 y del otro se observan una recuperación de la cobertura arborea arbustivas mediante los satélites. Esta recuperación llamó la atención de los investigadores sobre el reverdecimiento de la cobertura de la biomasa arbórea arbustiva del Sahel. Los trabajos sugieren que aunque las precipitaciones varían algunos hipotetizan que el estado de “regreening” no podría haberse alcanzado sin factores humanos adicionales.

Mediante la plataforma Google Earth Engine (Figura 37) se observa valores crecientes de Norte a Sur de NDVI como la interpretación visual con los colores claros que corresponden un aumento de crecimiento de la cobertura arbórea arbustiva y los no claros donde los valores de NDVI decrecen.

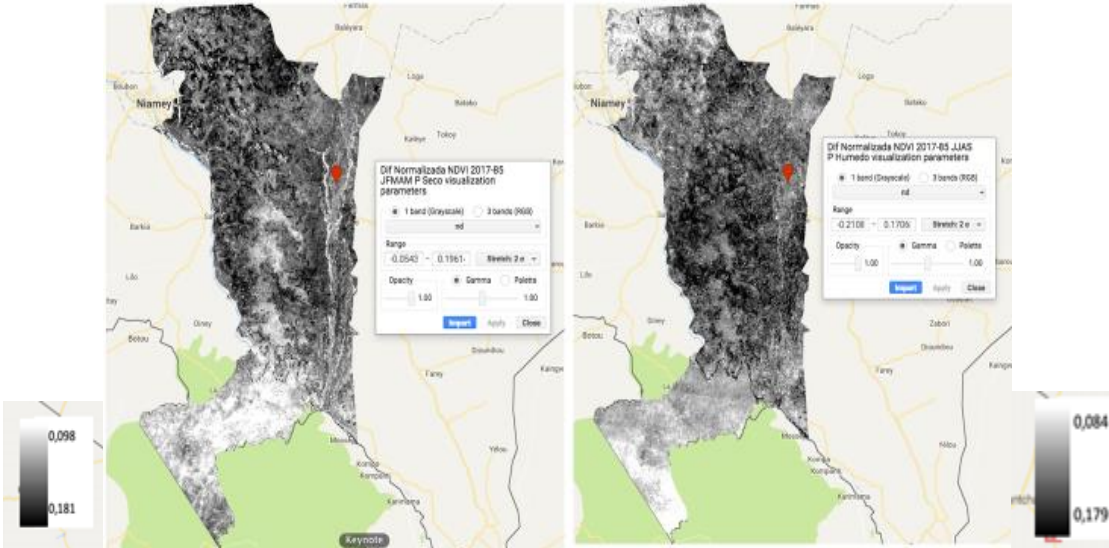
NDVI\_OMRI y NDVI\_RMRI (Figura 39 a) y b)) presentaron valores crecientes de Norte a Sur. Este patrón espacial de los valores de NDVI coincide con la distribución espacial de las precipitaciones. El mapa de diferencias de NDVI fue clasificado en tres niveles: bajo ( $NDVI < 0$ ), mediano ( $0 < NDVI < 0,060$ ) y alta ( $NDVI > 0,060$ ) basado en las pausas naturales del histograma diferencia NDVI (Figura 39.) como primer paso para la estimación de aumento de cobertura arbórea-arbustiva. Partiendo de la imagen de diferencia de NDVI obtenida en el paso anterior se observó los valores del histograma correspondiente a esta imagen que son los puntos de interrupción para las clases bajas, medias y altas. El intervalo de valores altos de la diferencia de NDVI representa 19% del área de estudio.

Figura 35: los niveles de NDVI de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. a) NDVI estimado del promedio de la diferencia de fechas más antiguas (OMRI) y b) NDVI estimado del promedio de la diferencia de fechas recientes (RMRI).

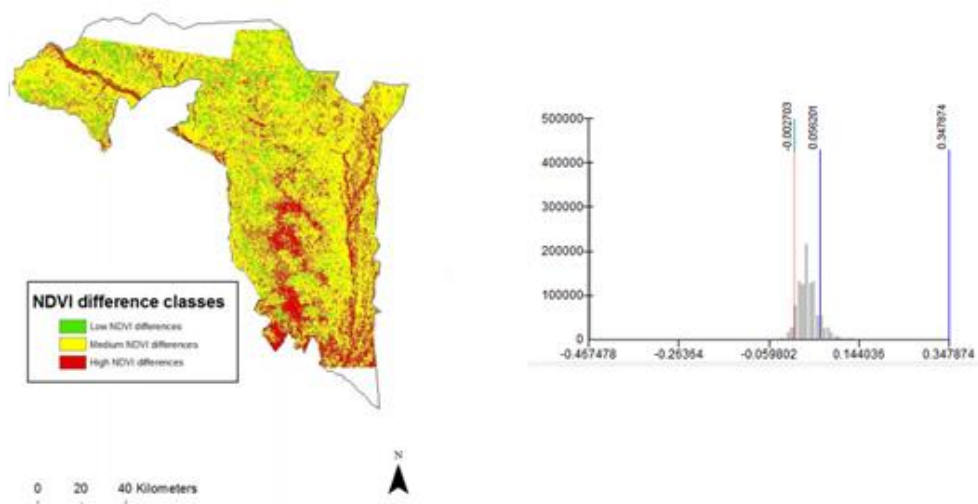


a)

b)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 37: histograma de diferencia NDVI



Fuente: Elaboración propia.

## 4.2) Resultados del análisis de los datos de campo.

### 4.2.1) Las encuestas

Los datos recopilados a través de las encuestas tanto individuales como grupales se enfocaron hacia las características y la importancia socioeconómica y ambiental de los SAF. El uso de las especies leñosas tiene un papel fundamental en la vida de los campesinos de la zona de estudio. En los campos de los productores se conservan los árboles y arbustos porque presentan diferentes usos: domésticos (alimentación, medicinal, energía) y como alimento de ganado (Figura 38).

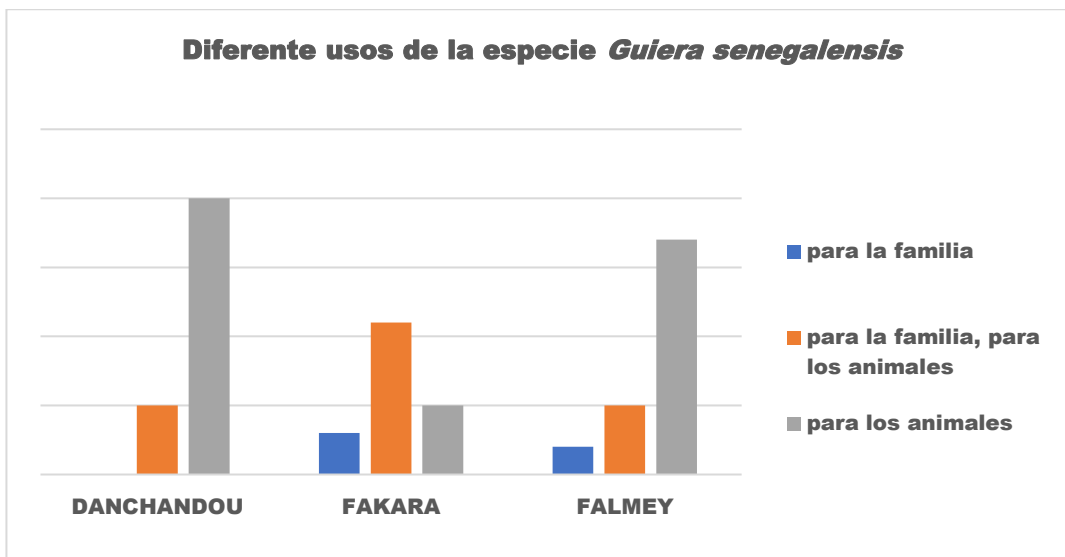
Se observa que predomina el uso ganadero (Figura 39) especialmente en la región de Danchandou donde un 80% de los encuestados afirma que utiliza las especies leñosas como alimento de ganado.

**Figura 38:** Uso de *Guiera senegalensis* como fuente de alimentación para los animales.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 39:** Uso de *Guiera senegalensis* como fuente de alimentos el ganado.



**Fuente:** Elaboración propia

Según las respuestas abiertas de las encuestas se utilizan las hojas y tallos caídos como materia orgánica para fertilizar el suelo, además con fines medicinales y es una fuente de generación de ingresos sustanciales para las comunidades locales por la venta de la leña/madera/frutos/medicamentos. En este sentido, muchos agricultores afirman que el nivel de la fertilidad del suelo es mayor bajo las copas de los árboles que en el suelo desnudo. Los agricultores consideran que *Guiera senegalensis* es el garante de la fertilidad del suelo (Figura 40). Los excrementos que dejan los animales en las fincas bajo la cubierta del árbol durante la estación seca también contribuyen a la mejora de la fertilidad del suelo.

Figura 40: Uso de *Guiera senegalensis* como fertilizante al suelo.



Fuente: Elaboración propia.

Los productores afirman que en el caso de la medicina tradicional los ancianos son los que detentan el mayor conocimiento sobre las plantas, es decir representan el medico cabecera de las familias. Estos conocimientos y experiencias se transmiten de generación en generación tratando de ponerlos por escrito porque durante siglos, nuestros antepasados han utilizado plantas para aliviar el dolor, curar enfermedades y heridas. Los agricultores encuestados indican que aprovechan todas las partes de la planta: las hojas, las raíces y la corteza. Sin embargo, según los estudios de Salhi et al., (2010), Tahri et al., 2012, Diatta et al., (2013) y Mosaddegh et al., (2016) indican un mayor uso de las hojas de las plantas medicinales.

La leña sigue siendo la principal fuente de energía doméstica, especialmente para cocinar alimentos. Por tanto, la disponibilidad de leña es fundamental para las poblaciones. Además, las ramas se utilizan en la fabricación de cercas y estacas en la construcción de residencia, para la construcción de vallas protectores alrededor de las

fincas (Figura 41). Las tres especies leñosas preferidas para este uso son *Guiera senegalensis*, *Combretum micranthum* y *Piliostigma reticulatum*. El interés por la *Guiera senegalensis* es una preferencia real de los campesinos y sorprendente. Sin duda se debe a su gran disponibilidad en la zona de estudio y, en particular, por su proximidad a los hogares.

Figura 41: Uso de *Guiera senegalensis* como fuente de madera.



Fuente: Elaboración propia.

De las respuestas de las encuestas a los propietarios de los campos, se extrae por tanto que los árboles y arbustos constituyen una fuente vital de alimentos para las familias y piensos para los animales. De hecho, muchos autores apuntan la importancia vital de las especies por los múltiples servicios y productos que brinda: son fuentes de alimento (Taita, 2003), medicinas (Zerbo et al, 2011), energía, ingresos y también proporcionan material de construcción (Ganaba et al, 2005).

A pesar de los avances de la farmacología, el uso terapéutico de plantas medicinales está muy presente en algunos países del mundo y especialmente en países en vías de desarrollo, ante la ausencia de un sistema médico moderno (Tabuti et

al.,2003). Las plantas medicinales son un patrimonio precioso para la humanidad y, más particularmente, para la mayoría de las comunidades pobres de los países en desarrollo que dependen de ellas para su atención primaria de salud y su subsistencia (Salhi et al., 2010). La medicina tradicional constituye para África en general y en particular para Níger un patrimonio cultural y económico de importancia indiscutible. En este la OMS (2002), afirma que el 80% de la población usa la medicina tradicional a base de hierbas en la atención primaria de salud. En el Sahel, las personas siempre han tenido un conocimiento etnobotánico muy amplio gracias a la diversidad cultural y ecológica del medio ambiente en el que viven (Yves et al., 2007; Kaboré et al., 2015). En Níger, la farmacopea tradicional es el uso más importante de ciertas especies de plantas (Laouali et al., 2014). Debido al aislamiento de las comunidades rurales, la infraestructura de salud inexistente, el alto costo de los productos farmacéuticos, las plantas medicinales son un activo importante para las poblaciones rurales (Dibong et al., 2011). Por lo tanto, ellos van al dispensario solo cuando la medicina tradicional ha demostrado ser ineficaz según las encuestas.

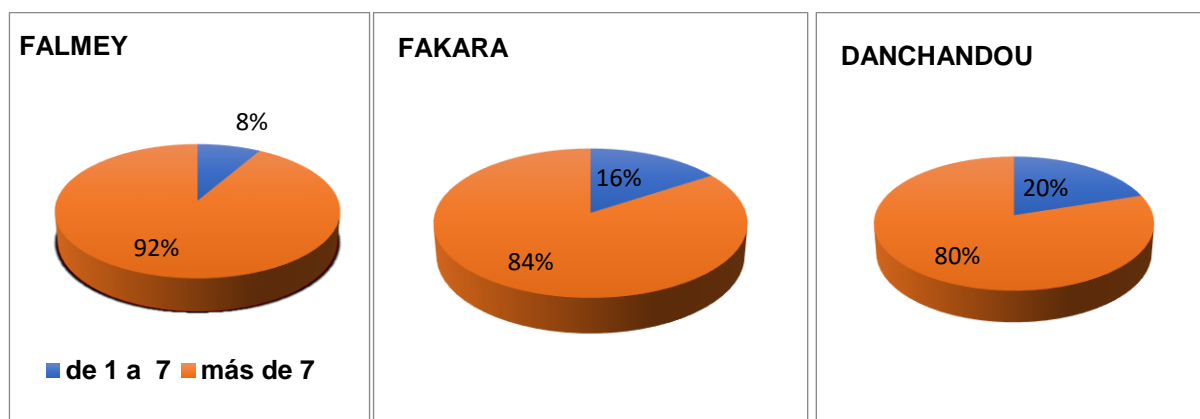
El 100% de los encuestados tiene como especie más abundante *Guiera senegalensis*. Según ellos las razones para elegir las especies están ligadas a sus necesidades. Esta afirmación está confirmada por Haglund et al. (2011) que dicen que los agricultores de los “drylands” de Níger seleccionan y protegen (es decir aplican las técnicas de RNA) en muchas especies nativas de árboles y arbustos. En este sentido Faye et al. (2011) afirman que estos cultivadores manejan y conservan más de 50 especies nativas de árboles y arbustos en estos SAFs en Níger porque proporcionan productos esenciales para su supervivencia. En esta misma dirección, las respuestas de muchos de los encuestados señalan que tienen más de 10 especies en la finca porque así cubren las necesidades específicas de la unidad familiar; también todos reconocen que *Guiera senegalensis* es la más importante no solo para la mejora de sus campos de cultivos sino por los derivados de la especie que les proporcionan ingresos extras para mantener la familia durante el periodo que no hay trabajo de campo.

Del análisis de la encuesta se desprende que los productores de los nuevos municipios de la zona de estudio obtienen enormes ventajas de aplicar las prácticas de RNA. Entre ellas, los agricultores destacan sus productos como frutales, leña, medicinas, renta, forrajes y árboles para servicios ambientales es decir la mejora de la fertilidad del suelo, la conservación de la humedad del suelo, control de la erosión del

suelo, sombra y biodiversidad (Brown *et al.* 2011). Autores como Luedeling y Neufeldt (2012) apuntan que los agricultores desean mantener estas especies en los SAFs, porque existe interés en el potencial de secuestro de carbono de las especies para ayudar a mitigar el cambio climático antropogénico.

Todos los participantes son jefe de la unidad familiar; el 95% de los jefes encuestados son hombres y solo el 5% son mujeres. De la unidad familiar nacen los hijos que a su vez forma una pequeña familia. Todos los miembros de la unidad familiar viven a cuenta del jefe. En Níger cuando hablamos jefe de casa en este contexto se trata de un responsable de una unidad de parentesco más amplia. Una familia muy grande que agrupa ancianos y jóvenes, las distintas mujeres, padres, madres e hijos, incluyendo hijos casados y hermanos con sus esposas (Figura 42).

**Figura 42:** Numero de persona a cargo de un jefe de la unidad familiar



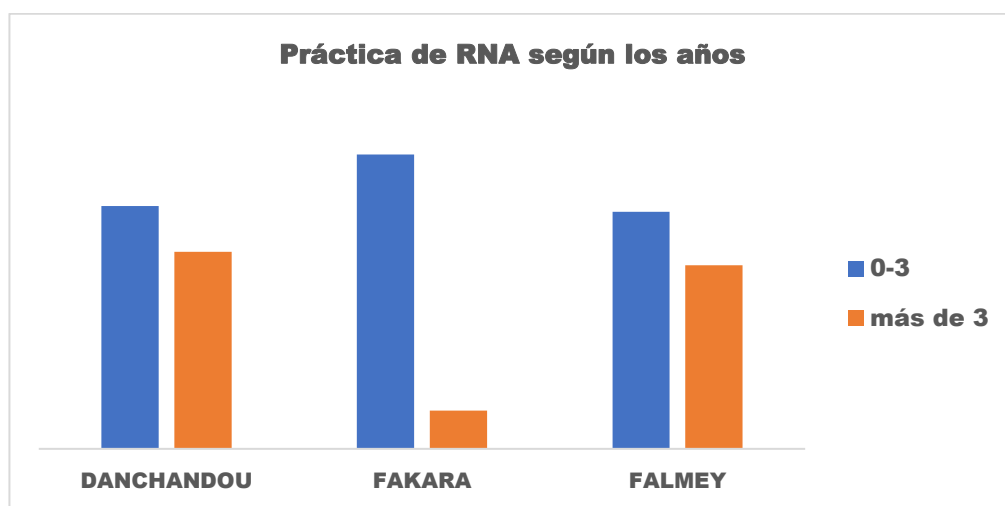
**Fuente:** Elaboracion propia

Además del jefe de la casa (hombre en general) hay siempre una responsabilidad de las mujeres cuyos cometidos pueden variar de una cultura a otra, o de una familia a otra, pero generalmente se encargan del reparto de las tareas colectivas, de coordinar los distintos trabajos cuando hay que acoger a los invitados o en las ceremonias importantes. Las distintas ceremonias están siempre a cargo de las mujeres que se encargan de proveer los alimentos, condimentos, la leña, y el agua. Se organizan, bajo las órdenes de mujeres de edad que son las viejas, para asegurar que los invitados que son los extranjeros tengan todo lo necesario. Ellas intervienen también en la resolución de conflictos entre los miembros de la familia extensa o en el hogar entre marido y mujer.

En cuanto a la experiencia y conocimiento previo de las técnicas de RNA, los encuestados serán participantes del proyecto piloto nacional liderado por la ONG ATFP.

En el momento de las encuestas el proyecto tenía 3 años de vigencia, por tanto, la mayor parte de los encuestados: un 70%, 80% y 75% en Danchandou, Fakara y Falmey respectivamente (Figura 43) fueron introducidos en estas técnicas RNA gracias a la formación recibida en el proyecto (encuestados que están aplicando técnicas RNA entre 0 y 3 años). En este sentido, un 70 %, 80% y 75% de los encuestados en Danchandou, Fakara y Falmey (Figura 43) ya conocían y practicaban las técnicas de RNA en sus SAFs previamente (más de 3 años practicando).

**Figura 43:** Experiencias de practica de la RNA

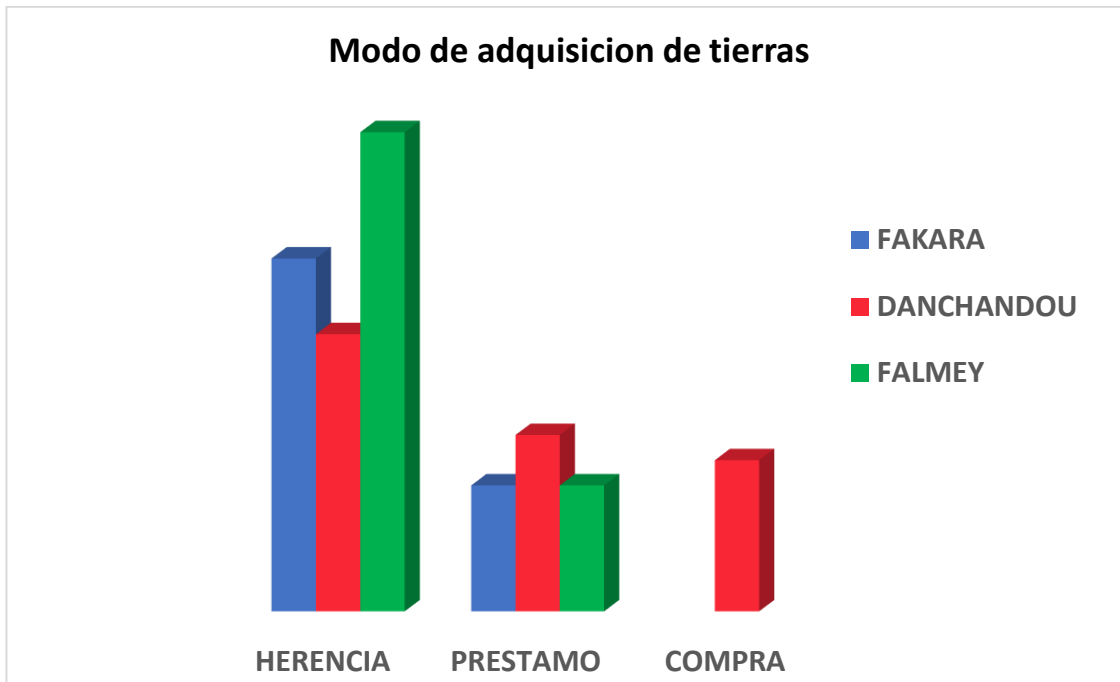


**Fuente:** Elaboración propia.

El acceso a la tierra es mediante compra y venta, alquiler, donación, préstamo y herencia. En la figura 44 los resultados muestran que la mayoría de los encuestados son propietarios de las fincas por herencia. Aunque según las encuestas las familias que tienen mayor ingreso tienen la posibilidad de comprar más fincas es el caso de los pueblos de Danchandou. Esta zona está próxima a la capital y hay un desplazamiento mayor de los agricultores del campo hacia la ciudad en búsqueda de empleo durante el periodo que no hay trabajo de campo. Una vez que vuelve el periodo de lluvias muchos agricultores regresan al pueblo con más ingresos y otros se quedan en la capital enviando dinero a la familia. Este mayor flujo de capital explica porque predomina la adquisición en Danchandou.

En cuanto los pueblos de Fakara y Falmey, la herencia es el factor principal de acceso a la tierra. Falmey tiene la tasa más alta de herencia que las 2 otros departamentos. Existe también el préstamo en los pueblos de la misma zona, pero no es relevante.

Figura 44: Acceso de las tierras en la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 45 los resultados muestran el grado de satisfacción de los agricultores con los beneficios obtenidos por aplicación de las técnicas de RNA (1 representa la máxima insatisfacción y 10 la máxima satisfacción). Los resultados de la encuesta señalan un elevado grado de satisfacción en las tres localizaciones.

Figura 45: Nivel de satisfaccion



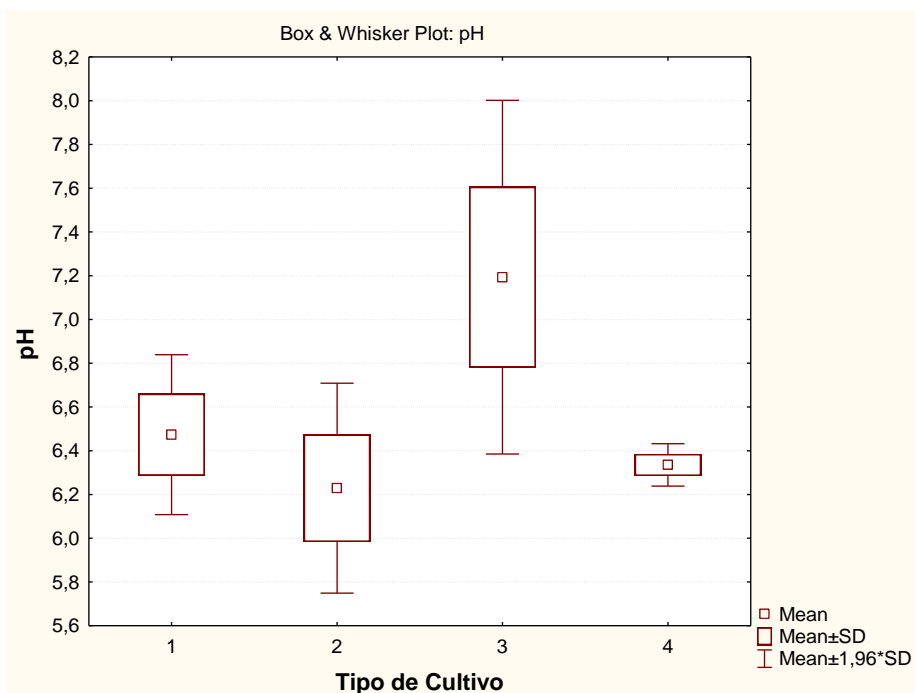
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2) Las muestras de suelo: valoración del “Regreening”.

##### pH

Los valores de pH registrados de las muestras varían en un rango entre 5.92 hasta 7.52 (Anexo 5). Esto indica que son suelos ligeramente ácidos (Marín García, 2003). Según el promedio de los resultados de pH (Tabla 5) de muestras de **parcelas RNA** y **parcelas no RNA**, los **frutales** tienen el valor promedio de pH más alto. En la figura 46 los resultados del pH muestran que en las fincas donde no se aplican las técnicas RNA y se cortan todos los árboles y arbustos presenta valores muy parecidos a las fincas de matorrales densos, lugares donde se dejan todos los brotes de la especie *Guiera Senegalensis* sin cortar. Wezel et al (2000) también en suroeste de Níger en áreas de barbecho de Níger proporcionó valores ligeramente más ácidos para los suelos (valores promedio de pH de 5.48 bajo los arbustos y 5.67 en áreas sin cobertura).

Figura 46: Diagrama de caja y bigotes de la variable pH según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso.



Fuente: Elaboración propia.

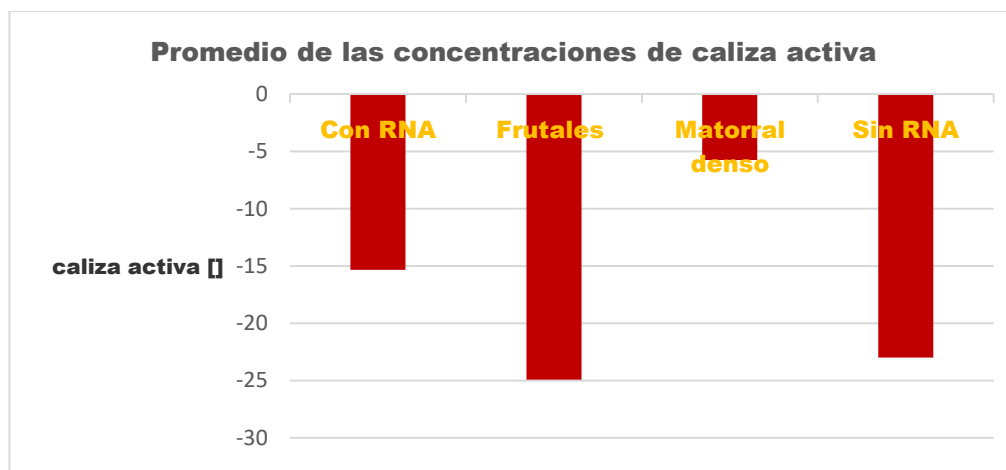
Las parcelas de frutales son las que tienen los valores con mayor variabilidad y los que más se diferencian de las parcelas de cultivo agroforestal (1-no RNA, 2-RNA y 4 matorrales densos). En efecto el test ANOVA indica una diferencia muy significativa para

la variable pH del suelo en los 4 grupos considerados ( $F=11.065$  y  $p=0.0004$ ); sin embargo, los resultados del test pos-hoc de Tukey indican que sólo se diferencian los frutales de las restantes categorías de cultivos en SAFs.

### Caliza activa

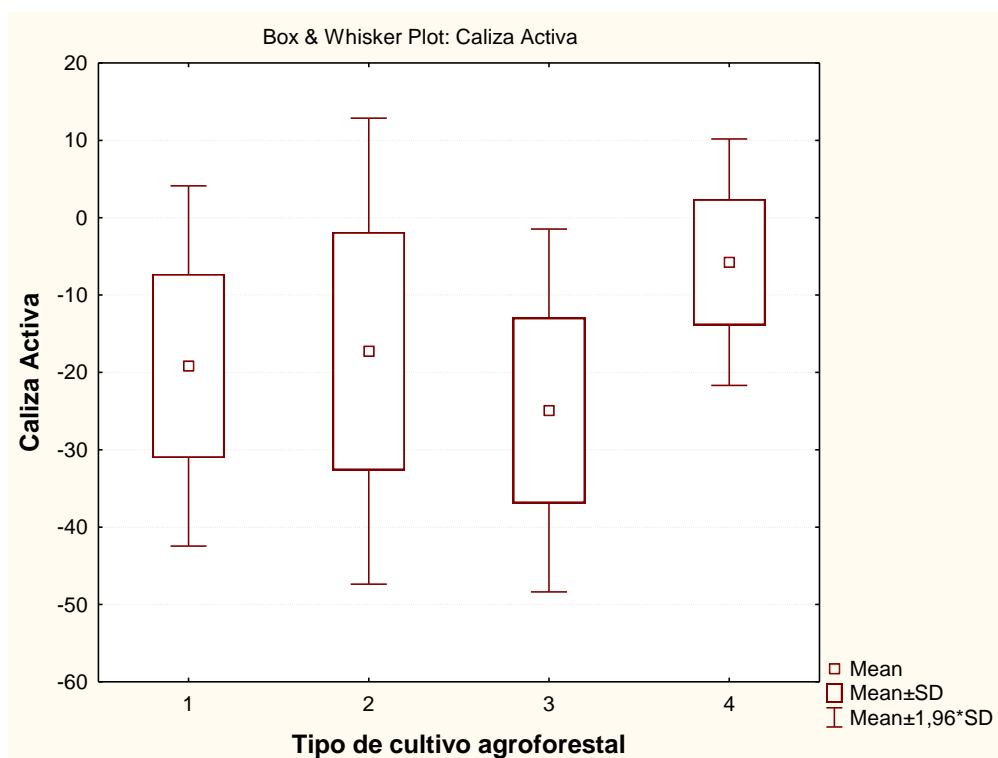
Los valores de la caliza activa obtenidos son valores negativos (tabla 6; Figura 47); lo cual indica que el contenido en el suelo es muy bajo. Según la clasificación de Marín (2003) en los suelos de muy bajo contenido de caliza activa, las plantas se desarrollan mal debido a la deficiencia de este elemento. Según los resultados los suelos de la zona de estudio carecen totalmente de caliza (Anexo 6).

Figura 47: Concentración de la caliza activa según el tipo de uso de suelo.



Fuente: Elaboración propia. Caliza activa (g CO<sub>3</sub>Ca/100g suelo).

**Figura 48:** Diagrama de caja y bigotes de la variable caliza activa según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso.

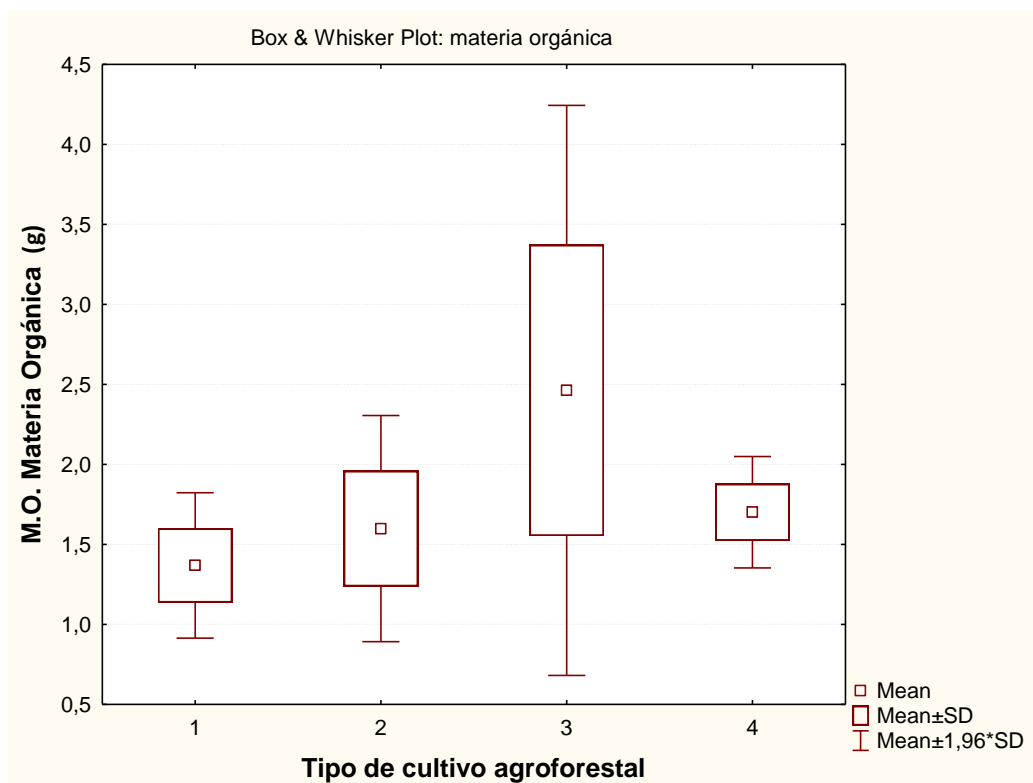


El test ANOVA aplicado sobre el contenido de caliza activa indica que no hay diferencias significativas ( $p =$  en los valores medios de los distintos grupos: No RNA (1); RNA (2); frutales (3) y matorrales (4).

### Materia orgánica

Los valores de la materia orgánica de las muestras varían según el uso del suelo. Aun así, el contenido de la materia orgánica sigue siendo bajo en todos los casos (Anexo 7). Los frutales tienen mayor promedio (2,46 g) (Tabla7) seguido los suelos con matorrales denso que los suelos donde se practican la RNA. En las zonas donde se aplican las técnicas de RNA (**parcelas RNA**) se observa que los valores medios de contenido de materia orgánica son mayores que a la media del contenido de materia orgánica de las zonas donde no se aplica RNA (**parcelas no RNA**) (figura 49).

**Figura 49:** Diagrama de caja y bigotes del contenido de M.O. según el tipo de tratamiento. 1.- Parcelas no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso.



**Fuente:** Elaboración propia.

Los resultados del test ANOVA ( $p = 0.022$ ) y pos-hoc tes de Tukey HSD indican que los frutales presentan valores medios de contenido de M.O. que son significativamente distintos de las medias de los suelos de zonas no RNA, RNA y matorrales densos.

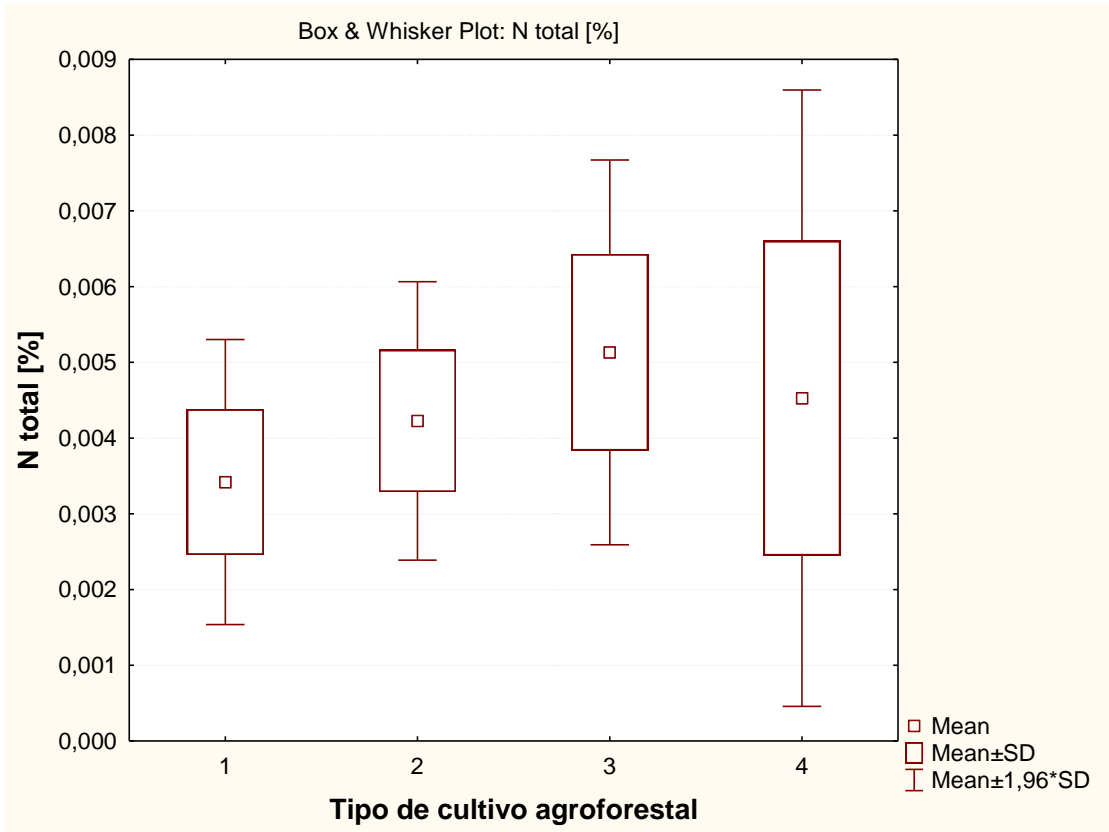
Los valores de la concentración de M.O. (%) están por debajo de del 1% en la mayor parte de los suelos, lo que indica según Walkey-Black que son suelos extremadamente pobres. Estos valores son similares a los proporcionados por Wezel et al. (2000) en suelos de barbecho en Níger.

### Nitrógeno total (%)

El contenido de Nitrógeno total (%) de las muestras es muy bajo (Anexo 8) lo que indica que estos suelos apenas presentan N (extremadamente pobres). En la Figura (50) el promedio de la concentración del nitrógeno es mayor en los campos de frutales seguido de los de matorrales densos. Algunos estudios apuntan que los árboles y arbustos fertilizantes contribuyen al aumento de la fijación de nitrógeno (Makumba *et al.*, 2006) y la redistribución del nitrógeno del suelo profundo a la superficie, especialmente en suelos arenosos (Harawa *et al.*, 2006), o suelos con capas de subsuelo adsorbentes

de aniones (Vagen *et al.*, 2005). Los árboles y arbustos fertilizantes también reciclan los cationes a la superficie del suelo (Vanlauwe *et al.*, 2005), lo que respalda un mayor crecimiento de los cultivos. También se obtienen beneficios significativos de los árboles y arbustos fertilizantes en términos de otro servicio del ecosistema, incluida la provisión de leña y forraje, reducción de la erosión y el secuestro de carbono. No se han observado diferencias significativas de los valores medios en los distintos grupos considerados (ANOVA,  $p=0.201$ ).

**Figura 50:** Diagrama de caja y bigotes de la concentración de Nitrógeno total (%).según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso

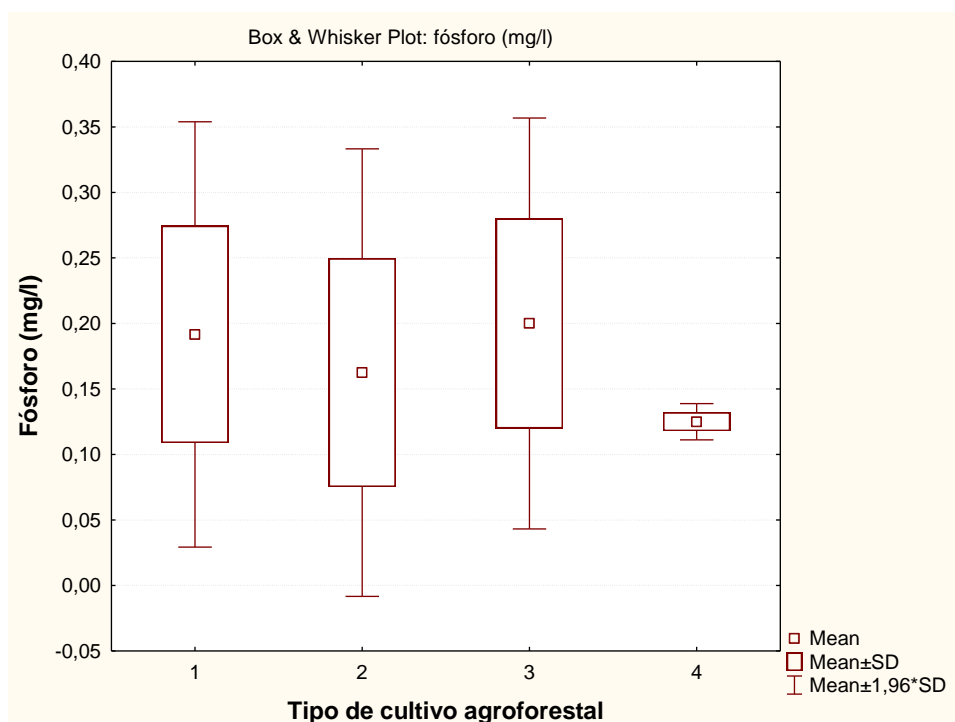


**Fuente:** Elaboración propia.

## Fósforo (mg/l)

Los valores de la concentración del fósforo de las muestras oscilan entre 0,07 y 0,3 (mg/l) (Anexo 9). Estos valores indican que estos suelos tienen un pobre en contenido de fósforo. En la figura 51 se observa que el promedio de la concentración del fósforo es similar en todos los tratamientos (RNA, no RNA, frutales y matorrales densos). En efecto el test ANOVA ( $p = 0,696$ ) refleja que no existen diferencias significativas de la concentración de fósforo en los distintos tratamientos.

**Figura 51:** Diagrama de caja y bigotes de la concentración de Fósforo (mg/l).según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso.



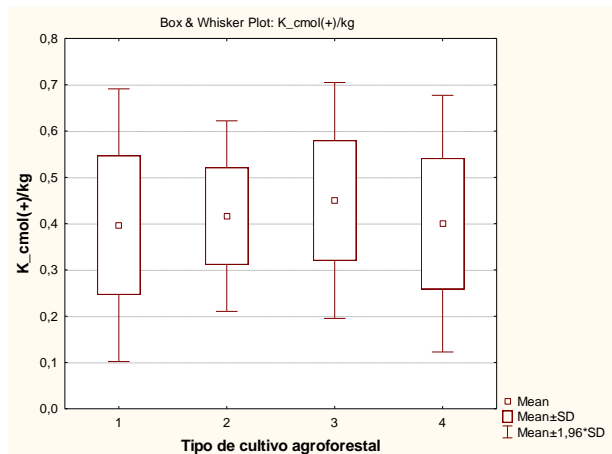
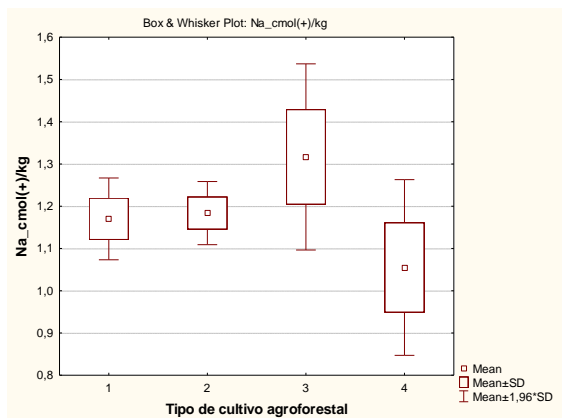
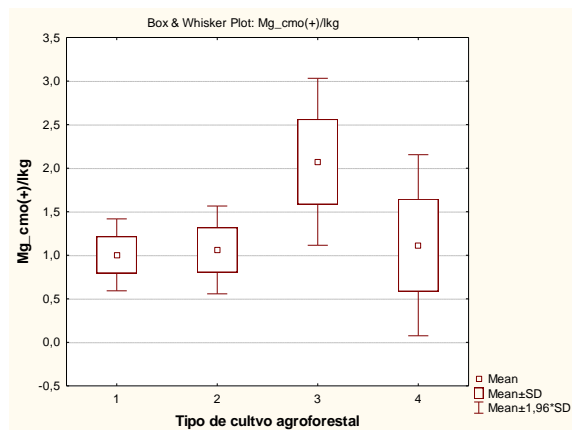
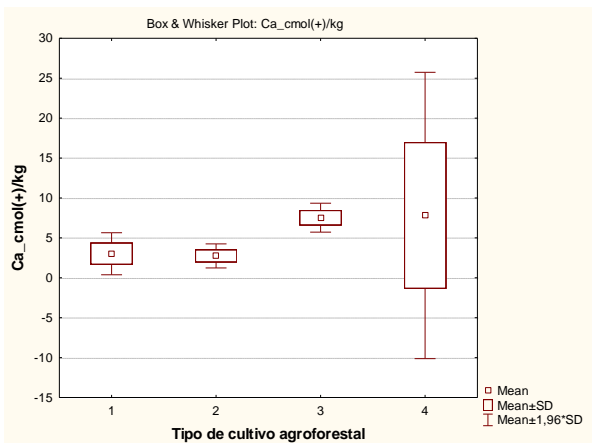
Fuente: Elaboración propia.

## Capacidad de Intercambio Catiónica (Ca, Mg, K y Na)

La capacidad de Intercambio Catiónico (Ca, Mg, K y Na) se recoge en la Figura 52. Los valores promedio de Mg y K si presentaron cierta diferencia, valores promedio más elevados, en las zonas de frutales. Esta tendencia se confirma con los resultados de los test ANOVA que indicaron diferencias significativas para ambos cationes ( $p =$

0,001 para Mg y  $p = 0,003$  para K). El test Tukey HSD señaló que efectivamente los frutales difieren significativamente de los tratamientos **RNA** y **no RNA**.

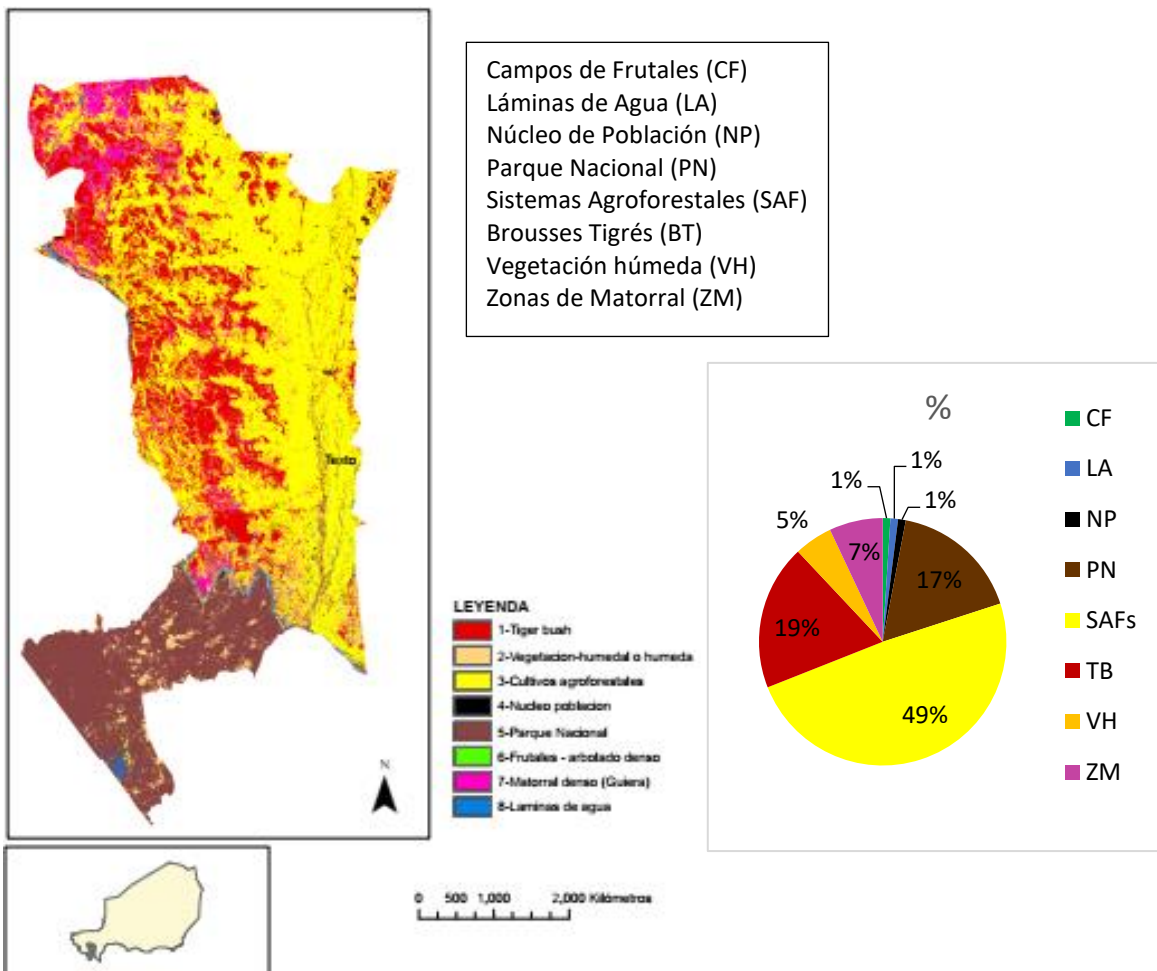
**Figura 52:** Gráfico de caja de Diagrama de caja y bigotes de la concentración de la Capacidad de Intercambio Catiónico según el tipo de tratamiento. 1.- Parcela no RNA; 2.- Parcelas RNA; 3.- Frutales; 4.- Matorral denso



### 4.3) Clasificación supervisada de las coberturas del uso de suelo.

Los resultados de la clasificación supervisada de la zona de estudio reflejaron la siguiente distribución de tipos de uso de suelo (figura 53). Los Sistemas Agroforestales (SAF) representan el 49% de la zona de estudio. Son el tipo de uso de suelo más abundante. Por otra parte, Brousses Tigrés (BT) representa el 19%, el Parque Nacional (PN) 17%, Zonas de Matorral (ZM) 7%, la Vegetación húmeda (VH) 5%, el Núcleo de Población (NP), los Campos de Frutales (CF), y Láminas de Agua (LA) representan 1% cada uno respectivamente. La cubierta vegetal de la zona de estudio está marcada por el predominio de la familia Combretaceae, y *Guiera senegalensis* es la especie dominante en la zona.

**Figura 53:** Mapa resultado de los tipos de usos de suelo de la zona de estudio obtenidos en la clasificación supervisada.



**Fuente:** Elaboración propia.

La validación de la clasificación supervisada ha proporcionado la siguiente matriz de confusión del área estudio (Tabla 11) e índice de kappa para obtener el grado de concordancia. A través esta matriz se compara la clasificación de la imagen con la verdad-terreno. Así se evalúa la exactitud de la clasificación, situando en las filas las categorías de nuestro mapa y en las columnas las mismas categorías para la verdad campo.

Se han determinado los parámetros de Exactitud Global (EG), Exactitud del Usuario (EU), Exactitud del Productor (EP) e índice de Kappa con la plataforma Google Earth Engine. Para validar los tipos de exactitud, se utiliza el índice de Kappa (Rodríguez 2011).

**Tabla 11:** Matriz de confusión (1=BT, 2=VH, 3=SAF, 4=NP, 5=PN, 6=CF, 7=ZM, 8=LA.)

<b>Campo</b> <b>Mapa</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	<b>Suma Mapa</b>	<b>EU %</b>
1	10	0	2	0	0	0	1	0	13	77
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	8	0	24	0	0	0	8	0	40	60
4	0	1	0	2	0	0	0	0	3	67
5	0	0	0	1	6	1	0	0	8	75
6	0	0	0	0	0	1	0	0	1	100
7	1	0	2	0	0	0	5	0	8	62
8	0	2	0	0	0	0	0	2	4	50
<b>Suma campo</b>	19	3	28	3	6	2	14	2	77	<b>EG</b> <b>65%</b>
<b>EP %</b>	52	0	86	66	100	50	36	100		

Fuente: Elaboración propia.

Exactitud Global (EG) = Suma de los valores de la diagonal / número de observaciones.

Exactitud del Usuario (EU)= número de coincidencias/total de la fila

Exactitud del Productor (EP) = número de coincidencias/total de la columna.

Según la tabla 11, la interpretación de la matriz de confusión, se agrupan en filas y columnas. las filas muestran la fiabilidad de las áreas de entrenamiento digitalizadas y las columnas muestran el acierto de la clasificación en el campo por categoría. La validación se llevó a cabo con 211 puntos en la plataforma Google Earth Engine de cuales 126 corresponden correspondieron a las áreas de entrenamientos y 85 para la validación.

La clasificación proporcionó una validez global del 65% y un índice Kappa de El resultado del cálculo de índice Kappa es de 0,52 que según López (2001) representa una concordancia “Moderada”

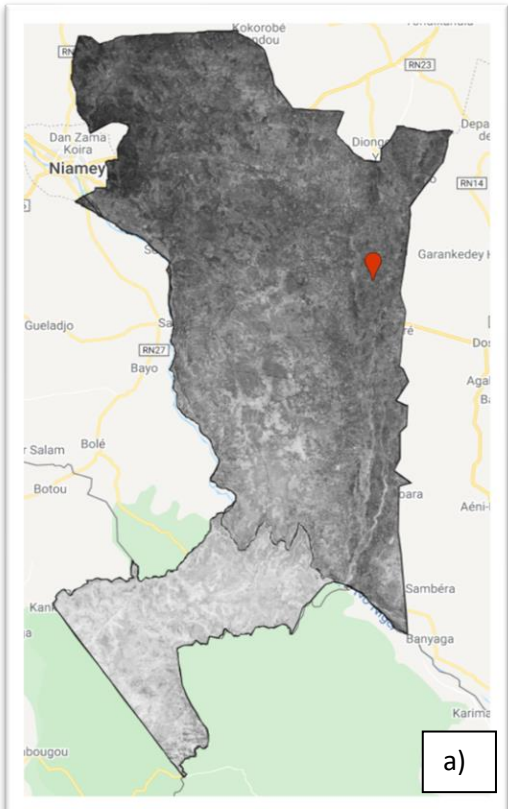
Este índice puede tomar valores entre -1 y 1. Mientras más cercano a 1, mayor es el grado de concordancia, por el contrario, mientras más cercano a -1, mayor es el grado de discordancia. Un valor de  $k = 0$  refleja que la concordancia observada es precisamente la que se espera a causa exclusivamente del azar (Cerdea y Villarroel 2008).

#### **4.4) Estudio de la evolución de la cobertura arbóreo-arbustiva entre los períodos 1985-1995 y 2013-2017.**

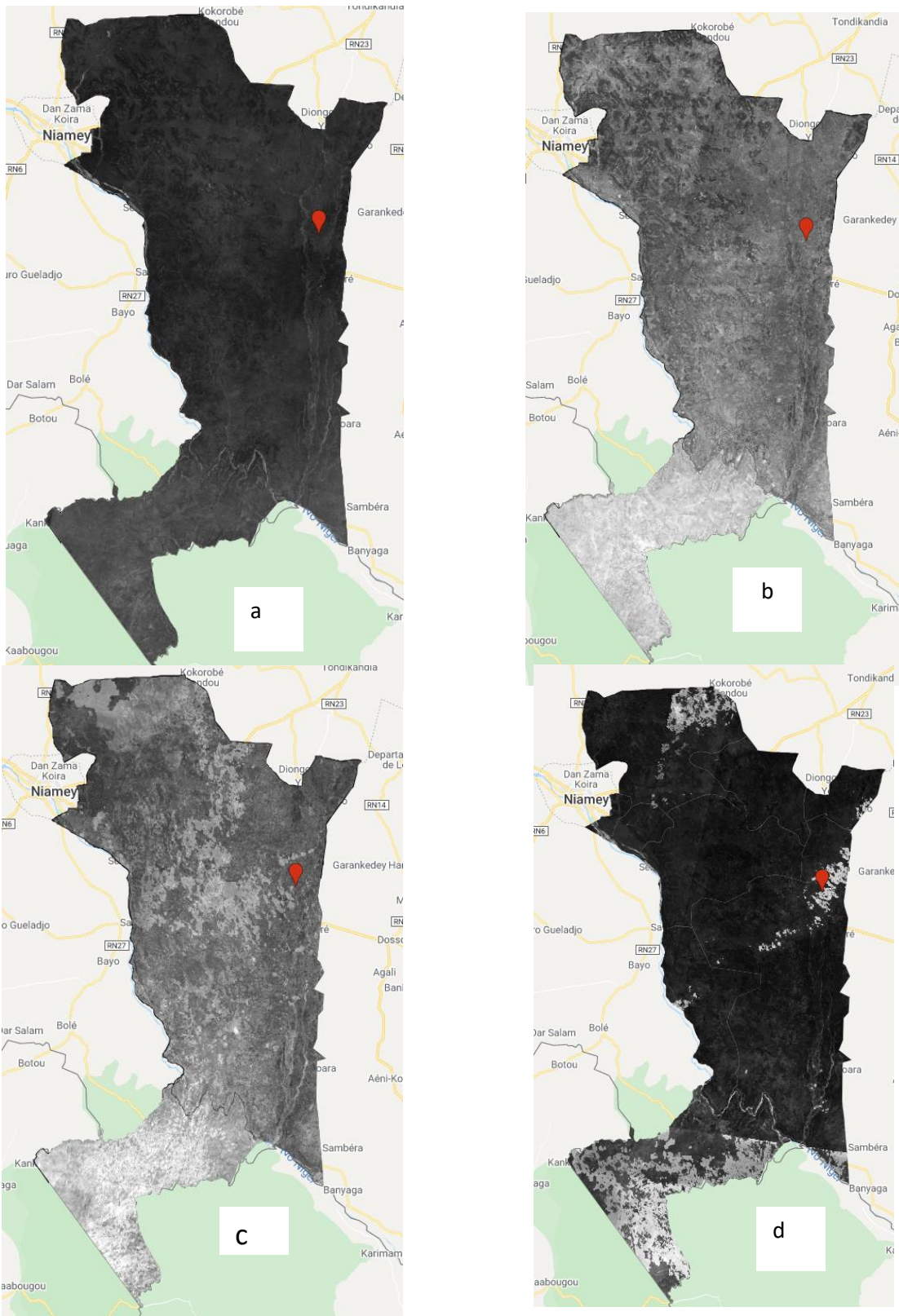
##### **4.4.1) Colección de las imágenes media NDVI y desviación típica NDVI**

Para evaluar la evolución de la vegetación arbolada y arbustiva, se realizó un análisis de detección de cambios que consistió en la diferencia normalizada de los NDVI de dos períodos. Como paso previo se obtuvieron la media de los NDVI para los períodos 1985-1995 y período 2013-2017, durante las estaciones húmeda y seca (Figura 54). También se calculó la imagen desviación típica de esos períodos y estaciones (Figura 55).

Figura 54. Resultados de los valores de la media de los NDVI: a) años 1985-1995 estación húmeda; b) años 1985-1995 estación seca; c) años 2013-2017 estación húmeda; d) años 2013– 2017 estación seca.



**Figura 55:** a) SD 1985-1995 estación seca; b) SD 1985-1995 estación húmeda; c) SD 2013-2017 estación húmeda d) SD 2013-2017 estación seca.



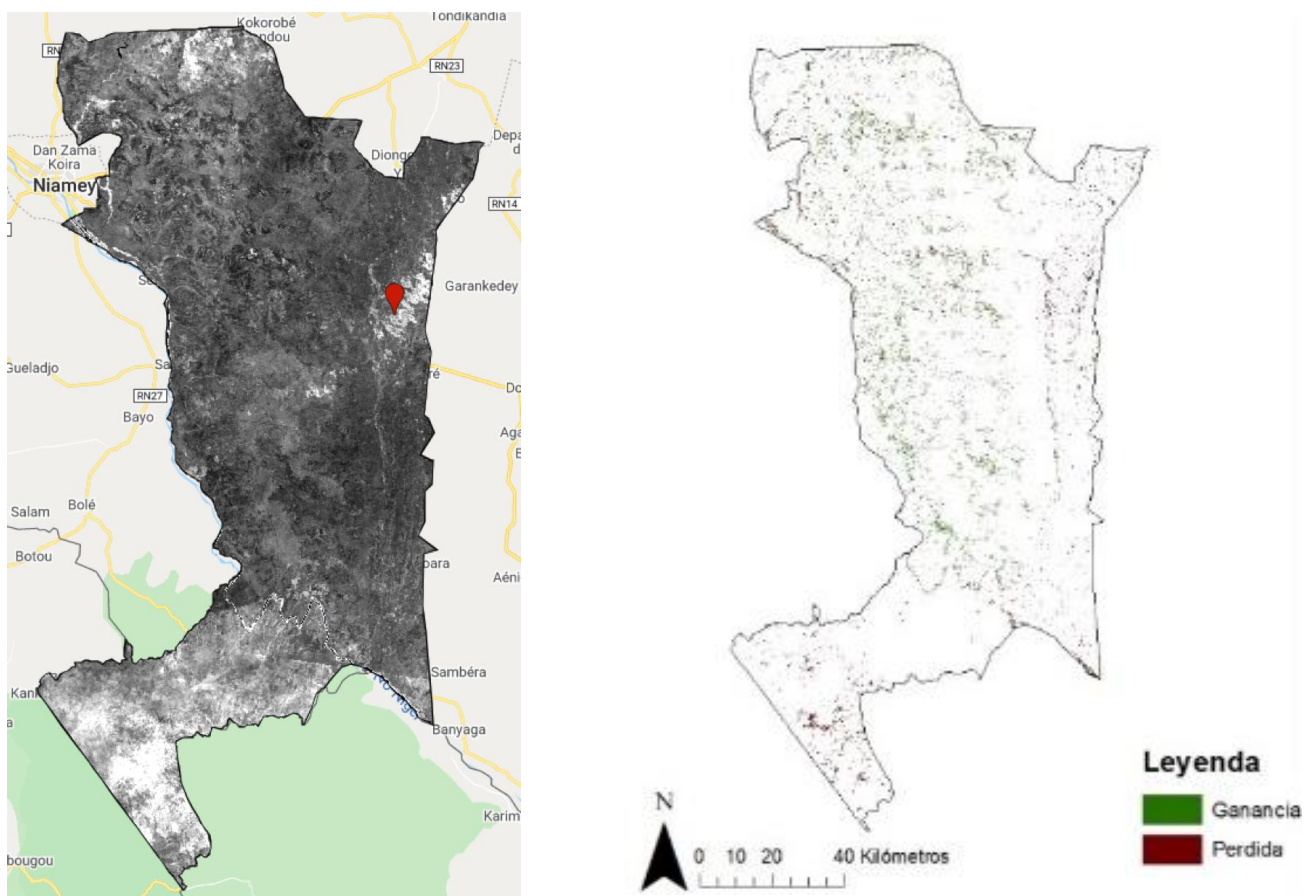
#### 4.4.2 Mapas del cambio de la cobertura leñosa (imagen de DNcambio)

Para la detección de cambio se obtuvo un mapa de la diferencia normalizada de las medias de NDVI del período 2013-2017 y el período 1985-1995 para la estación seca (Figura 56). A continuación, se establecieron los umbrales de cambio. Para ello se consideraron zonas de ganancia de la cobertura vegetal como aquellos píxeles cuyos valores eran superiores a la  $\text{media} + 2 \times \text{desviación típica}$  de la imagen diferencia normalizada. Análogamente las zonas de pérdida fueron aquellos cuyos valores eran inferiores a la  $\text{media} - 2 \times \text{desviación típica}$  de la imagen diferencia normalizada.

El mapa de cambios resultante, DNcambios, se presenta en la figura 56.

La superficie de cambios detectados en CCL (mapa M: DNcambios) ha sido 38.450 ha que representa un 3,1% de la zona de estudio. Se estimó un incremento y una pérdida de la cubierta arbustiva-arbórea de un 1,2% y 1,9% % del total de la superficie de la zona de estudio, respectivamente.

**Figura 56.** Imagen de detección de cambios: diferencia normalizada de las medias de los NDVI de los períodos 2013-2017 y 1985-1995 (izquierda) de la estación seca. Imagen DNcambios con zonas de ganancia y pérdida de vegetación (derecha).

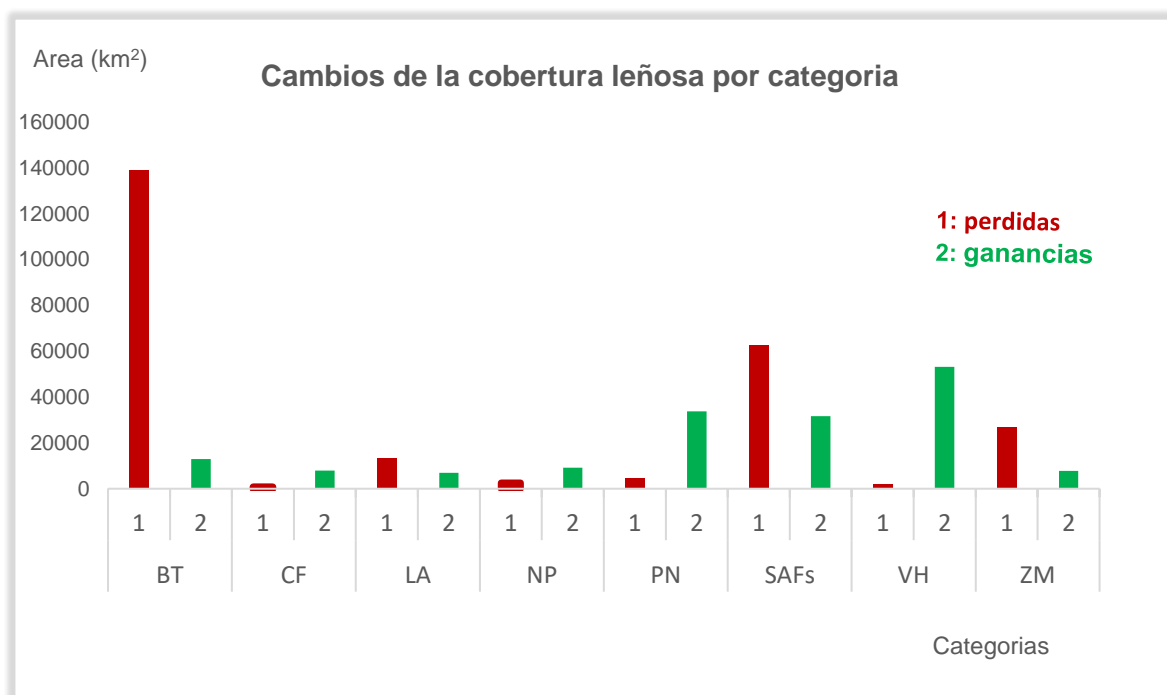


#### 4.4.4) Reparto de pérdidas y ganancias por categoría de uso del suelo.

Se procedió a combinar los mapas DNcambios y el mapa de usos del suelo para evaluar en qué tipos de uso del suelo se habían verificado las mayores ganancias y pérdidas de cobertura vegetal arbórea y arbustiva (Figura 57).

La categoría Brousse-tigreé (BT) es la que presenta mayor superficie de pérdida de cobertura arbóreo-arbustiva. Esto se explica porque tanto los árboles como los arbustos de esta BT representan un importante suministro de especies medicinales y leña para usos domésticos de la población de los pueblos colindantes. Análogamente, Fiorillo et al. (2017) también detectaron mayor nivel de degradación de las formaciones de Brousse tigreé en las inmediaciones de Niamey, donde la presión de la población sobre los arbustos para obtención de plantas medicinales y leña era mayor.

**Figura 57:** Ganancias y pérdidas por categoría de la capa DNcambios.



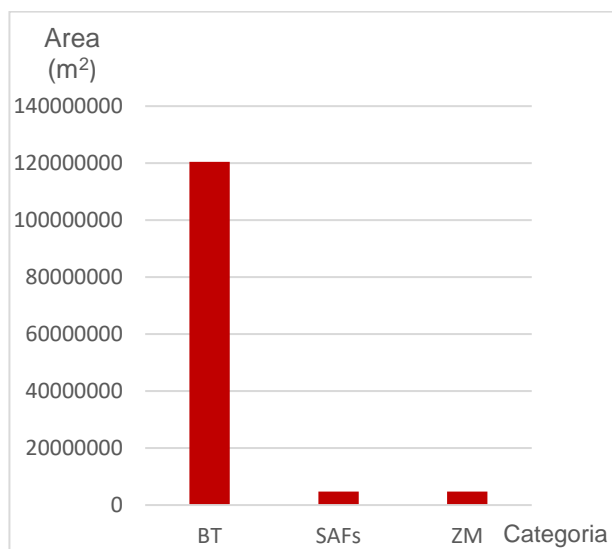
**Fuente:** Elaboración propia.

Las pérdidas de cobertura vegetal arbolada de los BT de la figura 58 a son muy considerables debido que estas formaciones están sometidas a las cortas continuas de los pueblos colindantes. Según las encuestas los BT representan para la población asentada en los pueblos “una farmacia sin dueño”, es decir todo tipo de medicamentos se pueden encontrar en estos campos.

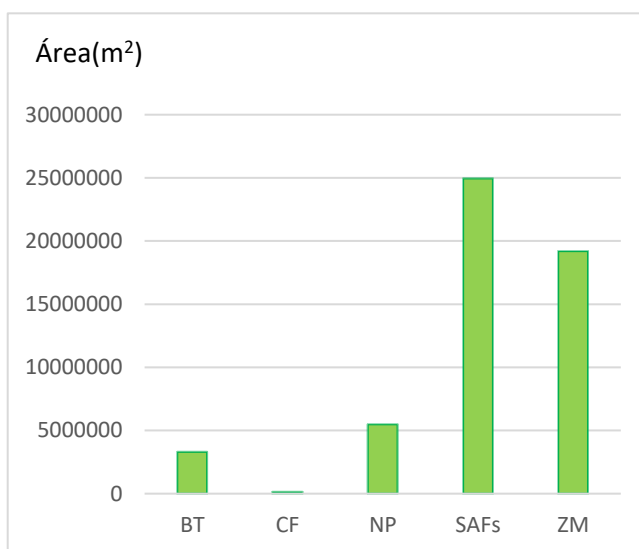
En cuanto los SAF las pérdidas de cubierta arbóreo-arbustiva es muy reducida. Podrían justificarse porque en el periodo seco, entre febrero y marzo, es el momento pico donde la disponibilidad de los alimentos de los cultivos está a punto de agotarse. Por ello, la mayoría de las familias utilizan los derivados de los árboles y arbustos como fuente de alimento. En el caso de las Zonas de Matorral, sucede lo mismo. La población los utiliza como fuente de alimento para los animales haciendo forrajes, y para la renovación de algunos lugares destinados a albergar el rebaño.

En la figura 58 b se observa que los principales incrementos de la cubierta arbóreo-arbustiva se han situado dentro de la categoría de los SAF. Esto podría indicar que efectivamente la aplicación de las técnicas de RNA ha contribuido a este incremento de la cobertura arbórea-arbustiva. En el caso de las ZM son fincas donde no se practican las técnicas RNA, no se cortan para cultivar. En este caso el incremento de la cubierta arbustiva podría estar relacionada con el incremento de las precipitaciones. En efecto, diversos autores como Dardel et al. (2014) y Leoroux et al. (2015), justifican el incremento de la vegetación en ciertas áreas por la mayor pluviosidad que se ha registrado en la zona en este siglo XXI.

**Figura 58:** a) Total de pérdidas por categoría, b) Total de ganancias por categoría.



a)



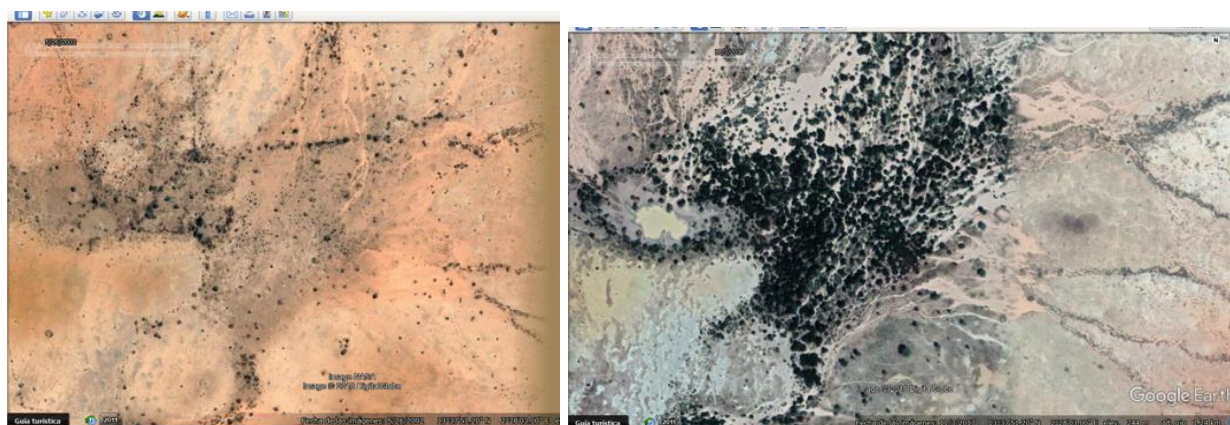
b)

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.4.5) Validación visual de polígonos de ganancias y pérdidas mediante Google Earth.

La imagen de cambios DNcambios, se validó mediante un procedimiento de análisis visual. Las áreas de mayor tamaño se localizaron en imágenes de muy alta resolución espacial, haciendo uso de la herramienta Collect Earth y Google Earth. En la colección de imágenes se localizaron aquellas imágenes que validaban los cambios. Algunos ejemplos se aportan seguidamente (figura 59 y 60).

Figura 59: Incremento de la cobertura arbórea-arbustiva (regreening)

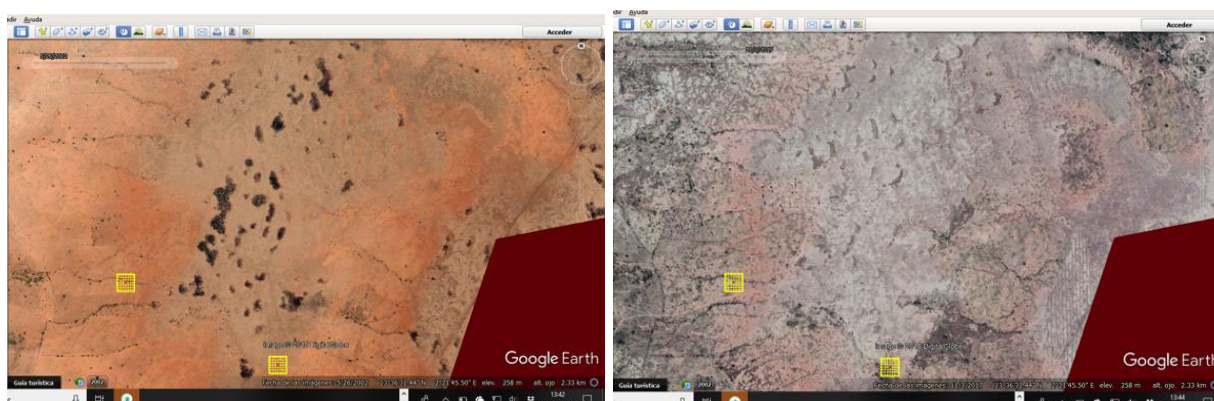


Polígono 48\_ZN

mayo, 2002

noviembre, 2017

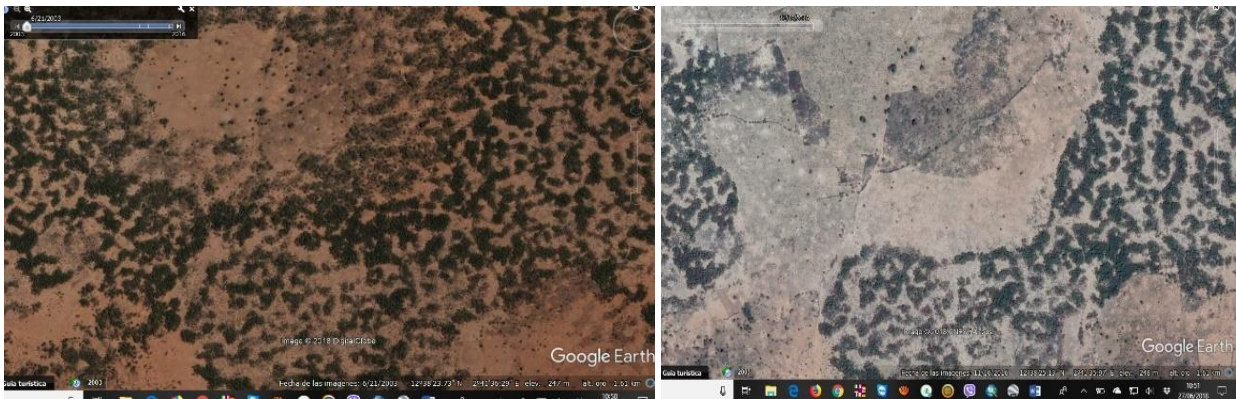
Figura 60: Perdida de la cobertura arbórea-arbustiva



Polígono 84\_BTD

mayo, 2002

noviembre, 2017



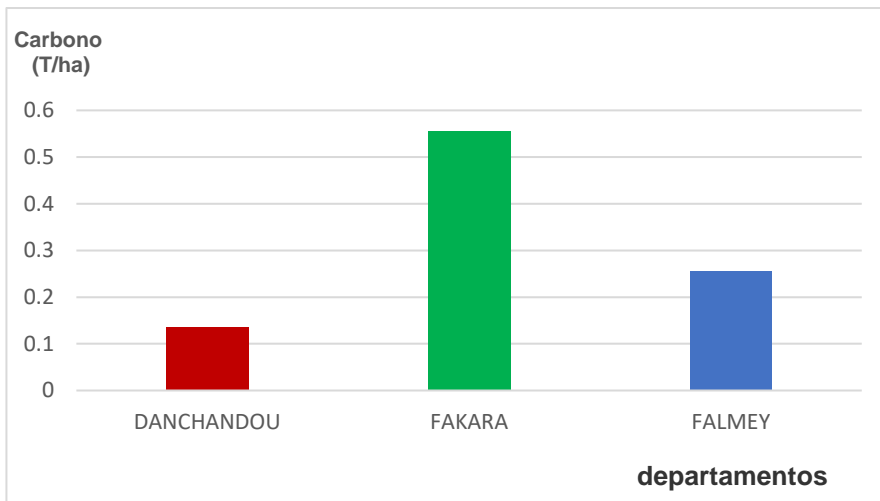
Polígono 90 BTD 2003-2016

#### 4.5) Cuantificación de la contribución antropogénica al “Regreening”

En las zonas semiáridas y subhúmedas de África occidental, los agricultores han practicado durante generaciones un sistema tradicional de uso de la tierra conocido como "parque agroforestería" (Boffa, 2000). Es una formación vegetal bajo fuerte influencia antropogénica donde los árboles se asocian con cultivos en una disposición espacial dispersa. Los parques agroforestales satisfacen varias necesidades y realizan diferentes funciones que van desde la producción agrícola hasta la producción de madera (Seignobos et al., 2000).

Los resultados de este estudio favorecerán a una mejor comprensión de la capacidad de captura de carbono en los SAF de los países del Sahel y a identificar rutas para mejorar estas existencias. Los resultados mostraron que el carbono almacenado en la biomasa de la especie “*Guiera senegalensis*” varía según los pueblos donde se practican la RNA. Las cantidades de carbono almacenadas por la especie “*Guiera senegalensis*” fueron más altas en Fakara que en el resto de la zona de estudio (figura 61).

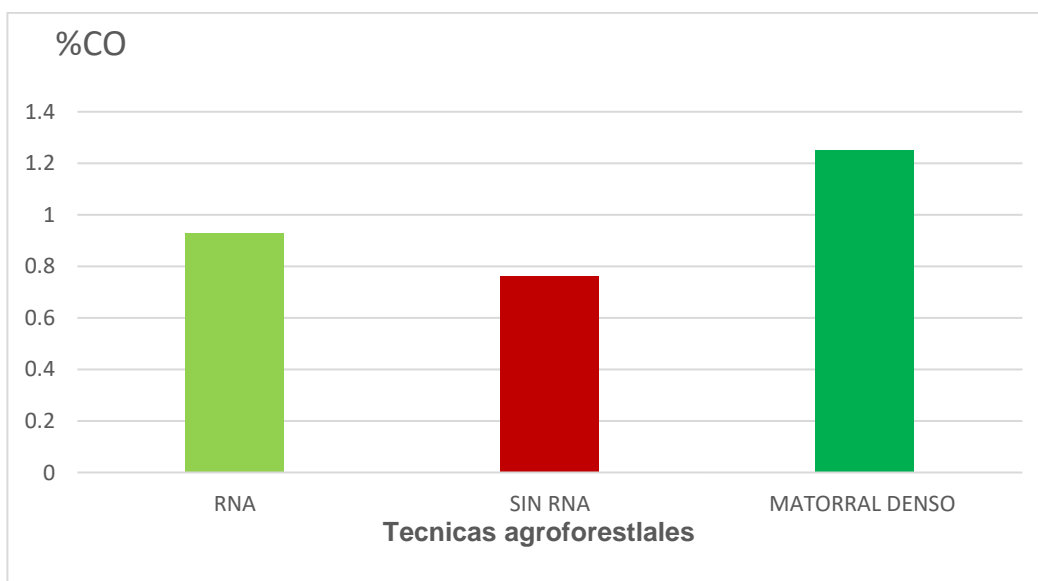
Figura 61: carbono capturado/departamento



Fuente: Elaboración propia.

En caso del carbono orgánico del suelo ha variado también según las tres tecnologías agroforestales utilizados durante el estudio (figura 62), es decir con RNA, sin RNA y Matorral denso. Las fincas con estado natural que es las de matorral denso tiene un mayor porcentaje de carbono orgánico. Esto se explica por el hecho de acumular materia orgánica. Lógicamente las fincas sin RNA tiene menor porcentaje debido a un poco cantidad de materia orgánica. En estas áreas se cortan tanto los arbustos (matorrales) como los árboles para tener una gran superficie de cultivo. Su finalidad es la obtención de tener espacio.

Figura 62: Carbono orgánico almacenado en el suelo



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.6) Discusión de los resultados obtenidos.

**Los resultados de la fase preliminar** nos han permitido de diseñar el trabajo de campo. Por lo cual a partir estos resultados como indica el mapa de diferencias de NDVI se ha podido reclasificar en tres niveles de NDVI (bajo, medio, alto) para localizar posibles áreas de "regreening" de la zona de estudio. Estos resultados van en la misma orientación que algunos estudios que han detectado un cambio de cobertura del suelo en los países del Sahel mediante múltiples sensores. Es el caso de los estudios de Herrmann y sus colaboradores (2005) que han indicado un aumento de la vegetación en el Sahel desde la década de 1980 mediante imágenes de satélite de alta resolución de NDVI. Giannini (2008) también corrobora esta afirmación según sus trabajos realizados en algunas zonas del Sahel. Así, varios autores como Tougiani (2009), Bégué y sus colaboradores (2011) han demostrado que, en muchas regiones del Sahel, la tendencia a la degradación de la tierra es compensada por un proceso de "revegetación". Según ellos, el Sahel está experimentando su mayor avance medioambiental. Estos estudios revelaron también un "regreening" del cinturón Saheliano desde los años ochenta después de la gran sequía. Algunos autores argumentan que este "regreening" se basa también en el buen manejo del suelo debido a las prácticas de RNA particularmente en Burkina Faso (Reij *et al.*, 2005), Níger (Awaïss, 2000; Reij *et al.*, 2009) y Mali (Tappan y McGahuey, 2007). Según la literatura científica es un proceso de revegetación del Sahel (Hermann *et al.*, 2005, Anyamba *et al.*, 2005, Olsson *et al.*, 2005, Nicholson 2005, Lebel *et al.*, 2009, Fensholt *et al.* 2011, Dardel, 2014). Hoy en día con la tecnología de captura de imágenes, esta región ha sido un foco de mucha atención a los científicos por el reverdecimiento de la cobertura del suelo. Muchos estudios recientes hablan del "regreening" del Sahel, en este asunto, apuntan, que muchos factores (las precipitaciones han aumentado de un lado y otros consideran que hay factores antropogénicos) están al origine de este cambio de cobertura de seco a verde. Existe un consenso general entre los modelos regionales sobre el "regreening" del Sahel, aunque estas proyecciones están asociadas con un alto nivel de incertidumbre (Brooks, 2004). El proceso de "regreening" de los SAFs del Sahel que realizan los agricultores abarca el mejoramiento de los medios de vida (Pye, 2013). Los datos obtenidos de los satélites muestran cambios y la magnitud del "regreening" en toda África (Ecklundh y Olsson 2003; Herrmann *et al.* 2005; Olsson *et al.* 2005; Vlek *et al.* 2008). De hecho, según

estudios realizados en la franja Sur de Níger por Tougiani y sus colaboradores (2009) afirman que, durante las últimas tres décadas, alrededor de 200 millones de árboles han crecido en los campos cultivados de esta parte Sur del país. Se ha notado una aumentación de densidad de pies arboles por hectárea en las fincas (de 3 árboles/ha a 40 en la actualidad), incluso más de 100 árboles por hectárea (Reij et al., 2009). Muchos autores (Seaquist et al., 2009; Tougiani, 2009; Bégué et al., 2011) han demostrado que, en muchas regiones del Sahel, se invierte la tendencia de la degradación leñosa y se produce un proceso de “regreening”. Este reverdecimiento apreciado indica un aumento en el NDVI (Seaquist et al., 2009). Según estos autores Larwanou y Saadou, (2011), Sendzimir et al., 2011, este “regreening” se explica por cambios en el uso del suelo, la gestión de los recursos naturales y las prácticas agrícolas, incluidas las técnicas para la conservación de árboles mediante la RNA. Para Níger, estos mismos autores han demostrado que el reverdecimiento se produce gracias a los esfuerzos de rehabilitación llevados a cabo por los diversos actores, incluidos los agricultores a través de la RNA, como los casos de las regiones de Maradi y Zinder. Los resultados de la fase preliminar corroboran con muchos estudios recientes. Es el caso de un estudio hecho por la FAO de 2016 sobre las tierras áridas del mundo y en particular en el Sahel indica que los árboles aislados en estos lugares representan bosque de la amazona. De hecho, un artículo publicado de la FAO confirma que la cobertura arbórea de las zonas áridas de la Tierra y sus resultados demuestra que nuestro planeta tiene más árboles de lo que se imagina. Gracias al avance de la tecnología de las plataformas como Google Earth Pro junto con otras herramientas de ver imagen por satélite han hecho posible de identificar con más detalles de lo que está ocurriendo alrededor de los bosques. Y resulta que hay un 9% más de árboles en la Tierra según los resultados del estudio. Este estudio ha demostrado que, el resultado del muestreo que se hizo en todo el mundo para hacer una buena revisión de la cobertura arbórea de las zonas áridas corresponde a un bosque tan grande como el tamaño de Europa repartido por todo el mundo, y “las zonas áridas tienen un 42% más de vegetación de lo que se había estimado hasta el momento” explica Gonzaga (2016) que lideró el equipo que analizó alrededor de 15.000 parcelas en Europa y Rusia. Otro estudio de Miguel (2017) en este sentido apunta que las tierras secas ocultan un bosque tan grande como la selva amazónica. Gracias a imágenes de Google Earth Pro y Bing desvelan 467 millones de hectáreas nuevas de árboles en las regiones áridas. Esta cifra estimada gracias a imágenes áreas de alta resolución

captadas por satélites como Landsat, Modis o Sentinel podría tener grandes implicaciones en el clima. El mismo grupo de investigación de la FAO apunta encontrar una nueva estimación sobre la cobertura forestal en estas tierras secas gracias a imágenes y datos de satélites. La buena noticia es que el estudio realizado confirme que esto supone un aumento de entre un 40 y un 47% de la cobertura forestal que se estimaba para las zonas áridas, y eleva un 9% la superficie global de bosques que hay en el planeta. A este aumento tanto de la cobertura o como de la superficie del bosque le llama "Sumidero oculto de CO<sub>2</sub>". Este nuevo cálculo contribuye a aclarar la incertidumbre existente alrededor de las estimaciones de los sumideros de dióxido de carbono en los bosques de zonas áridas particularmente en el Sahel. En esta línea los autores del estudio consideran que las reservas de carbono de las sábanas leñosas del Sahel podrían aumentar entre un 2 y un 20% ayudando a reducir la incertidumbre sobre el cálculo global de carbono. Esta gran contribución de los científicos a través de imágenes de alta resolución captadas por los satélites Digital Globe, los mapas de Google Earth Engine o Bing Maps ha descubierto que en 2015 había 1.327 millones de hectáreas de biomas áridos donde el porcentaje de cubierta forestal es superior al 10%. Ese es el umbral que usa la FAO para poder llamar bosque a los árboles hallados en un área de 5.000 m<sup>2</sup>. Estas cifras suponen elevar casi en un 50% la superficie arbórea presente en las tierras secas y en un 9% el total de los bosques del planeta. Otro estudio de Javier Gódar destaca que "Usar imágenes de alta resolución hace que ahora en cada píxel de la imagen de satélite se pueda ser mucho más específico y detectar mejor la cantidad de bosque". Para este científico "sería clave poder disponer de esta resolución a lo largo del tiempo para saber si este aumento de la cubierta forestal se debe "no solo a estos cambios en la metodología, sino también a una recuperación del bosque en algunas zonas". La gestión de los sistemas agrícolas para secuestrar carbono ha sido aceptada como una solución parcial al cambio climático (Morgan et al. 2010). La vegetación perenne es más eficiente que la anual, ya que asigna un mayor porcentaje de carbono al subsuelo y, a menudo, extiende la temporada de crecimiento (Morgan et al. 2010), lo que mejora aún más el potencial de secuestro de carbono de los sistemas agrícolas (Watson et al. 2000; Oelbermann et al. 2006a; José 2009).

**Las afirmaciones de las encuestas** coinciden con el estudio realizado por Ambouta (1984) en las zonas agroforestales donde apunta que se encuentra distintas especies leñosas, sin embargo, la especie *Guiera senegalensis* es la más dominante y

presente junto con algunas especies como *Piliostigma reticulata*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia spp.*, *Faidherbia albida*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*, *Combretum glutinosum*. Cada agricultor tiene un punto de vista sobre las especies que se encuentra en su finca. La mayoría confirman que no cortan los arbustos no solo por el manejo de suelo sino les sirven como medicina tradicional. Se ha obtenido una lista de diferentes especies (Anexo3) que se encuentran en los campos de cultivos visitados y la más dominante es la *Guiera senegalensis*. Algunas de las especies de vegetación leñosa del anexo 3 han sido identificados en estudios realizados por Hänke, (2012) y Sinare, (2013) en el Sahel. Según los resultados estos autores apuntan que las especies contribuyen a los medios de vida de los pueblos. Como el consumo de las hojas, frutos en las comidas; corteza, raíces en la medicina y otras partes de árboles y arbustos utilizados con fines higiénicos o cosméticos; ramas y frutos de árboles y arbustos como forraje para mantener el ganado; troncos de árboles y arbustos utilizados para la construcción o la artesanía; madera de árboles y arbustos como leña para energía en las casas rurales. Con todos los beneficios citados que se obtengan a partir de las especies algunos agricultores tienen la capacidad de venderlos para obtener ingresos en efectivo. Estos trabajos se basan en estudios de campo de toda la zona Sudano-Saheliana de África Occidental principalmente en Burkina Faso, Mauritania, Gambia, Senegal, Mali y Níger. La participación social para reverdecer la cobertura arbórea-arbustiva en el Sahel ha sido clave para el éxito de la técnica que extendido a al menos 22 países africanos (Reji, 2009).

Desde un punto de vista ambiental sin la utilización de pesticidas algunas de las especies impiden el desarrollo de las plagas y enfermedades según algunos agricultores cuestionados sobre los rendimientos de los cultivos. Esta afirmación de las encuestas coincide con los estudios realizados de Gworgwor (2007) en campo de cultivo. Según los resultados de este autor en un estudio de Nigeria, el mijo que crece bajo la especie *Acacia albida* no fue infectado por la estriga de la plaga del mijo. En un estudio de Senegal Diakhaté *et al.*, (2013) apuntan que el número de nematodos que son plagas en el mijo fue significativamente menor en el mijo cultivado con la especie de *P. reticulatum*. Una encuesta reveló que especies como *Cassia sieberiana*, *Combretum lecardi*, *Guiera senegalensis*, *Piliostigma reticulatum* y *Crotalaria retusa* son utilizados por los agricultores como indicadores de fertilidad del suelo (Doumbia 2000). Según los estudios de Wezel (2000) en Níger el efecto positivo de los arbustos *G. senegalensis*, *P.*

*reticulatum* y *C. glutinosum* en el rendimiento de los cultivos está relacionada principalmente con el control de la erosión lo que lleva a la retención de más nutrientes para cultivos en los campos. Algunos estudios han demostrado que los SAFs van más allá de los beneficios locales sino también es una alternativa para atenuar los efectos negativos del Cambio Climático tanto al nivel local como regional. Lo cual contribuye como una perspectiva ambiental al nivel global. Es el caso de los trabajos de Takimoto *et al.*, (2008) que concluyen que los parques agroforestales y los campos en barbecho tienen el potencial de secuestro y almacenamiento de carbono en comparación con parques tradicionales lo que demuestra que los parques tienen una importante reserva de carbono, tanto en biomasa como en suelo. Los estudios concluyen también que es necesario aumentar las densidades de los árboles para aumentar el secuestro de carbono. Woomer y sus colaboradores (2004) descubrieron que la cobertura de la copa del árbol es un buen indicador del almacenamiento de carbono de todo el ecosistema y que se almacena más carbono en el suelo que en la biomasa aérea. En un estudio de Senegal, estos autores encontraron una relación significativa entre el carbono medido de la biomasa aérea en parcelas de ensayo y las densidades de arbustos identificadas en las imágenes de satélite (Lufafa *et al.*, 2008). Además, los árboles suministran diversos beneficios ambientales a muchos de los sitios de la zona de estudio, tales como la protección y el aumento de la fertilidad de los suelos, el aumento de la retención de agua de los suelos, y hábitat para la fauna. En esta misma dirección estudios realizadas en los SAFs desde un punto de vista ambiental nos confirma que los árboles proporcionan sombra, mejora el microclima y conserva el agua en el suelo (Samba *et al.*, 2001), disminuir la disponibilidad de luz (Kho *et al.*, 2001) y atraer a las aves o insectos (Leenders *et al.*, 2005).

La descomposición de las raíces y hojarasca contribuyen al aumento de materia orgánica del suelo, al reciclaje de nutrientes y, en consecuencia, al aumento de los rendimientos agrícolas (Schroth, et al., 2002; Dupraz y Liagre, 2008). Las tecnologías agroforestales también permiten controlar la erosión del suelo gracias a las raíces de diferentes especies que mantienen la cohesión entre los agregados del suelo (Stokes et al., 2009; Phillips et al., 2013).

Desde un punto de vista social los SAF generan muchos beneficios tanto a las mujeres como los adolescentes como indican algunos autores que los productos de *P. biglobosa* (frutas utilizadas para producir una especia importante en las salsas), *V.*

*paradoxa* (frutas consumidas y manteca de karité extraída del grano) y *A. digitata* (hojas importantes en las salsas y frutas) se recolectan principalmente por mujeres (Elías, 2013; Faye *et al.*, 2010) y también vendidos por mujeres (Buchmann *et al.*, 2010; Elias y Carney, 2007; Teklehaimanot, 2004). Boffa (2000a, b) y Marone, (2012) afirman que las especies leñosas proporcionan forraje y frutos, para la alimentación del ganado. En los SAFs de la zona de estudio donde se encuentra arbustos de *S. birrea* autores como Glew *et al.*, (2004); Gouwakinnou *et al.*, 2011 apuntan en la misma dirección que los anteriores que los niños son los principales beneficiarios de los granos de fruta de esta especie y que son fuentes de proteínas, ácidos grasos y nutrientes. En estudios realizados en Burkina Faso y Benín, la principal razón para que los agricultores mantengan la vegetación leñosa en los campos son los frutos que producen que contribuyen a la alimentación (Assogbadjo *et al.*, 2012; Devineau *et al.*, 2009; Kristensen y Lykke, 2003). Lo cual coinciden con las encuestas hechas de este trabajo. Estos mismos autores apuntan también una segunda importancia de los SAFs en el estudio de Benín fue su uso en la medicina tradicional mientras que en Burkina Faso encontró que la diversidad de especies leñosas mantenidas por los agricultores era para la madera de construcción en comparación con las especies frutales, y las especies leñosas con hojas para alimentos o forraje. En cambio, según estudios realizadas por Nkamleu y Manyong (2005) in Camerún muchos factores influyen para la adopción de sistemas agroforestales. Según estos autores los beneficios de los SAF están relacionado con el género del agricultor, el tamaño de la familia del hogar, el nivel de educación, la experiencia del agricultor, la pertenencia a asociaciones de agricultores, la seguridad de la tenencia de la tierra, la distancia del pueblo al campo, la accesibilidad del pueblo.

Según las encuestas individuales todas las personas que participaron son de familias numerosas. En este sentido hay concordancia con Thangata y sus colaboradores (2008) que concluyeron que los SAFs en Malawi, Zimbabue y Zambia depende de la composición del hogar y el tamaño de la finca. Sus actividades económicas son agricultura, ganadería, artesanía y comercio. Los modos de adquisición de las fincas son: heredades, compra y venta, préstamo y la contratación. La mayoría confirman que son heredad seguida de la compra. Según los agricultores la práctica de la RNA en tierras agrícolas se inició mediante servicios de extensión y proyectos de desarrollo. Los principales objetivos fueron combatir la desertificación, garantizar la protección del medio ambiente, mejorar el rendimiento agrícola y para otros bienes y

servicios. Las razones para adoptar la RNA son casi las mismas en todos los pueblos de la zona de estudio. Según las encuestas ellos consideran que es necesario la técnica porque los árboles y arbustos contribuyen a mejorar la fertilidad del suelo (caso de *Faidherbia albida* señalado por estudios hechos), suministran alimentos para las personas y animales, se utilizan como medicamentos, sus usos en la artesanía, pero también como fuentes de energía doméstica y materiales de construcción. En la conversación los campesinos apuntan que establecieron un comité de control que trabaja en conjunto con los de otros pueblos para prevenir las cortes de los arbustos para la energía y leña, porque según ellos los arbustos y árboles constituyen una fuente básica necesaria para vivir, poniendo ejemplos como las raíces, ramas y hojas de *Guiera senegalensis* se usan en la medicina tradicional para tratar heridas, diarrea y disentería. Según las encuestas los agricultores consideran que los árboles contribuyen a diversificar la economía del hogar. La mayoría de los agricultores entrevistados indicaron que los árboles sirven como fuente de ingresos, lo que muestra su importancia para generar ingresos. Para ellos los árboles constituyen una de sus principales fuentes de ingresos anuales y consideraron a los árboles como cajas de ahorro a largo plazo que podrían cosechar cuando fuera necesario. Durante las encuestas de los grupos focales muchos de los agricultores confirman que utilizando la técnica RNA reduce la temperatura, velocidad del viento, evaporación, y exposición directa a la luz del sol y para proteger los cultivos contra fluctuaciones extremas en microclima y humedad del suelo. En este sentido las encuestas coinciden con los estudios de Kizito *et al.*, (2006) que confirman que la presencia de *Guiera senegalensis* y *Piliostigma reticulatum* en los campos disminuye las temperaturas del suelo durante el día y aumenta la temperatura del suelo durante la noche. Entre otros estudios realizados en el Sahel Tambo y Abdoulaye, (2013) apuntan que los agricultores de la sabana nigeriana siembran árboles para proporcionar sombra y refugio para el ganado y algunos agricultores también siembran árboles para cultivos de sombra. Ellos confirman también como estrategia de adaptación al aumento de las temperaturas debido al cambio climático. Muchos agricultores afirman que con la RNA obtienen leña y madera de construcción, una mejora de los rendimientos de los cultivos y la productividad animal, un aumento de la biodiversidad, una mejora la calidad de vida debido al aumento de los ingresos. Muchos agricultores señalan beneficios ambientales por la siembra de árboles. Por ejemplo, indicaron que mezclar los árboles con los cultivos porque los árboles retienen el agua y

protegen la tierra durante las tormentas de arenas. Los árboles tienen una función protectora y bloquean los vientos (Leenders *et al.*, 2005). En la bibliografía de Leenders y sus colaboradores, 2007 afirman que los árboles disminuyen la velocidad del viento en la escala de un campo hasta varios campos. Estudios realizados al nivel de parcelas donde se encuentran arbustos de SAF indicaron una disminución de infiltración de agua con las especies de *P. biglobosa* y *A. digitata* (Sanou *et al.*, 2010) sin embargo una mayor infiltración bajo *G. senegalensis* y *P. reticulatum* (Kizito *et al.*, 2006). El efecto positivo de los arbustos *G. senegalensis*, *P. reticulatum* y *C. glutinosum* en el rendimiento del cultivo está relacionada principalmente con el control de la erosión y lo que lleva a la retención de nutrientes para cultivos en los campos (Wezel, 2000).

Larwanou *et al.* (2006) realizaron entrevistas semiestructuradas en tres distritos de la región de Zinder en Níger. Sus estudios apuntan una serie de impactos positivos resultantes de la RNA tal como el aumento de los ingresos a través de la venta de productos arbóreos, la mejora de las condiciones ambientales al reducir la erosión eólica, el aumento de la productividad agrícola a través de las mejoras en el suelo, la mejora de la producción ganadera a través del aumento de forraje, la mejora seguridad alimentaria. En este sentido los resultados de Reij y sus colaboradores (2009) sobre los estudios previos de RNA argumentan que el éxito de Níger con la técnica constituye no solo un "regrening " sino una transformación agroambiental del Sahel más grande, administrada por los agricultores, que ocurrió en los últimos treinta años.

Según las encuestas para los agricultores vulnerables, la RNA está destinada exclusivamente al autoconsumo que abarca los diversos usos domésticos de la leña, la madera para servicios y la alimentación humana. La madera es utilizada por la mayoría de los habitantes de la zona de estudio para la construcción de casas, refugios, huertos de animales, barreras y tapar pozos. Muchas herramientas y utensilios domésticos útiles están hechos de árboles leñosos. La corteza y las fibras de las plantas leñosas también se utilizan en la construcción.

Para ello practicar la RNA en sus campos tienen muchas ventajas no solo fertilizar sino también para varias otras razones, como la recolección de forraje, de leña y / o servicio a la venta. La mayoría de las especies leñosas presentes en los campos proporcionan forraje aéreo en la estación seca o proporcionan vainas que son alimento complementario para los animales domésticos. La mayor parte de este forraje está destinado al autoconsumo, pero algunos propietarios menos vulnerables lo

comercializan. Entre las especies utilizadas como leña hay *Combretum glutinosum*, *Piliostigma reticulatum* y *Guiera senegalensis*. Gran parte de la producción de madera se autoconsume entre las familias más vulnerables; sin embargo, para todas las categorías sociales, la madera constituye una fuente importante de ingresos generados a través de los mercados semanales. Estos productos se venden en los mercados y generan, especialmente para las mujeres, ingresos sustanciales que se utilizan para la organización de ceremonias sociales como bodas y bautizos.

Hay pocas investigaciones sobre los SAFs del Sahel. En la zona de estudio la cubierta arbórea-arbustiva de los SAFs varía considerablemente. En la zona de estudio donde se ha tomado tanto las muestras de suelo como las mediciones de los matorrales, los agricultores citaron muchas especies leñosas que se encuentran en sus campos de cultivos. Ellos afirman también que *Guiera senegalensis* es la especie más dominante. En este sentido Kindt et al. (2008) identificaron 110 especies de árboles y arbustos en los "parklands" del Sahel, entre ellos *Guiera senegalensis* J.F.Gmel.

Debido a la composición química de los suelos y otros factores como los tipos de suelo, las precipitaciones y pendiente del suelo las tecnologías no funcionan de la misma manera en los sitios. Se ha documentado significativamente de una multitud de tecnologías para la mejora de la fertilidad del suelo en varios países de África. Algunos estudios apuntan tecnologías que incluyen la conservación del suelo y el agua, como la de pozos llamado "zai" en el Sahel, el uso de nutrientes orgánicos en los SAFs como el estiércol de alta calidad en Kenia (Kipsat et al. 2004) y el abono de corral en Zimbabwe (Mutiro y Murwira 2004). Sin embargo, los estudios realizados en diferentes partes de África muestran que la integración de los aportes de nutrientes inorgánicos y orgánicos es una mejor opción para aumentar la eficiencia en el uso de fertilizantes y proporcionar un suministro más equilibrado de nutrientes en el suelo (Nziguheba et al., 2004). Estudios realizados en distintas SAFs bien manejados implican positivamente en la fertilidad del suelo debido a la contribución de los árboles. Esta idea es apoyada por autores como Ravi y sus colaboradores (2010) que afirman que existen efectos positivos de los arbustos en la fertilidad del suelo y que esto puede conducir a la formación de "islas de fertilidad". En el Sahel por ejemplo parques agroforestales con especies arbóreas como la *Parkia biglobosa* (neré) y la *Vitellaria paradoxa* (karité) han demostrado mayor fertilidad que los campos sin árboles (Elias, 2013; Faye et al., 2010; Teklehaimanot, 2004). Autores como Ludwig et al., 2004; Hagos y Smit, 2005; Cramer y Bond, 2013

apuntan que la vegetación leñosa tiene una gran influencia en las propiedades del suelo en las sábanas áridas y semiáridas de África. Varios estudios han demostrado que los arbustos y árboles grandes tienen efectos positivos mucho mayores en los suelos que los pequeños debido a su mayor biomasa que cae al suelo (Wiegand *et al.*, 2005; Throop y Archer, 2008).

En este sentido Mudrak y sus colaboradores, 2014 confirman que la mayor biomasa de arbustos grandes que cae ingresa al suelo mayor cantidad de nutrientes durante la descomposición que la biomasa de arbustos pequeños independientemente de las especies. Muchos autores consideran que la influencia de la vegetación leñosa en las propiedades del suelo en las sábanas áridas y semi áridas es muy considerable a nivel de investigación (por ejemplo, autores como Cramer y Bond, 2013; Hagos y Smit, 2005; Ludwig *et al.*, 2004). Otra influencia potencial de la vegetación leñosa en los suelos es el efecto del tamaño de la planta. De hecho, varios estudios han demostrado que los arbustos y arboles tienen efectos muchos mayores en los suelos debido a su mayor biomasa que cae al suelo (Throop y Archer, 2008; Wiegand *et al.*, 2005). Autores como Abule *et al.*, 2005; Hagos y Smit, 2005; Munzbergova y Ward, 2002 han reportado estudios de zonas áridas que demuestran que bajo las copas de árboles y arbustos hay un enriquecimiento de los nutrientes en el suelo. Bayala y sus colaboradores (2006) apuntan que los SAFs basados en especies de *Faidherbia albida* podrían proporcionar un beneficio triple del cambio climático: la mitigación, adaptación basada en el ecosistema y mejora de la seguridad alimentaria. Se ha demostrado que tanto los árboles como los arbustos en los SAFs aumentan la materia orgánica y mejoran la calidad del suelo (Dossa *et al.* 2009). Wezel y sus colaboradores (2000) apuntan que los arbustos aumentan la acumulación de nutrientes del suelo y mantienen la fertilidad del suelo. Estos mismos autores indicaron que los árboles y arbustos reducen la velocidad del viento y atrapan el polvo, principalmente en el caso de follaje denso. Yélémou y sus colaboradores (2014) informan también que la mejora del suelo ayuda a evitar el transporte de partículas del suelo por el viento, reduciendo la evaporación de agua en el suelo y aumentando la humedad del suelo. En efecto muchos estudios han demostrado que los suelos de los SAFs tienen mayores niveles de carbono orgánico, nitrógeno mineralizable, fósforo, potasio y calcio comparados con los suelos donde no hay árboles (Nair *et al.*; 2009). A medida que aumenta la cubierta arbórea-arbustiva, los autores Harris (2007), Polgreen (2007), Levett (2008), y Salopek (2008) según sus estudios

notaron que los agricultores disfrutaban no solo del aumento de los rendimientos de los cultivos sino también los ingresos adicionales de los productos arbóreos-arbustivos. Si bien que la mayoría de los estudios para esta región del Sahel indican un clima más seco y cálido (Tieszen et al. 2004), lo que puede reducir los niveles de equilibrio de carbono, como el caso de estudio realizado por Lufafa y col. (2008) que estimaron las pérdidas de carbono orgánico del suelo entre 21% y 23% en los SAFs de Senegal. Woomey y col. (2004a) también informaron que las pérdidas netas en las existencias de carbono en respuesta al cambio climático ya se han producido en varias SAFs de Senegal. Batjes (2001) informó grandes diferencias en el stock de carbono entre los tipos de suelo, incluso bajo el mismo uso del suelo en la región del Sahel. Muy pocos estudios analizaron los efectos del estiércol animal en fracciones más estables de la materia orgánica del suelo, como la materia orgánica asociada a minerales. Algunos de estos estudios mostraron un efecto significativo del estiércol en el C asociado a minerales (Hai et al., 2010; Huang et al., 2010), mientras que otros midieron ningún efecto o muy poco (Wu et al., 2005; Gulde et al., 2008). Sin embargo, la utilización del estiércol animal es una fuente importante de materia orgánica que es importante para la fertilidad del suelo a través de sus efectos sobre las propiedades físicas, biológicas y químicas. En el contexto del cambio climático, el almacenamiento de carbono en los suelos también puede ayudar a reducir la tasa de acumulación de dióxido de carbono atmosférico (Janzen, 2004). Por lo tanto, es relevante identificar las prácticas agronómicas que pueden conducir a cambios en las reservas de carbono del suelo. A pesar de estos estudios que indican las reservas de carbono más bajas en la región del Sahel otros investigadores (Batjes 2001; Woomey et al. 2004b) apuntan que las prácticas sostenibles de la gestión del suelo pueden tener el potencial de compensar las tendencias actuales. Es el caso de la reciente iniciativa impulsada por los agricultores de Níger (Reij et al. 2009) y la introducción de SAFs irrigados a lo largo del río Senegal que son pasos prometedores en esta dirección. En la bibliografía estudios realizados reportan que la mayoría de las especies leñosas tienen un efecto positivo en la concentración de los nutrientes del suelo. De las especies reportadas que tienen un efecto positivo en la concentración del N del suelo figuran: *F. albida*, *A. senegal* y *A. tortilis* ssp. *raddiana* (Campa et al., 2000; Deans, 2003). Estos mismos autores confirman que los arbustos de los SAF (*V. paradoxa*, *P. biglobosa* y *G. senegalensis*) tienen también un efecto positivo no solo en la concentración de los nutrientes del suelo

también sobre el carbono total en la capa superficial del suelo (Lufafa *et al.*, 2008; Takimoto *et al.*, 2008; Woomer *et al.*, 2004). El contenido de materia orgánica y carbono mineralizable mostró un efecto positivo de varias especies, pero se estudió solo en la capa superficial del suelo. Según un estudio realizado por Tesfaye *et al.*, 2017 sobre los impactos de *Faidherbia albida* en los SAF en la región sudano-saheliana del África subsahariana demostró que esta especie aumenta el nitrógeno en los suelos y que la presencia de árboles dio como resultado entre 35–55% más de N disponible cerca de las copas de los árboles. Los árboles de *Faidherbia* mejoran la fertilidad del suelo a través del proceso ecológico de fijación de nitrógeno según Giller, (2001) reciclando los nutrientes (Sileshi, 2016) y acumulando materia orgánica en el suelo (Gelaw *et al.*, 2015). Esta especie es bien conocida por sus impactos positivos en la productividad del cultivo bajo sus copas (Mokgolodi *et al.*, 2011). Aunque los efectos de los arbustos son positivos en la mejora de la fertilidad del suelo, según autores como Kho *et al.*, 2001; Gelaw *et al.*, 2015; Sileshi, 2016 no se encontraron pruebas de que la materia orgánica del suelo aumentó bajo las copas de *Faidherbia albida*. Sin embargo, las concentraciones de N disponible estaban elevadas bajo las copas de los árboles.

En el caso de nuestro estudio las zonas donde se aplicó la técnica de RNA o sin RNA los valores medios de pH están debajo de 7 lo cual indica que son suelos ácidos. Esta acidez del suelo bajo *Guiera senegalensis* se destacó también por el trabajo de Wezel *et al.* (2000) y Dossa *et al.* (2009). Según las encuestas realizadas, la mayoría de los campesinos llevan los residuos de la casa al campo (basura del hogar, estiércol seco o fresco de las cabras, corderos, vacas, las gallinas etc..) portándolos a mano poco a poco o mediante tracción animal. Esta acción humana de llevar en los SAFs tanto la basura de la casa como los abonos orgánicos de los animales pueden alterar las características de la fertilidad del suelo lo que cambia la disponibilidad de nutrientes del suelo (Scheffer y Schachtschabel, 2010). Dentro de las características estos autores destacan el pH del suelo y el contenido de la materia orgánica.

La acidez de estos suelos puede ser por causa de los fuertes vientos y también la carencia de desechos orgánicos bajo *G. senegalensis* porque las hojas que caen son transportadas por los vientos según las encuestas y deja la mayor parte del suelo desnuda. En este sentido los autores como Michels (1994), Kainkwa y Stigter (1994) indican que los árboles y arbustos funcionan como barreras naturales que reducen la velocidad del viento. Un estudio realizado en la Sabana sudafricana por Hagos y Smit

(2005) en condiciones similares de la zona de estudio informó también un pH más bajo en estos arbustos. Se ha encontrado una diferencia significativa con la materia orgánica, el fósforo asimilable y los cationes ( $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) de la capacidad de intercambio catiónico. Estos resultados coinciden con los estudios realizados de Herbrig (1997) en agroecosistemas de Níger en el parte semiárido del Sahel. Este autor apunta que los arbustos tienen un efecto importante en la distribución de nutrientes en el suelo con una concentración significativamente mayor de Na, P debajo de los arbustos. Mai Moussa (1996) realizó un estudio sobre los efectos de la densidad de *Faidherbia albida* en la fertilidad del suelo en dos pueblos de Níger: Guilleni con alta densidad de árboles y Tilli con árboles más dispersos. Los valores de pH, P disponible, K intercambiable, N total y bases intercambiables fueron más altos en Guilleni que en Tilli, pero la diferencia no fue estadísticamente significativa. Por lo tanto, los resultados no fueron concluyentes con respecto a N, P, K, Ca, Na, Mg y pH del suelo. Se observó un gradiente decreciente de fertilidad del suelo con la distancia desde el tronco y la profundidad del suelo. Debido a su fenología inversa, los árboles consumieron menos agua que otras especies con hojas durante la temporada de cultivo y pudieron reducir la temperatura del aire en sus alrededores en 5 ° C (Mai Moussa 1996). El efecto clave de *F. albida* en la producción de cultivos está en sus aportes de N a través de la biomasa y la fijación de nitrógeno. Esto se ve coincido por el hecho de que una aplicación de 180 kg de N  $\text{ha}^{-1}$  en el área abierta de N'douga (Níger) produjo una biomasa de mijo similar a la de esta especie (ICRAF 1996). Además, en un intento por cuantificar los efectos de los árboles de *Faidherbia* en los cultivos, Kho *et al* (2001) informaron un aumento en la producción de mijo en un 36% bajo la copa de *F. albida* en comparación con el campo abierto. Se estimó que N y P debajo de los árboles eran más de 200% y casi 30% más altos, respectivamente que, en el campo abierto, y esto resultó en un aumento de 26% y 13% de biomasa seca de mijo para los dos nutrientes, respectivamente. El efecto neto de otros recursos (luz y agua) fue solo una reducción del 3% en el rendimiento de biomasa seca de mijo (Kho *et al* 2001). El trabajo de Mai Moussa (1996) también reveló que los elementos N, P, K, Mg, Ca y la materia orgánica estaban más concentrados, el pH más alto bajo *Hyphaene thebaica* que en la tierra descubierta. Como consecuencia, se registró un mejor rendimiento del mijo asociado debajo del árbol en relación con el patrón de fertilidad del suelo. Esto está en línea con los hallazgos de Moussa (1997) quien también informó un efecto positivo (2 a 2.5 veces) de esta especie en los

rendimientos de grano y hojarasca de mijo en las aldeas de Kareygorou y Say, en el suroeste de Níger. En el suroeste de Níger, Wezel et al. (2000) informaron que se encontraron concentraciones más altas de carbono orgánico (39%), nitrógeno (38%) y fósforo (51%) en algunas especies de arbustos (*Annona senegalensis*, *Combretum glutinosum*, *Guiera senegalensis* y *Piliostigma reticulatum*) en comparación con camp sin árboles donde no se practica la RNA. La presencia de biomasa foliar de *P. reticulatum* mejora la fertilidad del suelo con un mayor aporte de N y C, en comparación con los insumos orgánicos animales (Yélé mou et al. 2014). Kho y col. (2001) también informaron que, en Níger, la disponibilidad de N y P es más mayor de 200% y 30%, respectivamente, bajo *F. albida* que, en áreas abiertas, lo que resulta en que el rendimiento esperado de mijo se multiplica por 2.5 bajo el dosel de *F. albida*.

**El potencial de captura de carbono en los SAF del Sahel** es muy bajo en comparación con otras partes de África, debido a las duras condiciones ambientales (altas temperaturas y bajas precipitaciones) (Batjes 2001). En este sentido un estudio realizado por Hanan et al. (1998) midieron un incremento en la biomasa de aproximadamente 5 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en una sábana de barbecho en Níger. La mayoría de los estudios hasta la fecha se han centrado en cuantificar las reservas de carbono del suelo y las de la biomasa aérea. Autores como Takimoto et al. (2008b), Woomeer et al. (2004a), Liu et al. (2004), Tschakert (2004a), Woomeer et al. (2004b) que investigan las reservas de carbono en una diversidad de ecosistemas naturales y agrícolas en las regiones del Sahel. Takimoto et al. (2008b) investigó varios SAFs de la región de Ségou, en Mali, informando las existencias de carbono (incluidos los 40 cm superiores del suelo) de 70.8 Mg C ha<sup>-1</sup> en SAFs dominados por *Faidherbia albida* que era casi el doble cuando la especie dominante fue *Vitellaria paradoxa*. Woomeer y col. (2004a) determinaron las existencias de carbono en 16 tipos de SAFs a lo largo de un transecto a través de Senegal, e informaron las existencias de carbono de 11 a 112 Mg C ha<sup>-1</sup>, con los valores más bajos en tierras degradadas o cultivadas, seguidas de pastos, parcelas en barbecho y SAFs. Liu et al (2004) midieron también las reservas de carbono en diferentes tipos de ecosistemas en Senegal, y reportaron 31.8–52.1 Mg C ha<sup>-1</sup> para campos de cultivo, SAFs y barbechos con árboles. Lo mismo en el caso de los estudios realizados por Tschakert (2004a) que estimó las existencias totales de carbono de los SAFs de 28 Mg C ha<sup>-1</sup> en Peanut en Senegal, con 11 Mg C ha<sup>-1</sup> almacenados en los 20 cm superiores del suelo y 6.3 Mg C ha<sup>-1</sup> en los árboles. Encontró que los SAFs en

promedio contenían 9.3 Mg C ha<sup>-1</sup> más que los campos de cultivos. Woomer et al (2004b), investigaron las reservas de carbono en los SAFs a lo largo de un gradiente climático que cubre la transición del Sahel en Senegal. Con el aumento de la aridez, encontraron que la cantidad de carbono disminuyó de 31.9 Mg C ha<sup>-1</sup> a 19.4 Mg C ha<sup>-1</sup> en arbustos con árboles dispersos.

En el Sahel, muy pocos estudios se han centrado en los flujos de carbono en los ecosistemas y, en particular, en los secuestros anuales (Brümmer et al., 2008; Merbold et al., 2009; Ago et al., 2014; Quansah et al., 2015; Tagesson et al., 2015). Particularmente existen pocos datos sobre las existencias de carbono en los SAFs (Woomer et al., 2004a, b; Tschakert et al., 2004; Takimoto et al., 2008); lo cual limita la comprensión de la dinámica del carbono en las tecnologías agroforestales (Lufafa et al., 2008). Dada la importancia ecológica y socioeconómica de las especies agroforestales, el conocimiento de potencial de reservas de carbono es fundamental en el Sahel.

Al almacenar carbono en los tejidos y suelos de las plantas, los SAFs ayudan a reducir la concentración de GEI en la atmósfera (Schoeneberger, 2009). Además de su capacidad para aumentar la tasa de materia orgánica en el suelo y mejorar la calidad y fertilidad del suelo (Dupraz y Liagre, 2008), los SAFs tienen la doble ventaja de almacenar y secuestrar carbono al tiempo permiten producir cultivos anuales bajo la cubierta de árboles (Montagnini y Nair, 2004). Para los pequeños productores de los países del Sahel, además de los diversos productos y servicios que les ofrece, los SAFs podrían a través de su capacidad de almacenamiento y secuestro de carbono, permitir que ellos beneficien de las ventajas de los créditos de carbono (Janzen, 2006; Takimoto et al., 2008; Henry et al., 2009). De hecho, al vender créditos de carbono a los países industrializados, los pequeños productores sahelianos que practican la agroforestería podrían mejorar sus ingresos (Takimoto et al., 2008; Henry et al., 2009). Las tecnologías agroforestales juegan un papel socioeconómico importante y están en el centro del desarrollo rural del Sahel. Sin embargo, los datos locales o regionales sobre las existencias de carbono en estas tecnologías son escasos. La potencialidad de estas tecnologías para contribuir a las reservas de carbono incluso las especies leñosas que se encuentran dentro de los “parklands”, es poco conocido. Algunos autores han estimado las reservas de carbono en determinadas tecnologías agroforestales en el Sahel (Mali y Senegal) (Woomer et al., 2004; Tschakert et al., 2004; Liu et al., 2004, Takimoto et al., 2008). Sin embargo, pocos estudios han analizado las capacidades de

almacenamiento de especies leñosas que componen las tecnologías agroforestales. Hasta donde sabemos, no existen estudios que aborden tanto el almacenamiento de carbono de varias tecnologías agroforestales en varias texturas de suelo. Los autores Albrecht y Kandji (2003), Montagnini y Nair (2004) apuntan que, aunque los SAFs tienen poca cobertura arbórea se ha identificado como una de las estrategias más prometedoras para aumentar las reservas de carbono en tierras actualmente productivas sin comprometer la producción de alimentos y fibra. También se ha informado que la conversión de tierras agrícolas a agroforestales conlleva beneficios colaterales sustanciales para los agricultores, como una mayor fertilidad del suelo, resistencia a las condiciones climáticas extremas y fuentes adicionales de ingresos agrícolas (Ajayi et al. 2007; Garrity 2004). Se ha demostrado que los sistemas agrícolas basados en árboles en muchas partes del mundo tienen mayores reservas de carbono que los sistemas agrícolas sin árboles (Luedeling et al. 2011; Nair et al. 2009a, b) y brindan más servicios ambientales (Jose 2009). Por lo cual este mismo autor apunta que los mercados mundiales de carbono han abierto la posibilidad de pagos a los agricultores por su contribución a la mitigación del cambio climático.

En Níger en particular, las tecnologías agroforestales están en el centro del desarrollo rural. Por otro lado, tanto los datos locales como regionales sobre las existencias de carbono en estas tecnologías son escasos. Algunos autores han estimado las reservas de carbono en determinadas tecnologías agroforestales en Mali (Takimoto et al., 2008) y Senegal (Woomer et al., 2004; Tschakert et al., 2004; Liu et al., 2004). Sin embargo, pocos estudios han analizado las capacidades de almacenamiento de carbono en plantas leñosas que integran tecnologías agroforestales. No existen en nuestro conocimiento, estudios que abordan el almacenamiento de carbono de varias tecnologías agroforestales en Níger. A escala nacional, el contenido de carbono de los suelos se observa en el extremo suroeste del país con valores que oscilan entre 46-60 y 61-76 toneladas por hectárea. Estos suelos se encuentran en Parc W y a lo largo del río y sus afluentes. Los suelos con alto contenido de carbono se encuentran en la cuenca dallol de Maouri, en la parte Sur del país en el departamento de Gaya, región de Dosso. Los suelos con un contenido de carbono de entre 15 -29 y 30-45 toneladas por hectarea se encuentran en las cuencas de Dallol Bosso. Estos suelos se ubican en el valle del río Níger, alrededor de los macizos del Aïr y Djado, el valle de Irazher, Ader Douchi

Maggia, los Koromas y la Cuenca Komadougou Yobe alrededor del lago Chad. Para el resto del país el contenido de carbono es de 0 a 14 toneladas por hectárea.

**En cuanto a la contribución antropogénica al greening**, varios trabajos han destacado el papel de la acción humana a través de la dinámica espacial de las ocupaciones de la tierra. Así, en todo el Sahel, el cambio en el uso del suelo se traduce por la recuperación de la biomasa arbórea. Este fenómeno se observó después de los años 70 y 80, tiempos que han sido los más secos. Es el caso de la región Dori en el Norte de Burkina Faso (Rasmussen *et al.*, 2001); la parte Este de Níger (Larwanou *et al.*, 2006) donde la recuperación de la vegetación está vinculada a la acción humana, en particular la práctica de la Regeneración Natural Asistida (Reij *et al.*, 2005). La RNA también ha obtenido resultados sorprendentes como en el caso de Talensi, al norte de Gana (Samuel y Joshua, 2019).

En Níger algunos estudios han abordado el papel de las intervenciones humanas en la dinámica de los árboles (Larwanou y Saadou, 2012). Otros han evaluado el reverdecimiento en las regiones de Níger (Dramé y Berti, 2008, Sendzimir *et al.*, 2011). La presión antropogénica ha sido mencionada también por Larwanou *et al.* (2010) quienes afirman la exitosa restauración de la vegetación en la franja Sur de Níger. En este sentido Bagnian y sus colaboradores (2013) afirman que el conocimiento local y el saber hacer de los productores se han regenerado más de 200 millones de árboles en veinte años.

Muchos estudios se centraron en la región de Maradi y Zinder porque son las partes con la historia más larga de la práctica de RNA en Níger. Estos estudios señalan que el patrón más interesante de la RNA se encuentra en el sur de las regiones de Zinder y Maradi. En este sentido el estudio de Larwanou y sus colaboradores (2006) ha demostrado que la cubierta arbórea-arbustiva aumentó de 0.6% en 1975 a 16.5%. Este estudio mostró que la RNA por los agricultores es una práctica generalizada en esta región (Larwanou *et al.*, 2006). Otros estudios realizados por Moustapha y Salissou, (2004) en la región de Zinder mostraron altas densidades del orden de 60 a más de 100 individuos por hectárea. El proyecto piloto integral de Keita ubicada en la misma zona apunta el éxito de la RNA (Reij *et al.* 2009; Pender *et al.* 2009). Haglund, *et al.*; 2009 confirman que en 2008 solo en la región de Maradi, se estimó 62,000 familias de agricultores practican la técnica RNA, lo cual contribuyen de 900,000 a 1,000,000 de árboles nuevos al entorno local. Esta práctica ha tenido impactos positivos se estimó a 3

millones de hectáreas de tierra que han sido reforestadas desde principios de los años ochenta en el país, en gran parte como resultado de la plantación comunitaria de árboles y la RNA de los árboles y arbustos (Adam *et al.* 2006, Tappan, 2007). Más estudios detallados sobre la RNA en el 2009 mostraron una escala de 5 millones de hectáreas con una densidad de árboles por hectárea que varía de 20 a 120 individuos (Reij *et al.*, 2009, Botoni *et al.*, 2010). Según Reij, C. (2013) la RNA realizada por los agricultores es un proceso de protección y gestión de los árboles que se regeneran naturalmente en las tierras en vez de ser talados. Se calcula que los agricultores han sembrado unos 200 millones de árboles en sus fincas durante los últimos 20 años revirtiendo de este modo la desertificación. Esta práctica de RNA contribuyó a lo que se conoce como el “regreening” del Sahel (Sendzimir *et al.* 2011; Anyamba *et al.* 2014). En este sentido Rinaudo y Yao (2009) afirman que la RNA en el Sur de Níger ha sido descrito como " un éxito en el campo de la agricultura y del cambio climático" y además “la mayor transformación del medio ambiente en África”. Esta restauración contribuyó a mitigar el cambio climático con el secuestro de carbono según estos autores.



## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO**

### **5.1) Conclusiones**

La aprobación científica sobre la captura de carbono considera como una de las principales opciones para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. La secuestro de CO<sub>2</sub> de los Sistemas Agroforestales juegan un papel significativo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, aunque quedan muchas cuestiones por resolver antes de que estas técnicas agroforestales se extiendan a gran escala. Entre ellas se pueden citar el potencial de transferencia y de difusión de las técnicas de captura de CO<sub>2</sub>, las oportunidades que tienen los países en vías de desarrollo a la hora de explotarlas son cuestiones que están sobre la mesa del dialogo.

Este estudio muestra la importancia de cuantificar el carbono en Sistemas AgroForestales en el Sahel y en particular en Níger. Durante el periodo seco en los sistemas agroforestales los resultados muestran que el componente arbustivo es el más dominante. Estos resultados constituyen una línea de partida de nuevos estudios de captura de carbono y contribuirán a los proyectos enfocados sobre la Regeneración Natural Asistida basados en carbono en la zona de estudio.

Ahora bien, se requieren más estudios en el Sahel para analizar el “regreening” de la cobertura vegetal, así como para evaluar el potencial de almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales. Es necesario que los países del Sahel creen un marco legal y reglamentario adecuado para poder acceder a los fondos de captura de carbono. Entre otros la creación de los mecanismos para la implementación de pago de servicio ambiental de carbono, asimismo, crear condiciones organizativas, técnicas y económica para que los agricultores participen en la venta de carbono en el mercado internacional a gran escala, de esta manera mejorar sus condiciones socioeconómicas.

### **5.2) Futuras líneas de trabajo**

A medida que avanza la tesis van surgiendo líneas de investigación que se han ido perfilando. Las que permitirán comprender mejor algunos de los resultados obtenidos en este trabajo. Se identifican posibles dos líneas de continuación del presente trabajo realizado en función de los objetivos de la tesis doctoral.

Una de las líneas de trabajo que ha aparecido muy interesante durante la elaboración de la tesis está relacionada con los nuevos satélites que permiten estudios sobre la relación entre el “regreening” y las precipitaciones.

La segunda es analizar la implementación de mercados de carbono desde un enfoque participativo y además poner impuesto sobre las emisiones de gases de efecto invernadero de las empresas que contaminan. Se puede poner en marcha esta segunda idea a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) como un instrumento innovador basado en el comercio de carbono. Este mecanismo permite a los países industrializados que se han comprometido a reducir su emisión de gases efecto invernadero a implementar proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio que reduzcan las emisiones de gases en los territorios de los países en vías de desarrollo.

En África existe un enorme potencial para el desarrollo de estos proyectos, pero se requiere un mayor soporte en actividades de promoción, capacitación, formulación de metodologías e identificación y financiamiento de proyectos factibles. En particular los países de la región del Sahel han mostrado un gran interés en potenciar este sector y hacer todos los esfuerzos posibles para generar el mayor número de proyectos, por el impacto que podrían tener en la reducción de pobreza, el incentivo a la inversión y el control de la deforestación.

Para países en vías de desarrollo como Níger en el centro del Sahel, el MDL podría ser un instrumento importante en la movilización de capital y la transferencia de tecnología para promover sistemas forestales sostenibles. El MDL podría también ofrecer incentivos para abandonar un modelo energético nacional altamente dependiente de los combustibles fósiles. Níger es un beneficiario potencial de proyectos de forestación del MDL los cuales contribuirán al desarrollo sostenible y a la mitigación del cambio climático. Sus ventajas principales son: disponibilidad de tierras con altas tasas potenciales de crecimiento arbóreo y personal especializado en el sector forestal.

Para que el mercado tenga un verdadero impacto sobre la reducción de GEI emitidos en el país, es necesario que participen las empresas que más contaminan por ejemplo algunas empresas grandes como la extractora de uranio Areva de origen francés controla sociedades como: Akouta, Somair, Cominak, Anou-Araren y Sonichar y en el caso de petróleo el gobierno de Níger concedió el bloque Agadem de la región de Diffa a la China National Petroleum Company, además la construcción de una refinería del norte de la región de Zinder A estos si se añada las empresas públicas y otras pequeñas empresas privadas Níger puede fomentar un mercado de carbono a través de proyectos MDL forestales. En este caso Níger como país no industrializado, además de

contribuir a mitigar el cambio climático, los proyectos MDL forestales tienen muchos beneficios ambientales, económicos, sociales, e institucionales al nivel del proyecto de las comunidades locales. Estos beneficios incluyen mejoramiento de los modos de vida locales, diversificación de economías, mejoramiento de la fertilidad de los suelos, reducción de la erosión de los suelos, incremento de la biodiversidad local, y mejora de fuentes de agua. Los beneficios son un incentivo importante para la participación local en proyectos de carbono. Sin embargo, canalizar beneficios de este mercado hacia proyectos con múltiples actores todavía requiere fortalecer capacidades técnicas y de gestión del recurso y de proyectos. Por otro lado, los proyectos forestales son todavía mucho menos abundantes; enfrentan barreras que han limitado su participación a un escaso 1% del número total de proyectos. Estas barreras son de dos tipos: las tradicionales del sector forestal, como naturales (crecimiento lento de los árboles), financieras, institucionales y de capacidades; y las relacionadas con la reducción de emisiones, como regulatorias, de mercado, técnicas y de capacidades. Afortunadamente las técnicas han sido en su mayoría superadas y las regulatorias y de mercado tienden a disminuir con el aumento de consciencia de los compradores de reducciones de emisiones sobre el potencial de los proyectos forestales de impactar el desarrollo sostenible.

A diferencia del mercado de emisiones, la aplicación de un impuesto sobre las emisiones no requeriría de un límite a éstas. En vez de poner un límite a las emisiones, el impuesto busca cobrar cada unidad de GEI emitida, en este caso una tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente. Por cada tonelada emitida la empresa debe pagar un impuesto al gobierno, el cual puede utilizar el dinero a su discreción. Las empresas, por lo tanto, buscarán reducir sus emisiones con el propósito de pagar menos impuestos sobre sus emisiones. El dinero recaudado por el gobierno a partir de dicho impuesto puede ser utilizado para financiar programas que buscan combatir el cambio climático. A demás de ser utilizado para estos programas, podría financiar un gobierno cuando éste se encuentra endeudado. En este sentido un impuesto sobre las emisiones sería beneficioso principalmente para el gobierno, ya que es el que se encarga de recaudarlo. El gobierno, sin embargo, no sería el único beneficiado de un sistema impositivo sobre las emisiones. El impuesto sobre las emisiones crearía un incentivo para que las empresas dediquen una mayor cantidad de sus recursos para encontrar maneras de reducir el costo de abatimiento de sus emisiones.

A pesar de crear un incentivo similar al del mercado de emisiones, un impuesto tiene la gran desventaja de no contar con un límite sobre las emisiones. Esto podría ser ventajoso para el gobierno nigerino puesto que actualmente no cuenta con un límite obligatorio para sus emisiones de GEI, el cual sería necesario para implementar un mercado de emisiones. Sin embargo, sin un límite a las emisiones las empresas podrán seguir aumentando sus emisiones de GEI si están dispuestas a pagar un impuesto sobre ellas.

La implementación de un impuesto sobre las emisiones en Níger podría resultar atractiva por no requerir de un límite a la cantidad de GEI emitidas, el cual actualmente no existe en nuestro país. Sin embargo, las desventajas que presenta frente al mercado de emisiones sobrepasan sus virtudes. Sin un límite a las emisiones totales como ocurre en el mercado las empresas podrán seguir aumentando su contaminación si están dispuestas a pagar el impuesto.

Ante tal situación es preferible que Níger busque crear un mercado de emisiones en vez de implementar un impuesto sobre éstas. A pesar de no contar con un límite sobre las emisiones del país, sería más beneficioso que el gobierno busque crear dicho límite para la implementación de un mercado que imponer un impuesto que pocos pagarían.



## BIBLIOGRAFÍA

**Aaheim, A.; Chaturvedi, R. K.; Sagadevan, A. D. 2011:** Integrated modelling approaches to analysis of climate change impacts on forest and forest management. *Mitig Adapt Strategy Glob Change*. 16:247-266.

**Akpo LE, Banoin M, Grouzis M. 2003.** Effet de l'arbre sur la production et la qualité fourragères de la végétation herbacée: Bilan pastoral en milieu sahélien. *Méd. Vét.*, 154(10): 619-628.

**Abasse, T., Guero, C., Rinaudo, T., 2009.** Community mobilisation for improved livelihoods through tree crop management in Niger. *Geojournal* 74, 377e389

**Abbasi Mk, R. G. (2005).** Effects of different land-use types on soil quality in the hilly area of Rawalakot Azad Jammu and Kashmir. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B- Soil and Plant Science*, 55(3), 221-228.

**Abule, E., Smit, G.N., Snyman, H.A., 2005.** The influence of woody plants and livestock grazing on grass species composition, yield and soil nutrients in the Middle Awash Valley of Ethiopia. *J. Arid Environ.* 60, 343–358.

**Ackerley, D., Booth, B. B. B., Knight, S. H. E., Highwood, E. J., Frame, D. J., Allen, M. R., Rowell, D. P. (2011).** Sensitivity of Twentieth-Century Sahel Rainfall to Sulfate Aerosol and CO<sub>2</sub> Forcing. *Journal of Climate*, 24(19), 4999–5014.

**Acosta, M. M.; Vargas, H. J.; Velázquez, M. A. y Etchevers, B. J. D. 2002.** Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36(6):725-736.

**Adam T., Reij C., Abdoulaye T., Larwanou M., Tappan G. et Yamba B., 2006.** Impacts des investissements dans la gestion des ressources naturelles (GRB) au Niger : Rapport de synthèse. Étude sahélienne, Centre Régional d'Enseignement Spécialisé en Agriculture (CRESA), Niamey – Niger. 54 p.

**Adam, T., Abdoulaye, T., Larwanou, M., Yamba, B., Reij, C. and Tappan, G. 2006.** Plus de gens, plus d'arbres: la transformation des systèmes de production au Niger et les impacts des investissements dans la gestion des ressources naturelles. Rapport de Synthèse Etude Sahel Niger. Comité Permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) et Université de Niamey, Niamey, 2006.

**Abdourahmane MS. 2009.** Développement durable et impacts des politiques publiques de gestion de la vallée du fleuve Sénégal : du régional au local. *VertigO - la Revue Electronique en Sciences de l'Environnement*, 9(3) : 21.

**Adam, T., Reij, C., Abdoulaye, T., Larwanou, M., & Tappan, G. (2006).** *Impacts des Investissements dans la Gestion des Ressources Naturelles (GRN) au Niger: Rapport de Synthèse*. Niamey, Niger: Centre Régional d'Enseignement Spécialisé en Agriculture.

**Adam, T., Reij, C., Abdoulaye, T., Larwanou, M., Tappan, G., 2006.** Impacts des Investissements dans la Gestion des Ressources Naturelles (GRN) au Niger: Rapport de Synthèse. Centre Régional d'Enseignement Spécialisé en Agriculture (CRESA). Niger, Niamey.

Adebayo, K., Dauda, T.O., Rikko, L.S., George, F.O.A., Fashola, O.S., Atungwu, J.T., Osuntade, O.B. (2011) *Emerging and Indigenous Technology for Climate Change Adaptation in Southwest Nigeria*, **Nairobi, Kenya: African Technology Policy Studies**

**Adeel, Z. (2005).** Ecosystems and human well being desertification synthesis a report of the Millennium Ecosystem

**AfDB. 2003.** Study on the role of forestry in poverty alleviation. Report. November 2003. African Development Bank. África infomarket. Disponible en: <http://www.africainfomarket.org/paises/niger>.

**Agencia Espacial Europea. (2014).** Los Índices de Vegetación [Informativa]. Retrieved August 2, 2015, from

**Agency for Technical Cooperation and Development (ACTED). (2012).** Flooding in Niger: Stopping history repeating itself. Retrieved from <http://www.acted.org/en/flooding-nigerstopping-history-repeating-itself>

**Ago E.E. (2014).** Long term observations of carbon dioxide exchange over cultivated savanna under a Sudanian climate in Benin (West Africa). *Agric. For. Meteorol.*, 197, 13-25.

**Aguirre S., C.A., Valdez L., J.R., Ángeles P., G., De Los Santos P., H.M., Haapanen, R. y Aguirre S., A.I. 2009:** Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de *Pinus Patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia*. 43 (2):209-220.

**Ajayi OC, Akinnifesi FK, Sileshi G, Chakeredza S (2007)** Adoption of renewable soil fertility replenishment technologies in the southern African region: lessons learnt and the way forward. *Nat Resour Forum*

**Akinnifesi FK, Ajayi OC, Sileshi G, Chirwa P. W. and Chianu J (2010).** Fertiliser trees for sustainable food security in the maize-based production systems of East and Southern Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 615-619.

**Akinnifesi FK, Makumba W, Sileshi G, Ajayi OC and Mweta D (2007)** Synergistic effect of inorganic N and P fertilizers and organic inputs from *Gliricidia sepium* on productivity of intercropped maize in Southern Malawi. *Plant and Soil* 294: 203-217.

**Albrecht A, Kandji ST (2003)** Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agric Ecosyst Environ* 99:15–27

**ALBRECHT, A. & KANDJI, S. T. 2003.** Review: Carbon sequestration in tropical agroforestry systems.

**Alegre J., Arévalo L., Ricse A., Barbaran J. & Palm C. 2001.** Reservas de carbono y emisión de gases con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía peruana. *Symposium Internacional de Agroforestería*. Manaus, Brasil EMBRAPA. 15 p

**Alegre, J; Ricse, A. 2000.** Reservas de carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía peruana (en línea).s.f. Disponible en: <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia2/vbconfe7.htm>.

**Ali, A., Lebel, T., 2009.** The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology* 29, 1705e1714.

**Altieri, M.A., Toledo, V.M. (2011):** e agroecological revolution in Latin America: rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies*, 38(3): 587-612

**Alvarez, E. y Marin, M.A.(2011)** Manual de procedimientos analíticos para suelos y plantas. Mexico : Universidad Autonoma de Chapingo.

**Ambouta, J.-M.-K., 1984.** Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'Ouest Nigérien. Doctor-Engineer Thesis, University of Nancy, France, 116 p.

American Scientist. Carbon Dioxide and the Climate. Recuperado de <https://www.americanscientist.org/article/carbon-dioxide-and-the-climate>

**Anaya, J.A; Chuvieco, E y Palacios, A. (2008).** Estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS. *Revista de Teledetección*. ISSN: 1988-8740. 2008. 30: 5-22.

- Anderson, J., Bryceson, D., Campbell, B., Chitundu, D., Clarke J., Drinkwater M., Fakir S, Frost P.G.H., Gambiza, J., Grundy, I., Hagmann J., Jones B., Jones G.W., Kowero, G., Luckert, M., Mortimore, M., Phiri Aaron K., Potgieter, P., Shackleton, S., Williams, T. (2004).** Chance, Change and Choice in African Drylands: A New Perspective on Policy Priorities. Participants of the Workshop on Development Assistance in the African Drylands, Durban, 2003.
- Andrade, H; Ibrahim, M. 2003.** ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas* 10(39-40): 109-116.
- Anyamba A. et Tucker C.J. 2005:** Analysis of sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003 In : *Journal of Arid Environment* 63 (2005) 596-614p
- Anyamba, A., Small, J. L., Tucker, C. J., & Pak, E. W. (2014).** Thirty-two years of Sahelian Zone growing season non-stationary NDVI3g patterns and trends. *Remote Sensing*, 6, 3101–3122.
- Arbonier, M. 2000.** Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d’Afrique de l’Ouest, CIRAD, MNHN, UICN, 539 pages.
- Arbonnier M., 2009.** Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d’Afrique de l’Ouest. 3e ed. Versailles, QUAE, 572 p.
- Arévalo, C. (2015).** *Medición de Carbono del estrato arbóreo en un área del bosque natural Tinajillas- limón Indanza.* Cuenca: UPS
- Asare, A., Wade, S.A., Ofori-Frimpong, K., Hadley, P. and Norris, K. (2008) *Carbon Storage and the Health of Cocoa Agroforestry Ecosystems in South Eastern Ghana, presented at the Open Science Conference on Africa and Carbon cycle, 25-27 November, Accra, Ghana: The Carbo Africa Project*  
Assessment. Washington, DC: World Resources Institute.
- Assogbadjo, A.E., Glèlè Kakaï, R., Vodouhê, F.G., Djagoun, C.A.M.S., Codjia, J.T.C.,  
**Atia Iseli, J., dir. 2010.** Restoration of soil fertility through agroforestry technologies and innovations. Food for Progress Info N°005, Junio. World Agroforestry Centre.
- Auckland, L., P. Moura Costa, S. Bass, S. Huq, N. LandellMills, R. Tipper y R. Carr 2002.** Laying the Foundations for Clean Development: Preparing the Land Use Sector. A quick guide to the Clean Development Mechanism. IIED, Londres.
- Avalos-Gómez, M. 2004.** Panel Inergubernamental sobre el Cambio Climático.

- Avendaño, H. D. M.; Acosta, M. M.; Carrillo, A. F. y Etchevers, J. J. D. 2009.** Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotec. Mex.* 32(3):233-238.
- Awaïss, A., 2000.** Gestion des forêts et des arbres au niveau des terroirs dans la Région de Maradi. In: *Drylands Research Working Paper*, v. 31. Drylands Research, Crewkerne, UK.
- Aviles, P., Araneda, F., Duarte, E., Szejner, M. y Vergara, L. (2015).** *Mapa de Cobertura Forestal y Uso de la Tierra de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá.* Panamá.
- Bae K, Lee D, Fahey T, Woo S, Quaye A, Lee Y-K (2013)** Seasonal variation of soil respiration rates in a secondary forest and agroforestry systems. *Agrofor Syst* 87:131–139
- Ballesteros Martín, M. A. (2015).** Análisis geopolítico del Sahel. En: Ministerio de Defensa, Instituto Español de Estudios Estratégicos. *Sahel 2015, origen de desafíos y oportunidades. Cuaderno de Estrategia* 176, p. 11.
- Barranco G., J. L. 2002.** Captura de carbono retrospectivo, actual y potencial en el área natural protegida estatal Nahuatlaca-Matlazinca en el Estado de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 113p.
- Bégué A, Vintrou E, Ruelland D, Claden M, Dessay N, 2011.** Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. *Global Environmental Change* 21: 413-420.
- Bagnian I, Mohamadou A, Adamou MM, Lawali S, Adam T, Enfors E, Larwanou M, Tougiani A. 2012.** Perceptions paysannes des tendances du reverdissement des zones dégradées au Niger. Université de Maradi. *Journal des Sciences de l'Environnement*, 1(1): 43-52.
- Bagnian I, Adamou MM., Toudou A, Mahamane A. 2013.** Impact du mode de gestion de la Régénération Naturelle Assistée des ligneux (RNA) sur la résilience des écosystèmes dans le centresud du Niger. *Journal of Applied Biosciences*, 71: 5742– 5752.
- Barros, V. (2005).** El cambio climático global ¿Cuántas catástrofes antes de actuar? (2ª ed.) Buenos Aires: libros del zorzal. - 4º Congreso Nacional (2007). La ciencia en las primeras etapas de la educación. Madrid: Ministerio de Educación.

Recuperado <http://www.csicenlaescuela.csic.es/pdf/congresos/PONENCIAS%20IV%20CONGRESO.pdf>

**Bassirou Belem, Blandine Marie Ivette Nacoulma, Roland Gbangou, Sié Kambou, Hanne Helene Hansen, Quentin Gausset, Søren Lund, Anders Raebild, Djingdia Lompo1, Moussa Ouedraogo, Ida Theilade, Issaka Joseph Boussim. 2007.** The Journal of Transdisciplinary Environmental Studies, ISSN 1602-2297. <http://www.journal-tes.dk/>

**Batjes NH (2001)** Options for increasing carbon sequestration in west African soils: an exploratory study with special focus on senegal. *Land Degrad Dev* 12:131–142

**Bautista, H.J. y J.A.P. Torres. 2003:** Valoración económica del almacenamiento de carbono del bosque tropical del ejido Noh Bec, Quintana roo, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* 9 (1): 69-75

**Bayala J, Sileshi GW, Coe R, Kalinganire A, Tchoundjeu Z, Sinclair F, Garrity D. 2012.** Cereal yield response to conservation agriculture practices in drylands of West Africa: A quantitative synthesis. *J Arid Environ.* 78:13–25.

**Bayala, J., Balesdent, J., Marol, C., Zapata, F., Teklehaimanot, Z., Ouedraogo, S., 2006.** Relative contribution of trees and crops to soil carbon content in a parkland system in Burkina Faso using variations in natural <sup>13</sup>C abundance. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 76,193–201.

**Bayala, J., Sanou, J., Teklehaimanot, Z., Kalinganire, A., Ouédraogo, S.J., 2014.** Parklands for buffering climate risk and sustaining agricultural production in the Sahel of West Africa. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 6, 28–34.

**Beck, H. E., McVicar, T. R., van Dijk, A. I. J. M., Schellekens, J., de Jeu, R. a. M., Bruijnzeel, L. A. (2011).** Global evaluation of four AVHRR–NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2547–2563.

**Beer J., Ibrahim M., Somarriba E., Barrance A. & Leakey R. 2004.** Establecimiento y manejo de árboles en sistemas agroforestales. *Árboles de Centroamérica.* OFICATIE. 46 p.

**Beer, J; Harvey, C; Ibrahim, M, Harmand, JM; Somarriba, E; Jiménez, F. 2003.** Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37-38): 80-87.

**Bégué, A., Vintrou, E., Ruelland, D., Claden, M., Dessay, N. (2011).** Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. *Special Issue on The Politics and Policy of Carbon Capture and Storage*, 21(2), 413–420.

**Bengaly S. 2008.** Etude sur les savoirs local et moderne en matière de gestion de la fertilité du sol: cas du village de Samine, région de Ségou. Mémoire de fin d'études d'Ingénieur de l'Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée IPR /IFRA de Katibougou, Mali, 57 p

**Biasutti, M. (2013).** Forced Sahel rainfall trends in the CMIP5 archive. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4), 1613–1623.

**Biasutti, M., Giannini, A. (2006).** Robust Sahel drying in response to late 20th century forcings. *Geophysical Research Letters*, 33(11), L11706.

**Biasutti, M., Held, I. M., Sobel, a. H., Giannini, a. (2008).** SST Forcings and Sahel Rainfall Variability in Simulations of the Twentieth and Twenty-First Centuries. *Journal of Climate*, 21(14), 3471–3486.

**BIODAMAZ (Proyecto Diversidad Biológica de la Amazonía Peruana, PE). 2004.** Manual para la elaboración de mosaicos de imágenes de satélite Landsat TM para selva baja peruana. Iquitos, PE. 120 p.

**Birdsey, R.A., R. Alig, and D. Adams. 2000:** Mitigation activities in the forest sector to reduce emissions and enhance sinks of greenhouse gases. In: *The Impact of Climate Change on America's Forests: A Technical Document Supporting the 2000 USDA Forest Service RPA Assessment* [Joyce, L.A. and R.A. Birdsey (eds.)]. RMRS-GTR-59, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO, pp. 112-131.

**Bishop, J. y Landell-Mills, N. 2003.** Los servicios ambientales de los bosques: información general. In: *la venta de servicios ambientales forestales*. Pagiola, S.; Bishop, J. y Landell-Mills, N. (Eds.). Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D. F. 43-76 p

**Black, C.A.(1965)** (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* Agronomy Series no.9, ASA, Madison, Wis.

Blackie R., Baldauf C., Gautier D., Gumbo D., Kassa H., Par-Thasarathy N., Paumgarten F., Sola P., Pulla S., Waeber P., Sunderland T., 2014. *Tropical dry forests: The state of global knowledge and recommendations for future re- search.* Discussion Paper. Bogor, Indonesia: CIFOR. 32.

- Boffa J.M., Taonda S.J.B., Dickey J.B., Knudson D.M. 2000.** Field-scale influence of karité (*Vitellaria paradoxa*) on sorghum production in the Sudan zone of Burkina Faso. *Agroforestry Systems* 49: 153-175.
- Boffa, J.-M. 2000b.** Les parcs agroforestiers en Afrique de l'Ouest. Cahier FAO Conservation 34. Italie, Rome. 258 p.
- Boffa, J.-M. 2000a.** Les parcs agroforestiers en Afrique de l'Ouest: clés de la conservation et d'une gestion durable. *Unasylva*, 51: 11-17
- Botoni, E., Reij C. 2009.** La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes de production au Sahel: Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles. Ouagadougou, Burkina Faso et Amsterdam, The Netherlands: Comité Permanent Inter Etats pour la Lutte contre la Sécheresse au Sahel and Vrije Universiteit Amsterdam, 61 p.
- Botoni E, Larwanou M, Reij C. 2010.** La régénération naturelle assistée (RNA) : une opportunité pour reverdir le Sahel et réduire la vulnérabilité des populations rurales. Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte : Concepts et mise en œuvre [en ligne]. Marseille :
- Bowen, G.A. (2005).** Preparing a qualitative research-based dissertation: Lessons learned. *The Qualitative Report*, 10(2), 208-222.
- BREIMAN, J. (2001):** «Random Forest». *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Breiman, Leo. 2001** citado por ARNILLAS, C.A; et al. 2012). «Random Forests». *Machine Learning* 45 (1): 5–32. doi: 10. 1023/A: 1010933404324.
- Bright MBH, Diedhiou I, Bayala R, Assigbetse K, Chapuis-Lardy L, Ndour Y, Dick RP. 2017.** Long-term *Piliostigma reticulatum* intercropping in the Sahel: crop productivity, carbon sequestration, nutrient cycling and soil quality. *Agric Ecosyst Environ.* 242:9–22.
- Brooks, N. (2004).** *Drought in the African Sahel: Long term perspectives and future prospects* (No. Working Paper. 61). *Tydall Centre for Climate Change Research* (Vol. Working pa). <http://www.nickbrooks.org/publications/TynWP61.pdf>
- Brown DR, Dettmann P, Rinaudo T, Tefera H, Tofu A (2011)** Poverty alleviation and environmental restoration using the clean development mechanism: a case study from Humbo, Ethiopia. *Environ Manag* 48:322–333. doi:10.1007/s00267-010-9590-3
- Brown S (1997)** Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO Forestry paper 134, Rome, 55 p.

- Brown, M. E., Pinzon, J. E., Didan, K., Morisette, J. T., Tucker, C. J. (2006).** Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(7), 1787–1793.
- Brown, S.; Sathaye, J.; Cannel, M. y Kauppi. P.E. 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forestry Review* 75.
- Brady, N.C. and Weil, R.R. (2004).** Elements of the Nature and Properties of Soils, 2/E. Ed. Pearson Prentice Hall, N.J.
- Brümmer C. (2008).** Diurnal, seasonal and interannual variation in carbon dioxide and energy exchange in shrub savanna in Burkina Faso (West Africa). *J. Geophys. Res.*, 113, G02030.
- Buchmann, C., Prehler, S., Hartl, A., Vogl, C., 2010.** The importance of Baobab (*Adansonia digitata* L.) in rural West African subsistence—suggestion of a cautionary approach to international market export of Baobab fruits. *Ecol. Food Nutr.* 49, 145–172.
- Bull, G., Harkin, Z., y Wong, A. 2006.** El desarrollo de mercados para el carbono forestal en la Columbia Británica, Canadá. In: La venta de servicios ambientales forestales. Pagiola S.; Bishop J. y Landell-Mills N. (eds.). Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D. F. 337-366 p.
- Callo C., D. A. 2001.** Cuantificación de carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos ecológicos de la amazonia del Perú. Tesis Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo Méx. 72 p.
- Campa, C., Diouf, D., Ndoye, I., Dreyfus, B., 2000.** Differences in nitrogen metabolism of *Faidherbia albida* and other N -fixing tropical woody acacias reflect habitat water availability. *New Phytol.* 147, 571–578.
- Carreira, D. (2011).** Cuantificación de la Materia Orgánica del suelo. Método de WALKLEY & BLACK.
- Cancino, J. 2006.** Dendrometría básica. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de manejo de bosques y medio ambiente. 171pp.
- Carrillo, A. F; Acosta, M. M.; Flores, A. E.; Juárez, B. J. E. y Bonilla, P. E. 2014.** Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en la Sierra Nevada, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5(5):779-793.
- case studies from the Alternatives to Slash-and-Burn Program (ASB).

**Chave J., Andalo,C., Brown,S., Cairns, A., Chambers, J.Q., Eamus, Folster, H., Fromard,F., Higuchi, N.,Kira,T., Lescure,JP., Nelson, B.WW.,Ogawa, H.,Puig, H., Riera,B.&Yamakura, T. 2005.** Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forest *oecologia* 145:87-9

Chidumayo, E.N. 2004. Key external underlying threats to dry forests of sub-Saharan Africa: A case study of urbanization and climate change. An unpublished report for CIFOR. Lusaka, Zambia. 43 pp.

Christensen, S., and J. Goudriaan. 1993. Deriving Light Interception and Biomass from Spectral Reflection ratio. *Remote Sensing Environment* 48: pp. 87-95

**Chuvienco, E. 1998.** El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección* N° 10. 1-9.

**Chuvienco, E. 2002.** Fundamentos de Teledetección Espacial. Tercera Edición. Ediciones Rialp S. A. Madrid, España. 568 p.

**Chuvienco Salinero, E. (2008).** Teledetección ambiental la observación de la tierra desde el espacio. Ariel. Retrieved from [https://books.google.co.cr/books?id=aKsNXCVcTcQC&pg=PA24&hl=es&source=gbs\\_selected\\_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.cr/books?id=aKsNXCVcTcQC&pg=PA24&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false)

**Cieza T, DA. 2017.** Análisis de cambios de cobertura y uso de la tierra con imágenes satelitales del distrito de Matara periodos 1991 – 2003 – 2016. Cajamarca, Perú. Título Ing. Agr. Universidad Nacional de Cajamarca. 99 p.

**Cifuentes Jara, M. 2010.** ABC del cambio climático en Mesoamérica. Serie Técnica. Informe Técnico del CATIE No. 383. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 71p.

**CILSS (2016).** Les Paysages de l'Afrique de l'Ouest : Une Fenêtre sur un Monde en Pleine Évolution. U.S. Geological Survey EROS, 47914 252nd St, Garretson, SD 57030, UNITED STATES.

**CILSS. (2012).** Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel. Retrieved from <http://www.cilss.bf/>

**Colque P., M. y Sánchez C., V. E. 2007.** Los Gases de Efecto Invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global? Asociación Civil Labor / Amigos de la Tierra.

**Comité Permanent Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel [CILSS], 2016,** Landscapes of West Africa—A window on a changing world: Ouagadougou, Burkina Faso, CILSS, 219 p. [Also available at <https://eros.usgs.gov/westafrica>].

**CONAF, 2002.** Monitoreo y actualización catastro de uso del suelo y vegetación, Quinta Región. 12 p.

- Concha J.Y., Alegre J.C. & Pocomucha V. 2007.** Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. En el Departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*. 6(1,2): 75-82.
- Cook, B., Pau, S. (2013).** A Global Assessment of Long-Term Greening and Browning Trends in Pasture Lands Using the GIMMS LAI3g Dataset. *Remote Sensing*, 5(5), 2492–2512.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Lambin, E. (2004).** Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *Int. Journal of Remote Sensing*, 25:1565–1596.
- Cramer, M.D., Bond, W.J., 2013.** N-fertilization does not alleviate grass competition induced reduction of growth of African savanna species. *Plant Soil* 366, 563–574.
- Cruz, L., I.A. 2008:** Modelado espacial de los recursos forestales en el Ejido de Atopixco, Estado de Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Postgrado Forestal. 116 pp.
- Cerda, J; Villarroel, L. 2008.** Evaluación de la Concordancia Inter-observador en Investigación Pediátrica: Coeficiente de Kappa. Chile. 54 - 58p.
- D' Oliveira, M. V. N., Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J., & Andersen, H.-E. (2012).** Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 124, 479–491. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.014>
- Dai, A., Lamb, P. J., Trenberth, K. E., Hulme, M., Jones, P. D., Xie, P. (2004).** The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*, 24(11), 1323–1331.
- Dan Guimbo, I., Baragé, M. & Douma S. (2012).** Etudes préliminaires sur l'utilisation alimentaire des plantes spontanées dans les zones périphériques du parc W du Niger. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 6(6): 4007-4017.
- DARDEL C., KERGOAT L., HIERNAUX P., GRIPPA M., MOUGIN E., CIAIS P., NGUYEN C.C., 2014,** Rain-Use-Efficiency: What it Tells us about the Conflicting Sahel Greening and Sahelian Paradox. *Remote Sens.* 2014, 6, 3446-3474.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Grippa, M., Mougin, E., Ciais, P., Nguyen, C.-C. (2014a).** Rain-Use-Efficiency: What it Tells us about the Conflicting Sahel Greening and Sahelian Paradox. *Remote Sensing*, 6(4), 3446–3474.

- Dramé Y, Berti F. 2008.** Les enjeux socioéconomiques autour de l'agroforesterie villageoise à Aguié (Niger). *Tropicicultura*, 26(3): 141-149.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., Tucker, C. J. (2014b).** Regreening Sahel: 30years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*, 140, 350–364.
- Dauber, E., Terán, J., & Guzmán, R. (2000).** Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1-10.
- De Jong, J., B.H., Maser, O. y T.T. Tejeda. 2004:** Opciones de captura de carbono en el sector forestal, en cambio climático una visión desde México. Red de monitoreo de políticas públicas CCMSS.[www.ccmss.org.mx/modulos/biblioteca\\_consultar.php?folio=185](http://www.ccmss.org.mx/modulos/biblioteca_consultar.php?folio=185).
- De Jong, R., de Bruin, S. (2012).** Linear trends in seasonal vegetation time series and the modifiable temporal unit problem. *Biogeosciences*, 9(1), 71–77.
- De Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M. E., Dent, D. L. (2011).** Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 692–702.
- Deans, J., 2003.** Comparative growth biomass production, nutrient use and soil amelioration by nitrogen-fixing tree species in semi-arid Senegal. *For. Ecol. Manage.* 176, 253–264.
- Dénou A, Togola A, Haïdara M, Sanogo R, Diallo D, (2016)** Review on Phytochemistry and Pharmacological Aspects of *Guiera Senegalensis* JF Gmel (Combretaceae). *International Journal of New Technology and Research* 3: 30-32.
- Descroix, L., M. Esteves, K. SouleyYéro, J.-L. Rajot, M. Malam Abdou, S. Boubkraoui, J.-M. Lapetite, N. Dessay, I. Zin, O. Amogu, A. Bachir, I. Bouzou Moussa, E. Le Breton, and I. Mamadou, 2011b.** Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. *Hydrol. Earth Syst.Sci.Discuss.*,8,1569-1607,2011.[www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/8/1569/2011/doi:10.5194/hessd-8-1569-2011](http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/8/1569/2011/doi:10.5194/hessd-8-1569-2011).
- Devineau, J.-L., Fournier, A., Nignan, S., 2009.** Ordinary biodiversity in western Burkina Faso (West Africa): what vegetation do the state forests conserve? *Biodivers. Conserv.* 18, 2075–2099.

**Diakhaté, S., Villenave, C., Diallo, N.H., BaA, O., Djigal, D., Masse, D., Sembène, P.M., Chapuis-Lardy, L., 2013.** The influence of a shrub-based intercropping system on the soil nematofauna when growing millet in Senegal. *Eur. J. Soil Biol.* 57, 35–41.

**Díaz, F. R.; Acosta, M. M.; Carrillo, A. F.; Buendía, R. E.; Flores, A. E. y Etchevers, B. J. D. 2007.** Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques.* 13(1):25-34.

**Dinesh D, Frid-Nielsen S, Norman J, Mutamba M, Loboguerrero Rodriguez AM, and Campbell B. 2015b.** Is Climate-Smart Agriculture effective? A review of selected cases. CCAFS Working Paper no. 129. Copenhagen, Denmark: CCAFS.

**Direction de la Météorologie Nationale du Niger. 2003.** Climatologie et activités socio-professionnelles au Niger. <http://www.meteo.niger.net/html/climatccl2.htm>

**DiVecchia, A., Pini, G., Sorani, F., and Tarchianai, V. (2007).** Keita, Niger: The impact on environment and livelihood of 20 years fight against desertification. Centro Citta del Terzo Mondo, Working paper n. 26-2007. Retrieved from <http://areeweb.polito.it/ricerca/cctm/wp/WP26.pdf>

**DIXON R., BROWN S., HOUGHTON R., SOLOMON M., TREXLER C., WISNIEWSKI J., 1994.** Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263, 185-190.

**Dixon RK, Winjum JK, Andrasko KJ, Lee JJ, Schroeder PE (1994)** Integrated land-use systems: assessment of promising agroforest and alternative land-use practices to enhance carbon conservation and sequestration. *Clim Change* 27:71–92

**Dong, J., Kaufmann, R.K., Myneni, R.B., Tucker, C.J., Kauppi, P.E., Liski, J., Buermann, W., Alexeyev, V. and Hughes, M.K. 2003.** Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment*, 84, pp. 393–410

**Dossa EL, Khouma M, Diedhiou I, Sene M, Kizito F, Badiane AN, Samba SAN, Dick RP. 2009.** Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization potential of semiarid sahelian soils amended with native shrubs residues. *Geoderma.* 148:251–260.

**Douma S., Rabi Ch., Mahamane A., Kouakou Ch. K., Mahamadou K. & Mahamane S. 2011.** Caractéristiques écologiques des populations de quatre ligneux fruitiers des parcs Agro forestiers de la zone déclassée de la Réserve Totale de Faune de Tamou (Niger). *Les cahiers de l'économie Rurale*, 11 : 47-59.

- Diatta, C, D., Gueye, M., Akpo, L, E., 2013.** Les plantes médicinales utilisées contre les dermatoses dans la pharmacopée Bainounk de Djibonker, région de Ziguinchor (Sénégal). *Journal of Applied Biosciences* 70: 5599– 5607.
- Doumbia A. 2000.** Identification d'espèces agroforestières pour la production d'engrais vert dans le cadre d'une technologie de transfert de biomasse en systèmes péri-urbain et urbain. Mémoire de fin d'études d'Ingénieur de l'Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée IPR /IFRA de Katibougou, Mali, 31 p.
- Dupraz, C. et Liagre, F. 2008.** Agroforesterie. Des arbres et des cultures. 1e éd. Editions France Agricole, Paris, France. 413 p.
- Dibong, S, D., Mpondo Mpondo, E., Ngoye A., Kwin, M, F., 2011.** Plantes médicinales utilisées par les populations Bassa de la région de Douala au Cameroun, *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5(3): 1105-1117.
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Machado, E. A., Rogan, J., Anyamba, A. (2013).** Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011. *Remote Sensing*, 5(10), 4799–4818.
- Ecklundh, L. and Olsson, L. (2003).** Vegetation index trends for the African Sahel 1982–1999. *Geophysical Research Letters* 30(8): 1430. doi:10.1029/2002GL016772.
- Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverría, H. (2014).** Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo.
- Elagib, N.A. and Mansell, M.G. 2000.** Recent trends and anomalies in mean seasonal and annual temperature over Sudan. *Journal of Arid Environ.* 45: 263–288.
- Elias, M., 2013.** Influence of agroforestry practices on the structure and spatiality of shea trees (*Vitellaria paradoxa* C. F. Gaertn.) in central-west Burkina Faso. *Agrofor. Syst.* 87, 203–216.
- Elias, M., Carney, J.A., 2007.** African shea butter: a feminized subsidy from nature. *Africa J. Int. African Inst.* 77, 37–62
- Ene A, Atawodi S, Ameh D, Kwanashie H, Agomo P (2010)** Locally used plants for malaria therapy amongst the Hausa, Yoruba and Ibo Communities in Maiduguri, North-Eastern Nigeria. *Indian Journal of Traditional Knowledge* 3: 486-490. *Environ Dev Sust* 6:145–162.

**Eamus D, K McGuinness, W Burrows. 2000.** Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and western Australia. National Carbon accounting system. 56 p. (Technical report N° 5).

**Escandon, C. J.; Ben H. J. de Jong, S. Ochoa G.; I. March M.; M. A. Castillo. 1999.** Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos Landsat TM en Jusnajib, La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México Núm. 40:7184

**Esperanza, F y Zerda, H. 2002.** Potencialidad de los índices de vegetación Para la discriminación de coberturas forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales, Santiago del Estero, 2002. Etkin, N. L. and Ross, P.].: Food as medicine and medicine as food. An adaptive framework for the interpretation of plant utilization among the Hausa of Northern Nigeria. Soc . Sci. Med. 16: 1559-1573, 1982.

**Evaluación de Ecosistemas del Milenio EEM, 2005.** Sistemas de tierras secas". Capítulo 22 en: Ecosistemas y bienestar humano: estado actual y tendencias, Volumen 1. Island Press.. Expansion. Datos macro.com, censo de 2013. Disponible en: <http://www.datosmacro.com/demografia/poblacion/mauritania>. Expansion. Datos macro.com, censo de 2013. Disponible en: <http://www.datosmacro.com/demografia/poblacion/chad>.

**Fadimu YO, Mohammed I, Zurmi S (2014)** Ethnomedicinal survey of anti-typhoid plants in Ijebu Ode Local Government Area of Ogun State, Nigeria. International Journal of Science and Nature 2: 332-336. 28.

**Faleiro, F. G. y A. Farias Neto de L. (ed. tec.). 2008.** Savanas. Desafios e estratégias para o equilibrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. Embrapa Cerrados, Planaltina DF, Brasil, 1198 p.

**Fandohan, B. (2011).** Conservation biology of *Tamarindus indica* (Fabaceae) in Benin, West Africa. PhD Thesis, University of Abomey-Calavi, Benin, 227p.

**FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.** FAO Global Land Cover Network: Globcover-derived national land cover databases [WWW Document]. web page. URL [http://www.glcn.org/databases/lc\\_gc-africa\\_en.jsp](http://www.glcn.org/databases/lc_gc-africa_en.jsp)

**FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004.** Sahel Weather and Crop Situation Report. Rome.

**FAO (2007)** FAO soil map. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

**FAO (Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2010.** "Climate-Smart" Agriculture. Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation (en línea). Disponible En: <http://www.fao.org/docrep/013/i1881e/i1881e00.pdf>

**FAO 2015.** Atlas de cobertura del suelo de Uruguay. Cobertura de suelo y cambios 2000 – 2011. Land Cover Classification System. Montevideo, UY. 52 p. FAO disponible en : [http://www.fao.org/docrep/005/Y3948F/y3948f11.htm#P0\\_0](http://www.fao.org/docrep/005/Y3948F/y3948f11.htm#P0_0)

**FAO, 1990** - Soil map of the world. Revised Legend. World Soil Resources Report, n°60. Rome.119 p

**FAO, 2001:** Global Forest Resources Assessment 2000. Main report. FAO Forestry Paper 140, 479 pp.

**FAO, 2009.** Profil Nutritionnel du Niger. SCIAV. Division de la nutrition et de la protection des consommateurs. 70pp.

**FAO, ONU. (2002)** Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Roma.

**FAO. 2003.** Forestry Outlook Study for Africa. FAO Rome. 92 pp.

**FAO. 2009.** State of World's Forests 2009. FAO, Rome.

**FAO. 2011.** State of World's Forests 2011. FAO, Rome

**FAO. 2005.** AQUASTAT Information System on Water and Agriculture. Country Profiles – Niger.

<http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agl/aglw/aquastat/countries/index.stm>

**FAO. 2009.** Presentación al CMNUCC AWG LCA, Enabling agriculture to contribute to climate change (disponible en <http://unfccc.int/resource/docs/2008/smsn/igo/036.pdf>).

**FAO. 2010.** Evaluation des ressources forestières mondiales 2010. Rapport National Niger. Département des forêts, Rome. 75 pp

**FAO. 2012.** Moving forward with Climate-smart agriculture (en línea). Disponible En: [www.fao.org/climatechange/climate-smart](http://www.fao.org/climatechange/climate-smart).

**FAO. 2007b.** La adaptación de la agricultura, la silvicultura y las pesquerías al cambio climático. Perspectiva, estructura y prioridades. Grupo Interdepartamental de Trabajo sobre el Cambio Climático. Roma.

**FAO.2014.** La Reducción De Las Emisiones Debido A La Deforestación Y La Degradación Forestal. Cumbre De 2014 Sobre El Clima.

FAO: Climate-Smart Agriculture: Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization United Nation; 2010.

**Faye M.D, Weber JC, Abase TA, Boureima M, Larwanou M, Bationo AB, Diallo BO, Sigue H, Dakouo JM, Samake O, Diaite D. 2011.** Farmers' preferences for tree functions and species in the West Africa Sahel. *Forests, Trees and Livelihoods* 20:113-136.

**Faye, M.D., Weber, J., Mounkoro, B., Dakouo, J.-M., 2010.** Contribution of parkland trees to farmers' livelihoods: a case study from Mali. *Dev. Pract.* 20, 428–434.

**FENSHOLT R., RASMUSSEN K., 2011,** Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment* 115,438-451.doi: 10.1016/j.rse.2010.09.014.

**Fensholt, R., Proud, S. R. (2012).** Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends- Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 119, 131–147.

**Fensholt, R., Rasmussen, K., Kaspersen, P., Huber, S., Horion, S., Swinnen, E. (2013).** Assessing Land Degradation/Recovery in the African Sahel from Long-Term EarthObservation Based Primary Productivity and Precipitation Relationships. *Remote Sensing*, 5(2), 664–686.

**Fernández Coppel, A; Eliecer H, L. 2001.** Análisis Visual de Imágenes obtenidas del Sensor ETM+ - Satélite Landsat8 estrecho de Gibraltar, USGS, EEUU. Área de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Palencia. (en línea). UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. 12 – 25 pp.

**Fernández, H.H. 2004** Estimación de la Disponibilidad de pasto. INTA. Estación Experimental Balcarce, Área de Producción Animal Balcarce, Bs. As. Argentina. p. 23.

**Ferran i Andreu, O. & Induráin, J. (2002)** Atlas actual de geografía universal. SPES Editorial, pp: 32-34.

**FERRARI, A. E. & L. G. WALL. 2004.** Utilización de árboles fijadores de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados. *Rev. Fac. Agron.* 105 (2): 63-87.

- FEWSNET. (2011).** Niger food security outlook update. United States Agency for International Development. Retrieved from <http://www.fews.net/Pages/countryarchive.aspx?pid=500&gb=ne&l=en>
- Foley, J., DeFries, R., Asner, G., Barford, C. Bonan, G., Carpenter, S., Chapin, F., Coe, M., Daily, G., Gibbs, H., Helkowski, J., Holloway, T., Howard, E., Kucharik, C., Monfreda, C., Patz, J., Prentice, I., Ramankutty, N., Snyder, P. 2005.** Global consequences of land use. *Science* 309, 570-574.
- Food and Agriculture Organization of the UN. (2011).** *FAOSTAT* [Data file]. Retrieved from <http://faostat.fao.org/site/550/default.aspx#ancor>
- Foody, G.M., Boyd, D.S. & Cutler, M.E.J. 2003.** Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 85(4): pp. 463-474
- Forest Trend & The Katoomba Group. 2010.** *Aprendiendo sobre Pagos por Servicios Ambientales*. Fundamentos para la elaboración de proyectos de carbono forestal.
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M., Neigh, C., Reichstein, M. (2013).** Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology. *Remote Sensing*, 5(5), 2113–2144.
- Fragoso L., P. I. 2003.** Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio “Cerro Grande” municipio de Tancítaro, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México. 47 p.
- G. Mahé, J.-E. Paturel, C. R. Geoscience 341 (2009).** Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS.
- Galle, S., Ehrmann, M. & Peugeot, C. (1999)** Water balance in a banded vegetation pattern - a case study of tiger bush in western Niger. *Catena*, 37, 1972
- Garba Mallam Annou 2000:** Les grands types de sols du Niger. Quatorzième réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols.
- Garba, A. M. 1999.** *Rapport de synthèse de la caractérisation à multi-échelles*. Projet DMP/ ORU. Rapport N2, INRAN, Niamey, Niger. 35 pp.
- Garrity DP (2004)** Agroforestry and the achievement of the millennium development goals. *Agrofor Syst* 61–2:5–17
- Garrity DP, Akinnifesi F, Ajayi OC, Bayala J (2010)** Evergreen Agriculture: A robust approach to sustainable food security in Africa. *Food Secur* 2:197-214

- Gelaw, A.M., Singh, B., Lal, R., 2015.** Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *Land Degrad. Dev.* 26, 690–700.
- GIBBS, H.K., BROWN, S., NILES, J.O. & FOLEY, J.A. 2007.** Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Restoration Letters* 2: 1-13
- Giller, K.E., 2001.** Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems. Cabi.
- Glew, R.S., VanderJagt, D.J., Huang, Y.-S., Chuang, L.-T., Bosse, R., Glew, R.H., 2004.** Nutritional analysis of the edible pit of *Sclerocarya birrea* in the Republic of Niger (daniya, Hausa). *J. Food Compos. Anal.* 17, 99–111
- GONZÁLEZ, ALBA BEATRIZ VELÁZQUEZ. (2012)** Análisis multitemporal de imágenes satelitales para conocer la calidad del agua en la presa: Valle de Bravo. Tesis, México df: Universidad nacional autónoma de México.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F.; CALLE, A.; CASANOVA, J.L. Y CUEVAS, J.M.; 2003b. La actividad de la vegetación en la España Peninsular se incrementó un diecisiete por ciento durante el periodo 1987-2001. En: *Teledetección y Desarrollo Regional*: 179-181. Cáceres.
- Gouwakinnou, G.N., Lykke, A.M., Assogbadjo, A.E., Sinsin, B., 2011.** Local knowledge, pattern and diversity of use of *Sclerocarya birrea*. *J. Ethnobiol. Ethnomed.* 7, 8
- Grace, J., San, J.J., Meir, P., Miranda, H.S., Montes, R.A. (2006).** Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. *Journal of Biogeography* 33, 387–400 (Blackwell Publishing Ltd., Oxford).
- Greene, A. M., Giannini, A., Zebiak, S. E. (2009).** Drought return times in the Sahel: A question of attribution. *Geophysical Research Letters*, 36(12), L12701.
- Gregorich, E., Greer, K., Anderson, D., & Liang, B. (1998).** Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil & Tillage Research*, 47: 291-302.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2000).** Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanuel S., Buendía L., Hoppaus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K., y Tanabe K. (Eds). Orientación sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. IPCC/OCDE/AIE/IGES, Hayama, Japón.

- Gulde, S., Chung, H., Amelung, W., Chang, C., Six, J., 2008.** Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. *Soil Sci. So. Am. J.* 72, 605–612.
- Gworgwor, N.A., 2007.** Trees to control weeds in pearl millet. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 89–94.
- GANABA S, OUADBA JM, BOGNOUNOU O. 2005.** Exploitation traditionnelle des végétaux spontanés en région sahélienne du Burkina Faso. *Vertigo*, 6(2): 114.
- Haarsma, R. J., Selten, F. M., Weber, S. L., Kliphuis, M. (2005).** Sahel rainfall variability and response to greenhouse warming. *Geophysical Research Letters*, 32(17), L17702.
- Henry, M. Tiltonell, P., Manlay, R. J., Bernoux, M., Albrecht, A. et Vanlauwe, B. 2009.** Biodiversity, carbon stock and sequestration potential in aboveground biomass in smallholder farming systems of western Kenya. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129: 238-252.
- Haglund E, Ndjeunga J, Snook L, Pasternak D (2011)** Dry land tree management for improved household livelihoods: farmer managed natural regeneration in Niger. *J Environ Manag* 92:1696–1705.
- Haglund, E., Ndjeunga, J., Snook, L. and Pasternak, D. (2009):** Assessing the Impacts of Farmer Managed Natural Regeneration in the Sahel: A Case Study of Maradi Region, Niger, internal report for International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Niamey, Niger.
- Hagos, M.G., Smit, G.N., 2005.** Soil enrichment by *Acacia mellifera* subsp. *detinens* on nutrient-poor sandy soil in a semi-arid southern African savanna. *J. Arid Environ.* 61, 47–59.
- Hai, L., Li, X.G., Li, F.M., Suo, D.R., Guggenberger, G., 2010.** Long-term fertilization and manuring effects on physically-separated soil organic matter pools under a wheat-wheat-maize cropping system in an arid region of China. *Soil Biol. Biochem.* 42, 253–259.
- Haigis, J. (2000).** Field management strategies used by rural households to combat decreasing soil fertility. In: Graef, F., Lawrence, P. & von Oppen, M. (Eds). *Adapted Farming in West Africa: Issues, potentials and Perspectives*, pp. 179–194. Stuttgart, Germany: Verlag Ulrich E. Grauer. 475 pp.
- Haile SG, Nair PKR, Nair VD (2008)** Carbon storage of different soil-size fractions in Florida silvopastoral systems. *J Environ Qual* 37:1789–1797

- Hamad MS, Hassan E, Ahmed S, Fadul E, Ahmed RH (2017)** A Review on the Taxonomy, Ethnobotany, Phytochemistry and Pharmacology of *Guriera senegalensis* J.F.Gmel. (Combretaceae). *Med Aromat Plants (Los Angeles)* 6: 296. doi: 10.4172/2167-0412.1000296
- Hänke, H., 2012.** Resolving the paradox between species decline and greening in the West-African Sahel, a case study from northern Burkina Faso. Master thesis, Stockholm Resilience Centre, Stockholm University.
- Harris, R., 2007.** Niger's trees may be insurance against drought. Video report, National Public Radio, Washington, DC. Available from: <http://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=11608960>
- Hassane, A., Martin, P. & Reij, C. (2000).** Water harvesting, land rehabilitation and household food security: IFAD's soil and water conservation project in Ille'la District. IFAD, Rome, Vrije Universiteit, Amsterdam, 49 pp.
- Helldén, U., Tottrup, C. (2008).** Regional desertification: A global synthesis. *Climate Change and Desertification*, 64(3–4), 169–176.
- Hellden, U., Tottrup, C., 2008.** Regional desertification: a global synthesis. *Global and Planetary Change* 64, 169e176.
- Herbrig, C. (1997).** Untersuchungen zum Einfluß von Buschen auf Standortbedingungen und Artenzusammensetzung von Brachen im Südwest-Niger. Master Thesis, Department of Landscape and Plant Ecology, Hohenheim University. 125 pp.
- Herrera D., V. F. y A. Lucatero B. 2003.** Inventario de carbono capturado actual en el ejido Las Casitas municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 90 p.
- Herrmann, S.M., Anyamba, A., Tucker, C.J., 2005.** Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change* 15, 394e404.
- Heumann, B. W., Seaquist, J. W., Eklundh, L., Jönsson, P. (2007).** AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. *Remote Sensing of Environment*, 108(4), 385–392.
- Hien, E. 2004.** Dynamique du carbone dans un Acrisol ferrique du Centre Ouest Burkina: Influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique. Thèse ENSA Montpellier, 121 p. et an.

- Hien, E., W. T. Kabore, D. Masse y P. Dugue. 2010.** Sustainable Farming Systems in the Sub-Saharan Zone of Burkina Faso - Key Factors. *Sustainability in Debate*, 1, 2, 127-140.
- Hiernaux, P., Houérou, H.N.L., 2006.** Les parcours du Sahel. *Sécheresse* 17, 51–71
- Houghton, R . A . 2005.** Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance *Global Change Biology* 11, 945–958
- Hountondji, Y. C., Sokpon, N., Ozer, P. (2006).** Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982-1999) for the monitoring of desertification. *International Journal of Remote Sensing*, 27(5), 871–884
- Huang, S., Peng, X., Huang, Q., Zhang, W., 2010.** Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China. *Geoderma* 154, 364–369.
- Huber, S. (2011).** Analysis of teleconnections between AVHRR-based sea surface temperature and vegetation productivity in the semi-arid Sahel. *Remote Sensing of Environment*.
- Huber, S., Fensholt, R., Rasmussen, K. (2011).** Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and Planetary Change*, 76(3–4), 186–195.
- Hulme, M. (2001).** Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973–1998. *Global Environmental Change*, 11(August 2000), 19–29.
- Hulme, M., Doherty, R.M., Ngara, T., New, M.G. and Lister, D. 2001.** African climate change: 1900–2100. *Climate Research* 17: 145–168.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A., 2005.** Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25, 1965-1978.
- IFAD, 2011.** Regreening the Sahel: Developing agriculture in the context of climate change in Burkina Faso. Information sheet West and Central Africa. IFAD, Rome.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CO) 2013.** Descripción y Corrección de Productos Landsat 8. Landsat Data Continuity Mission (LDCM) Versión 1.0, Grupo interno de trabajo de percepción remota y aplicaciones geográficas. Bogotá, CO. 46 p
- INS & Macro International Inc. 2007.** Enquête Démographique et de Santé et à Indicateurs Multiples du Niger 2006. Institut National de la Statistique, Ministère de

l'Economie et des Finances, Niamey, Niger et Macro International Inc., Calverton, Maryland, USA.

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2003.** Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 610 p.

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006.** Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds). Published by: IGES, Japón.

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007b.** Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge. University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, USA.

**International Red Cross and Red Crescent. (2010, August 11).** *Niger: Floods.* (International Federation's Disaster Relief Emergency Fund Operations No MDRNE006). Retrieved from <http://ifrc.org/docs/appeals/10/MDRNE006do.pdf>

**IPCC (2001).** Cambio Climático: La Base Científica (Resumen Técnico). Aportación del Grupo de Trabajo I al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático.

**IPCC (2007)** Intergovernmental panel on climate change 2007. Synthesis report. Available at [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment%20report/ar4/syr/ar4_syr.pdf).

**IPCC (2007).** Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change.

**IPCC (2007).** "Cambio climático 2007: informe de síntesis". Informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. pp. 11. IPCC.

**IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2000:** IPCC Special Report: Land Use, Land-Use Change and Forestry. Geneva.

**IPCC 2006.** Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 4. Forest Land. Disponible en

**IPCC 2007b,** Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Working Group I, Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris

**IPCC WGII Fourth Assessment Report, 2007.** Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for policy makers. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 23 pp.

**IPCC. 2000:** Climate change 2000: Special Report: Land Use, Land-Use Change and Forestry. Geneva.

**IPCC. 2001:** Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T., and the Core Writing Team (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, 398 pp.

**IPCC. 2007.** Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible En: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

**IPCC. 2007:** Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.)], Geneva, Switzerland.

**IPCC. 2014a.** Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU). Capítulo 11. Cambio Climático 2014: Mitigación del Cambio Climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel y J.C. Minx (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EE.UU: 811-921.

**IPCC (2007a),** Climate Change 2007: Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris.

**Jama, B., Zeila, A. (2005).** Agroforestry in the drylands of eastern Africa: a call to action. ICRAF Working Paper no. 1. Nairobi: World Agroforestry Centre. pp. 1-38.

**IEA-OECD** (International Energy Agency y Organization for Economic Co-operation and Development). 2002. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion 1971-2000. París, Francia.

**Janzen, H.H., 2004.** Carbon cycling in earth systems-a soil science perspective. Agric. Ecosyst. Environ. 104, 399–417

**Jigam AA, Akanya HO, Dauda BE, Ogbadoyi EO (2011)** Antiplasmodial, analgesic and anti-inflammatory effects of crude *Guiera senegalensis*

Gmel (Combretaceae) leaf extracts in mice infected with Plasmodium berghei. *J Pharmacogn Phytother.* pp: 150-154.

**Jin, S., Sader, S. A. (2005a).** Comparison of time-series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*, 94:364–372.

**Jose S (2009)** Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor Syst*76:1–10

**Jose S (2009)** Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforest Syst* 76:1–10.

**K. & von Oppen, M. (Eds),** Soil Fertility Management in West African Land Use Systems. pp. 469–473. Proceedings of the Regional Workshop, 4–8 March 1997, Niamey, Niger. Weikersheim: Margraf. 600 pp.

**Kaboré V. S. 1994.** Amélioration de la production des sols dégradés (zipellé) du Burkina Faso par la technique des poquets (zaï). Thèse de doctorat, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 199 p.

**Kalinganire, A. and Roy-Macauley, H. 2007.** Domestication of agroforestry tree species for dryland Sahel: an overview. A paper presented to the Genetics and Introduction of Tree Species in Arid Lands session', IUFRO International Conference on 'Forests to Combat Desertification, 16-19 April 2007, Jerusalem, Israel.

**Kalinganire, A., J.C. Weber, A. Uwamariya and B. Kone. 2007.** Improving Rural Livelihoods through Domestication of Indigenous Fruit Trees in the parklands of the Sahel. In: F.K. Akinnifesi *et al.* (eds). 2007. *Indigenous Fruit Trees in the Tropics: Domestication*,

**Kandji, S. T., Verchot, L., and Mackensen, J. (2006).** Climate Change and Variability in the Sahel Region: Impacts and Adaptation Strategies in the Agricultural Sector. World Agroforestry Centre, Nairobi.

**Kanninen, M. 2007.** Secuestro de Carbono en Bosques El Papel de los Bosques en el Ciclo Global de Carbono.

**Kaspersen, P. S., Fensholt, R., Huber, S. (2011).** A Spatiotemporal Analysis of Climatic Drivers for Observed Changes in Sahelian Vegetation Productivity (1982–2007). *International Journal of Geophysics*, 2011, 1–14.

**Kassie, B., Rötter, R., Hengsdijk, H., Asseng, S., Van Ittersum, M., Kahiluoto, H., Van Keulen, H., 2014.** Climate variability and change in the Central Rift Valley of Ethiopia: challenges for rainfed crop production. *J. Agric. Sci.* 152, 58–74.

**Kassogue, A., Momota, M., Sagara, J. & Schutgens, F. (1996).** A measure for every site: Traditional SWC techniques on the Dogon Plateau, Mali. In: Reij, C., Scoones I. & Toulmin, C. (Eds), *Sustaining the soil. Indigenous soil and water conservation in Africa*, pp 69–79. London: Earthscan Publications. 260 pp.

**Kebebew, Z. & K. Urgessa. 2011.** Agroforestry perspective in land use and farmers coping strategy: Experience from Southwestern Ethiopia. *World Journal of Agricultural Sciences* 7(1):73-77.

**Kho, R., Yacouba, B., Yayé, M., Katkoré, B., Moussa, A., Iktam, A., Mayaki, A., 2001.** Separating the effects of trees on crops: the case of *Faidherbia albida* and millet in Niger. *Agrofor. Syst.* 52, 219–238.

**Kindt R, Kalinganire A, Larwanou M, Belem M, Dakouo JM, Bayala J, Kaire M (2008)** Species accumulation within land use and tree diameter categories in Burkina Faso, Mali, Niger and Senegal. *Biodivers Conserv* 17:1883–1905

**Kindt, R., Kalinganire, A., Larwanou, M., Belem, M., Dakouo, J.M., Bayala, J. and Kaire, M. 2008.** Species accumulation within land use and tree diameter categories in Burkina Faso, Mali, Niger and Senegal. *Biodiversity Conservation*. DOI 10.1007/s10531-008-9326-3.

**Kipsat, M., Maritim, H. and J. Okalebo. 2004.** Economic Analysis of Non-Conventional Fertilizers in Vihiga District, Western Kenya. In: Bationo, A. (ed.). *Managing nutrient cycles to sustain soil fertility in Sub-Saharan Africa*. Nairobi: Academy Science Publishers in association with the Tropical Soil Biology and Fertility Institute of CIAT, p. 535-544.

**Kirby KR, Potvin C (2007)** Variation in carbon storage among tree species: implications for the management of a small-scale carbon sink project. *For Ecol Manag* 246:208–221.

**Kizito, F., Dragila, M., Sène, M., Lufafa A., Diedhiou, I., Dick, R.P., Selker, J.S., Dossa, E., Khouma, M., Badiane, A., Ndiaye, S., 2006.** Seasonal soil water variation and root patterns between two semi-arid shrubs co-existing with pearl millet in Senegal, West Africa. *J. Arid Environ.* 67, 436–455.

- Kowero, G., Kufakwandi, F. and Chipeta, M. 2006.** Africa's capacity to manage its forests: an overview. *International Forestry Review* 8(1): 110–117.
- Kristensen, M., Lykke, A.M., 2003.** Informant-based valuation of use and conservation preferences of savanna trees in Burkina Faso. *Econ. Bot.* 57, 203–217
- Kumar BM, Nair PKR, 2012:** Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems. Opportunities and Challenges. Springer; 2012.
- Kumar, B. M. et Nair, P. K. R. 2011.** Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems: Opportunities and Challenges. *Advances in Agroforestry*, vol. 8, 326 p.
- Kurukulasuriya, P., Mendelsohn, R., Hassan, R., Benhin, J., Deressa, T., Diop, M., Eid, H.M., Fosu, K.Y., Gbetibouo, G., Jain, S., Mahamadou, A., Mano, R., Kabubo-Mariara, J., El-Marsafawy, S., Molua, E., Ouda, S., Ouedraogo, M., Séne, I., Maddison, D., Seo, S.N. and Dinar, A. 2006.** Will African Agriculture Survive Climate Change? *World Bank Economic Review* 20: 367–388.
- Kaboré SA, Schumann K., Hien M., Lykke AM., Hahn K., Nacro HB., 2015.** Stratégies d'adaptation à la réduction des services écosystémiques : cas des potentialités de substitution de trois espèces forestières dans le Sud-Ouest du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 9 (3): 1194-1208.
- Lal, R. 2004.** Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
- Lal, R. 2005.** Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems. Pp. 1-30 In: Montagnini, F. (Ed.). *Environmental Services of Agroforestry Systems*. New York, USA, Haworth Press.
- Lal R. (1997).** Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub>-enrichment. *Soil Tillage Res* 43:81–107.
- Lal, R., Kimble, J., Follet, R., & Cole, C. (1998).** *The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. Chelsea: Ann Arbor Press.
- Lal, R. 2008. **Carbon sequestration.** *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 363 (1492): 815-830.
- Lal, R., Follet, R.F. 2009. **Priorities in soil carbon research in response to climate change.** En: R. Lal, R., Follet, R.F. (eds.), *Soil carbon sequestration and the greenhouse effect*, pp. 401-410. SSSA. Madison, WI, Estados Unidos.

- Lara R; Lizeca, J; Fukushima, Y. 2002.** Memoria del mapa de cobertura y uso actual de la tierra. Superintendencia Agraria. La Paz, Bolivia. 25 p.
- Larwanou M. et Saadou M., (2006).** Évaluation de la flore et de la végétation dans certains sites traités et non traités des régions de Tahoua, Maradi et Tillabéri, CRESA, Niamey «études sahéliennes», 90 p.
- Larwanou M, Abdoulaye M, Chris R. 2006.** Etude de la Régénération Naturelle Assistée dans la Région de Zinder (Niger); une Première Exploitation d'un Phénomène Spectaculaire. International Resources Group: Washington DC; 56p.
- Larwanou M, Saadou M, Hamadou S. 2006.** Les arbres dans les systèmes agraires en zone sahélienne du Niger : mode de gestion, atouts et contraintes. *Tropicultura*, 24 (1) : 14-18.
- Larwanou M et Saadou M, 2011.** The role of human interventions in tree dynamics and environmental rehabilitation in the Sahel zone of Niger. *Journal of Arid Environments* 75: 194-200
- Larwanou, M (2003) :** La gestion des parcs agroforestiers au Niger : Analyse des facteurs socio-politiques et institutionnels sur leur dynamisme de la période pré-coloniale à nos jours (cas du système fleuve). Rapport technique de la bourse de recherche ICRAF/CRDI. 26 p.
- Larwanou, M. and Reij, C. 2007.** Farmer managed natural regeneration in Niger: A key to environmental stability, agricultural intensification and diversification. A paper presented at the International symposium on innovations for the green revolution in sub-saharan Africa. Arusha, Tanzania, September 17th–21st 2007. 14 pp.
- Larwanou, M., Dramé Yayé, A. and Dan Guimbo, I. 2008.** Impacts of agroforestry options in combating desertification in Niger. Paper presented at the International Symposium on “Mainstreaming Climate Change into Agricultural and Natural Resources Management Education: Tools, Experiences and Challenges” 28th July–1st August 2008 at Sunbird Capital Hotel, Lilongwe, Malawi. 24 pp.
- Larwanou M, Saadou M. 2012.** Impacts des activités de restauration des terres sur la végétation au Niger. *Journal des Sciences de l'Environnement*, 1(1): 1-15.
- Lash J. y Wellington F (2007).** “Ventaja competitiva frente al calentamiento global”. En: *Harvard Business Review*, Volumen 85 Número 3, pág: 67-75.

- Le Breton, E., 2012** : « Réponses hydrologiques et géomorphologiques aux changements environnementaux au Sahel nigérien ». Thèse de géographie en cotutelle Université Paris 1 Panthéon Sorbonne et Université Abdou Moumouni de Niamey, 210 p.
- LE HOUEROU H.-N., 1992.** Relations entre la variabilité des précipitations et celle de productions primaire et secondaire en zone aride. In L'aridité : une contrainte au développement. Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés, LE FLOC'H E., GROUZIS A., BILLE J.-C. (éditeurs). Edition Orstom, Paris, France, p. 197-220.
- LEBEL T., & ALI A., 2009,** Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007) , *Journal of Hydrology*, 375(1-2), p.52-64.
- Lebel, T., Ali, A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Surface Processes and Water Cycle in West Africa, Studied from the AMMACATCH Observing System*, 375(1–2), 52–64.
- Lee KH, Jose S (2003)** Soil respiration and microbial biomass in a pecan-cotton alley cropping system in southern USA. *Agroforest Syst* 58:45–54
- Leenders, J.K., van Boxel, J.H., Sterk, G., 2007.** The effect of single vegetation elements on wind speed and sediment transport in the Sahelian zone of Burkina Faso. *Earth Surf. Process. Landforms* 32, 1454–1474.
- Leenders, J.K., Visser, S.M., Stroosnijder, L., 2005.** Farmers' perceptions of the role of scattered vegetation in wind erosion control on arable land in Burkina Faso. *Land Degrad. Dev.* 16, 327–337
- Levett, C., August 13, 2008.** Under The Shifting Sands, A Blessing for The Desert. *Sydney Morning Herald*.
- Liu S, Kairé M, Wood E, Diallo O, Tieszen LL (2004)** Impacts of land use and climate change on carbon dynamics in south-central Senegal. *J Arid Environ* 59:583–604
- López. 2001.** Medidas de Concordancia: el índice de Kappa. España. 169-171p
- Lopéz, E; Bocco, G. 2001.** Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo. INTERNET:<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/569/56906105.pdf>
- Lott JE, Ong CK, Black CR 2009:** Understorey microclimate and crop performance in a *Grevillea robusta*-based agroforestry system in semi-arid Kenya. *Agric Forest Meteor* 2009, 149:1140-1151.
- Lu D., Masuel, P., Brondizio, E., Moran, E. (2004).** Change detection techniques, *Int. Journal of Remote Sensing*, 25:2365–2407.

- Ludwig, F., De Kroon, H., Berendse, F., Prins, H.H.T., 2004.** The influence of savanna trees on nutrient, water and light availability and the understorey vegetation. *Plant Ecol.* 170, 93–105.
- Luedeling E, Neufeldt H (2012)** Carbon sequestration potential of parkland agroforestry in the Sahel. *Clim Change* 115:443–461. doi:10.1007/s10584-012-0438-0
- Luedeling E, Sileshi G, Beedy T, Dietz J (2011)** Carbon sequestration potential of agroforestry systems in Africa. In: Kumar BM, Nair PKR (eds) Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges. Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht, pp. 61–83.
- Lufafa, A., Bolte, J., Wright, D., Khouma, M., Diedhiou, I., Dick, R.P., Kizito, F., Dossa, E., Noller, J.S., 2008.** Regional carbon stocks and dynamics in native woody shrub communities of Senegal's Peanut Basin. *Agric. Ecosyst. Environ.* 128, 1–11.
- Lykke, A.M., Mertz, O., Ganaba, S., 2002.** Food consumption in rural Burkina Faso. *Ecol. Food Nutr.* 41, 119–153.
- Laouali A., Dan Guimbo I., Larwanou M., Inoussa M.M. Mahamane A., 2014.** Utilisation de *Prosopis africana* (G. et Perr.) Taub. dans le sud du département d'Aguié au Niger : les différentes formes et leur importance. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 8 (3): 1065-1074
- M.Acosta, K. Quednow, J.Etchevers y C.Montreal 2001.** Un Método Para La Medición Del Carbono Almacenado en La Parte Aérea de Sistemas Con Vegetación Natural e Inducida en Terrenos de Ladera en México.
- Mabrouk, A., Tielkes, E. & Kriegl, M. (1998).** Conservation des eaux et des sols: leÇons des connaissances traditionnelles de la region de Tahoua, Niger. In: Renard, G., Neef, A., Becker,
- Mafongoya PL, Kuntashula E andSileshi G (2006)** Managing soil fertility and nutrient cycles through fertilizer trees in southern Africa. In: Uphoff N, Ball AS, Fernandes E, Herren H, Husson O, Liang M, Palm C, Pretty J, Sanchez P, Sanginga N,Thies J. (eds). *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*, Taylor & Francis.Pp 273-289.
- Mosaddegh, M., Esmaeili, S., Hassanpour, A, S., Malekmohammadi, M., Naghibi, F., 2016.** Ethnobotanical study in the highland of Alvand and Tuyserkan, Iran. *Research Journal of Pharmacognosy*, 3(1), 7-17

- Mahamane S., Mahamane A., Morou B., Amadou O. A., & Maïnassara Z.A. 2012.** Programme National d'inventaire et de suivi des ressources forestières du Niger. Université de Maradi (document de travail). PFN. Bureau d'Etudes en Ingénierie pour l'Environnement. 2012. Plan forestier national PFN - Niger 2012 – 2021. 98 pp.
- Marou ZA, Abasse AT, Bokar M, Niang A, Cheick TO. 2002.** Analyse de l'adoption de la Régénération Naturelle Assistée dans la région de Maradi au Niger. 2e Atelier régional sur les aspects socioéconomiques de l'Agroforesterie au Sahel, Bamako 4-6 mars 2002, 7 p.
- Mai Moussa K. A. 1996.** Environnement de *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. Caractérisation, exploitation et perspectives d'optimisation dans les zones. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger, 147 p.
- Makumba, W. et al., 2006.** The long-term effects of a gliricidia-maize intercropping system in Southern Malawi, on gliricidia and maize yields, and soil properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116(1-2): 85-92.
- Mando A. 1997.** The role of termites and mulch in the rehabilitation of crusted sahelian soils. Thesis, Wageningen Agricultural University, Tropical Resource Management Papers N°16, 101 p
- Manu, A., Thurow, T.L., Juo, A.S.R., Sanguina, I., Gandah, M. & Mahamane, I. (1994)** Sustainable land management in the Sahel. a case study of an agricultural watershed at Hamdallaye, Niger. Bulletin no. 94-01. TroSoils/TAMU, College Station, Texas.
- Maranz S (2009)** Tree mortality in the African Sahel indicates an anthropogenic ecosystem displaced by climate change. *J Biogeogr* 36:1181-1193.
- María MR, Maria CD, Bucar I, Luís C (2012)** Medicinal plants used to treat neurological disorders in West Africa: a case study with GuineaBissau flora. *American Journal of Plant Sciences*. pp: 1028-1036.
- Marín García. M.L., (2003) "análisis químico de suelos y aguas transparencias y problemas", Ed. Editorial UPV.
- Marone, D. 2012.** Les brise-vent au Sénégal : quand le capital se fait social et humain. *Sahel Agroforesterie*, 16:5-6
- Martha González E. / Enrique Jurado / Socorro González E. / Óscar Aguirre C. / Javier Jiménez P. / José Navar. 2003.** CAMBIO CLIMÁTICO MUNDIAL: ORIGEN Y CONSECUENCIAS *Ciencia UANL*, julio-septiembre, año/vol. VI, número 003 Universidad Autónoma de Nuevo León Monterrey, México pp. 377-385

- Mbow, C., Fensholt, R., Nielsen, T. T., Rasmussen, K. (2014).** Advances in monitoring vegetation and land use dynamics in the Sahel. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 114(1), 84–91.
- Mbow, C., Smith, P., Skole, D., Duguma, L., Bustamante, M., 2014.** Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 6, 8–14
- Medina G.; García, R.; Gutiérrez, L.; Echavarría Chaireza, F.G.; Amador Ramírez, M.D. y Ruiz Corralb, A. 2009.** Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas. Use of satellite images to assess forage production in the rangelands of Zacatecas. *Técnica Pecuária. México. Vol. 47, T 2, pp.135-144.*
- Mendoza, V. 2018.** Manual de capacitación de ArcGIS 10.5. Master of Engineering. Cajamarca – Perú. pp. 2-9.
- Meneses, T. C. L. 2011.** El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyva* 238, Vol. 62, 2011/2.pp 39-46. <http://www.fao.org/docrep/015/i2560s/i2560s07.pdf>
- Merbold L. (2009).** Precipitation as driver of carbon fluxes in 11 African ecosystems. *Biogeosciences*, 6, 1027-1041.
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Díez, M. F., Schmindt, F., ... others. (2011).** Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Pilquen-Sección Agronomía*, (11), 5.
- Michels, K. (1994).** Wind Erosion in the Southern Sahelian Zone. Extent, Control and Effects on Millet Production. Stuttgart: Verlag Ulrich E. Grauer. 99 pp.
- Middleton y Thomas, 1997.** "El atlas mundial de desertificación Millennium **Ecosystem Assessment (2005a).** Cambio climático". Capítulo 13 en: Ecosistemas y bienestar humano: estado actual y tendencias, Volumen 1. Island Press.
- Mohino, E., Janicot, S., Bader, J. (2011).** Sahel rainfall and decadal to multi-decadal sea surface temperature variability. *Climate Dynamics*, 37(3-4), 419–440.
- Mokgolodi, N.C., Setshogo, M.P., Shi, L.-l., Liu, Y.-j., Ma, C., 2011.** Achieving food and nutritional security through agroforestry: a case of *Faidherbia albida* in sub-Saharan Africa. *For. Stud. China* 13, 123–131.

**Montagnini F, Nair PKR (2004)** Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61–2:281–295. DOI: 10.1023/B:A GFO.0000029005.92691.79

**Montagnini, F. 2012.** Los sistemas agroforestales y su contribución para la mitigación y adaptación al cambio climático. Maracay, Venezuela, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, *Revista Alcance* 71:1-24.

**Morgan JA, Follett RF, Allen LH, Grosso SD, Derner JD, Dijkstra F, Franzluebbbers A, Fry R, Paustian K, Schoeneberger MM (2010)** Carbon sequestration in agricultural land of the United States. *J Soil Water Conserv* 65:6A–13<sup>a</sup>.

**Mortimore, M.2009:** *Dryland Opportunities*, IUCN, Gland, Switzerland, HED, London, UK and UNDP, New York, USA, 2009.

**Moussa H. 1997.** Germination du palmier doum (*Hyphaene thebaica* Mart.) et analyse de son interaction avec le mil (*Pennisetum glaucum* L.) en zone semi-aride du Niger. PhD Université de Laval, Québec, Canada.

**Mudrak, E.L., Schafer, J.L., Fuentes-Ramirez, A., Holzapfel, C., Moloney, K.A., 2014.** Predictive modeling of spatial patterns of soil nutrients related to fertility islands. *Landsc. Ecol.* 29, 491–505.

**Munzbergova, Z., Ward, D., 2002.** Acacia trees as keystone species in Negev desert ecosystems. *J. Veg. Sci.* 13, 227–236.

**Murgueitio, E; Calle, Z; Uribe, F; Calle, A; Solorio, B. 2011.** Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management* 261:1654-1663

**Murthy I., Gupta M., Tomar S., Munsu M., Tiwari R., Hegde G.T. & Ravindranath N.H. 2013.** Carbon sequestration potential of agroforestry systems in India. Centre for Sustainable Technologies, Indian Institute of Science, Bangalore, India. *Earth Science & Climatic Change.* 4:1.

**Mutiro, K. and Murwira, H. 2004.** The profitability of manure use on maize in the smallholder sector of Zimbabwe. In: Bationo, A. (ed.). *Managing nutrient cycles to sustain soil fertility in SubSaharan Africa*. Nairobi: Academy Science Publishers in association with the Tropical Soil Biology and Fertility Institute of CIAT, p. 571-582.

**Mwangi E., Dohrn S. (2005).** Biting The Bullet: How to Secure Access to Drylands Resources For Multiple Users?. In: UNDP-International Land

Coalition Land Rights for African Development: From Knowledge to Action. October 31- November 3, 2005. Nairobi, Kenya.10.

**Moustapha A. 2004.** Etude de faisabilité technique, économique et organisationnelle d'un marché de bois issu de la régénération naturelle dans la grappe de Dan Saga, mémoire (Diplôme d'Ingénieur des Techniques Agricoles), Université Abdou Moumouni, 67p.

**Marlan G., Boden T. y B. Andres. 2003.** Global, Regional and National CO2 Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). Oak Ridge National Laboratory, U. S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn. Disponible en: <http://cdiac.esd.ornl.gov/UNFCCC> (United Nations Framework Convention on Climate Change). Greenhouse Gas Inventory Database (GHG). Disponible en: <http://www.unfccc.de/resources/index.html>.

**Masih, I., Maskey, S. (2014).** A review of droughts on the African continent: a geospatial and long-term perspective, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, pp. 3635–3649.

**Michailof, S. (2015)** Africanistan. L'Afrique en crise va-t-elle se retrouver dans nos banlieues ? Paris: Fayard.

**Nair PKR, Kumar BM, Nair VD (2009a)** Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J Plant Nutr SoilSci-Z Pflanzenernahr Bodenkd* 172:10–23

**Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Haile SG (2009b)** Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environ Sci Pol* 12:1099–1111

**Nair PKR, Nair VD (2003)** Carbon storage in North American agroforestry systems. In: Kimble JM, Heath LS, Birdsey RA, Lal R (eds.) *The potential of U.S. Forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. CRC Press, Boca Raton, pp 333–346

**Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Showalter JM (2010)** Carbon sequestration in agroforestry systems. *Adv Agron* 108:237–307.

**Nair, P. K. 2004.** Agroforestry: Trees in support of sustainable agriculture. In: HILLEL, H.; ROSENZWEIG, C.; POWLSON, D.; SCOW, K.; SINGER, M.; SPARKS, D. (eds). *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, London, U.K. pp. 35–44.

**Nair, P. K.; Kumar, B. M.; Nair, V. D. 2009.** Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172: 10–23. DOI: 10.1002/jpln.200800030.

**Neef, A. (1999).** Auswirkungen von Bodenrechtswandel auf Ressourcennutzung und wirtschaftliches Verhalten von Kleinbauern in Niger und Benin. Frankfurt, Berlin, Bern, New York, Paris, Wien: Peter Lang Verlag. 290 pp.

**Ngigi, S.N. (2009)** *Climate Change Adaptation Strategies: Water Resources Management Options for Smallholder Farming Systems in Sub-Saharan Africa*, The MDG Center for East and Southern Africa, New York, NY: The Earth Institute of Columbia University

**NICHOLSON S.E, 2005,** On the question of “the recovery” of the rains in the West African Sahel. *Journal of arid environments*.615-64.

**Nicholson, S. E. (2000).** The nature of rainfall variability over Africa on time scales of decades to millenia. *Paleomonsoon Variations and Terrestrial Environmental Change*, 26(1–3), 137–158.

**Nicholson, S. E. (2013).** The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability. *ISRN Meteorology*, 2013, 32.

**Nicholson, S.E., 2005.** On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments* 63, 615e641.

**Nicholson, S.E., Some, B. and Kone, B. 2000.** An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy season of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *Journal of Climate* 13: 2628-2640.

Nkamleu, G.B. & V. M. Manyong. 2005. **Factors affecting the adoption of agroforestry practices by factors in Cameroon.** *Small-Scale Forestry* 4/2:135-148

Nkonya, E., Place, F., Pendar, J., Mwanjolo, M., Okhimambe, A., Kato, E., Traore, S. (2011) *Climate Risk Management through Sustainable Land Management in Sub-Saharan Africa. IFPRI Discussion Paper 01126,*

**NOAA. 2009.** National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en línea <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

**Nziguheba, G., Merckx, R., Palm, C.A. and Mutuo, P.K. (2004).** Combined use of *Tithonia diversifolia* and inorganic fertilizers for improving maize production in a phosphorus deficient soil in western Kenya. In: Bationo, A. (2004) (ed.). *Managing nutrient cycles to sustain soil fertility in sub-Saharan Africa*. Nairobi: Academy Science

Publishers in Association with Tropical Soil Biology and Fertility Institute of CIAT, p. 329-345.

**Observatoire de Sahara et du Sahel (OSS). (2011).** Système aquifère d'Iullemeden: L'approche ADT/PAS de FEM appliquée au SAI. Available at [www.oss-online.org](http://www.oss-online.org).

**OCHA. (2012).** *Snapshot of floods*. Retrieved from

**OCHA. (2013).** *Aperçu humanitaire provisoire sur les inondations (au 17 Septembre 2013)*

**Oelbermann M, Voroney RP, Kass DCL, Schlönvoigt AM (2006a)** Soil carbon and nitrogen dynamics using stable isotopes in 19 and 10-yr old tropical agroforestry systems. *Geoderma* 130:356–367.

**Oelbermann M, Voroney RP, Thevathasan NV, Gordon AM, Kass DCL, Schlönvoigt AM (2006b)** Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system. *Agroforest Syst* 68:27–36

**Office National d'édition et de presse (ONEP). (2013).** *Face à la série noire de la vague d'inondations*. Retrieved from

**Ohemu T, Agunu A, Olotu P, Ajima U, Dafam D, (2014)** Ethnobotanical Survey of Medical Plants Used in the Traditional Treatment of Viral Infections in Jos, Plateau State, Nigeria. *Int J Med Arom Plants* 4: 74-81.

Olson, L., Eklundh, L., Ardo, J., 2005. A recent greening of the Sahel, \_ trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63, 556-566.

**OLSSON L., EKLUNDH L. & ARDO J., 2005.**, A recent greening of the Sahel – trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63: 556–566.

**Oluranti AC, Michael UO, Jane U, Ayembe NA (2012)** Ethno botanical studies of medicinal plants used in the management of Peptic ulcer disease in Sokoto State, North Western Nigeria. *Int Res J Pharm Pharmacol* 9: 225-230.

**Ong, CK; Wilson, J; Deans, JD; Mulatya, J; Raussen, T; Wajja-Musukwe, N. 2002.** Tree-crop interactions: manipulation of water use and root function. *Agricultural Water Management* 53:171-186.

**Ordoñez, J., & Masera, O. (2001).** *Captura de carbono ante el cambio climático*. Forum, 3-12.

**Oshobu M, Geidam M (2014)** Effects of Aqueous Ethanolic Extract of the leaves of *Guiera senegalensis* JF Gmel (Combretaceae) on Liver Function

in Wister Strain Albino Rats. International Journal of Scientific Research and Management. pp: 611-615.

**Oumorou, M., Sinadouwirou, T., Kiki, M., Glélé-Kakai, R., Mensah, G.A. & Sinsin B. (2010).** Disturbance and population structure of *Vitex doniana* Sw. in northern Benin. *Int. J. Biol.Chem.Sci.*, 4(3): 624-632.

**OMS 2002:** rapport Organisation mondiale de la Santé Genève, Médecine Traditionnelle : Besoins Croissants et Potentiel.

**Palm C, Tomich T, Van Noordwijk M, Vosti S, Alegre J, Gockowski J,**

**Verchot L (2004)** Mitigating GHG emissions in the humid tropics:

**Pansu, M., Gautheyrou, J. (2006).** Handbook of soil analysis mineralogical, organic and inorganic methods. Heidelberg. Berlin, 993p.

Panyan, E.K., Quattara, K., Karbo, N., Avorny, F.K., Ayantunde, A., Yahayai, I., Swadogo, B. and Kabore, A. (2011) **Constraints and opportunities in rainwater management in crop – livestock systems of Volta basin in Ghana and Burkina Faso, Third International Forum on Water and Food,, 14-17 November,Tshwane, South Africa: CGIAR Challenge Programme**

**Pardos, J. A. 2010.** Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Madrid: Instituto Nacional de Investigacion y Tecnología Agraria y Alimentaria.

**Peña, J. 2005.** Cartografía de las coberturas y usos del suelo de la Marina Baixa (Alicante) para 1956, 1978 y 2000. Investigaciones Geográficas, Nº 37, 93 –107 pp

**Pender, J. (2009).** Impacts of sustainable land management programs on land management and poverty in Niger. World Bank Report No.: 48230-NE.

**Phillips, C. J., Marden, M., Lambie, S., Watson, A., Ross, C., et Fraser, S. 2013.** Observations of below-ground characteristics of young redwood trees (*Sequoia sempervirens*) from two sites in New Zealand-implication for erosion control. Plant Soil, 363: 33-48.

**PNUD (2007).** “Informe sobre el Desarrollo Humano 2007-2008. La lucha contra el cambio climático: solidaridad frente a un mundo dividido”.

**Polgreen, L., 2007.** Niger, trees and crops turn back the desert. New York Times Feb.11.

**Post, W.H., Kwon, K.C. 2000** Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential. Global change Biology 6: 327-327.

**Poveda, I., Gonzáles, I., Díaz, A., & Balbontín, C. (2010).** Procesado de Imágenes de Satélite: Obtención de Magnitudes Biofísicas de la Vegetación. Curso de Especialista en SIG y Teledetección.

**Powell, J.M., Pearson, R.A., Hiernaux, P.H., 2004.** Crop–livestock interactions in the West African Drylands. *Agron. J.* 96, 469–483.

**Prince, S.D., Wessels, K.J., Tucker, C.J. & Nicholson, S.E., 2007.** Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. *Global Change Biology* 13, 1308–1313.

**Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1998).** Disponible en línea en:

**Pye-Smith C. 2013.** The quiet revolution: How Niger's farmers are re-greening the parklands of the Sahel. ICRAF Trees for Change no. 12. Nairobi, Kenya: World Agroforestry Centre (ICRAF).

**Quansah E. (2015).** Carbon dioxide fluxes from contrasting ecosystems in the Sudanian savanna in West Africa. *Carbon Balance Manage.*, 10, 1-17.

**Rasmussen, K.; Bjarne, F.; Madsen, J-E. , 2001.** Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso. *Global Environmental Change*, 11, 271-282.

**Ravi, S., D'Odorico, P., Huxman, T.E., Collins, S.L., 2010.** Interactions between soil erosion processes and fires: implications for the dynamics of fertility islands. *Rangel. Ecol. Manag.* 63, 267–274.

**Reij C, Tappan G, Smale M (2009)** Regreening the Sahel-Farmer led innovation in Burkina Faso and Niger. In: Spielman D, Pandya-Lorch R (eds) Millions Fed—proven successes in agricultural development. International Food Policy Research Institute, Washington DC, pp 53–58.

**Reij C, Tappan G, Smale M. 2009.** Agro-environmental Transformation in the Sahel: Another kind of "Green Revolution". IFPRI Discussion Paper 00914. Washington, DC: International Food Policy Research Institute.

**Reij, C. (2008).** Linking Adaptation to Climate Change, Poverty Reduction and Sustainable Development in Drylands: How to move from research to action in the post-Bali era? The Drylands Coordination Group. Oslo, Norway.

**Reij, C. 2013.** Learning from African farmers: how “re-greening” boosts food security; curbs climate change. Blog, 27 de junio (disponible en: [www.wri.org/blog/2013/06/learning-african-farmers-how-“re-greening”-boosts-food-security-curbs-climate-change](http://www.wri.org/blog/2013/06/learning-african-farmers-how-“re-greening”-boosts-food-security-curbs-climate-change)). Acceso: 4/2018.

Reij, C. and Smaling, E.M.A. (2008) '**Analyzing Successes in Agriculture and Land Management in Sub-Saharan Africa: Is Macro Level Gloom Obscuring Positive Micro Level Change?**', *Land Policy*, **25:410-420**

**Reij, C., 2012.** Scaling up in Agriculture, Rural Development and Nutrition: Building on Successes with Regreening in the West African Sahel. Focus 19, brief 6. IFPRI, Washington, DC.

**Reij, C., Tappan, G., & Smale, M. (2009).** Re-Greening the Sahel: Farmer-led innovation in Burkina Faso and Niger. In D. Spielman & R. Pandya-Lorch (Eds.), *Millions Fed. Proven Successes in Agricultural Development* (pp. 53–58). Washington, DC: IFPRI.

**Reij, C., Tappan, G., Belemvire, A., 2005.** Changing land management practices and vegetation on the Central Plateau of Burkina Faso (1968–2002). *Journal of Arid Environments* 63, 642–659.

**Reij, C., Tappan, G., Smale, M., 2009.** Agroenvironmental transformation in the Sahel: another kind of “Green Revolution”. IFPRI Discussion Paper 00914. International Food Policy Research Institute, Washington, DC.

**Reij CP, Botoni E. 2009.** La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes. Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles. CILSS, CIS, 63p.

**René Vázquez-Jiménez, Rocío N. Ramos-Bernal, Raúl Romero- Calcerrada, Patricia Arrogante-Funes, Sulpicio Sanchez Tizapa and Carlos J. Novillo, 2017:** Thresholding Algorithm Optimization for Change Detection to Satellite Imagery. Renza Torres, D. (2015). *Transformada Wavelet Compleja de Doble Árbol (DT-CWT) y su aplicación en Teledetección. Nuevos modelos y aplicaciones* (Doctoral dissertation, ETSI\_Informatica).

**Reynolds, J.F., Maestre, F.T., Kemp, P.R., Smith, D.M.S. and Lambin, E.F. (2007a).** Natural and Human Dimensions of Land Degradation in Drylands: Causes and Consequences. In: *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Canadell J., Pataki D., and Pitelka L., (eds). Berlin: Springer. 310 p.

**Rinaudo, T., 2007.** The development of farmer managed natural regeneration. *Leisa Magazine* 23 (2), 32e34.

**Rinaudo, T., Yaou, S. (2009):** Agricultural Task Force Report: World Vision Niger Agricultural Development', Friedrichs dorf : World Vision.

- Roa H.A., Salgado M.G. & Alvarez J. 2009.** Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco, Chiapas México. *Acta biol. Colombia.* 14(3): 97-110.
- Román-Colón, Y. (2009).** La utilización de imágenes de Landsat TM para cuantificar áreas de deforestación en la región de Mato Grosso, Brazil. Departamento de Geología, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.
- Rosa, H.; Kandel, S. y Dimas, L. 2004.** Compensación por servicios ambientales y comunidades rurales. PRISMA-INE-CCMSS. México. 21-23 p.
- Rosenqvist, A.; Milne, A.; Lucas, A.; Imhoff, M. and Dobson, C. 2003.** A review of remote sensing technologies in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science and policy:* pp. 441-455
- Roshetko JM, Delaney M, Hairiah K, Purnomosidhi P (2002)** Carbon stocks in Indonesian homegarden systems: can smallholder systems be targeted for increased carbon storage? *Am J Altern Agric* 17:138–148
- Roudier, P., Sultan, B., Quiron, P., Baron, C., Alhassane, A., Traore, S.B. and Muller, B. (2012) '**An Ex Ante Evaluation of the Use of Seasonal Climate Forecasts for Millet Growers in South West Niger**', *International Journal of Climatology*, **32:759-771**.
- Rügnitz, M.T., Chacón, M.L. y Porro, R. (2009).** *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. 1a. Ed. Lima: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA).
- Ruiz, A. 2002.** Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 106 p.
- Russo, Ricardo. 2009.** Guía práctica para la medición de la captura de carbono en la biomasa forestal. Guácimo, Limón.
- Rango, A., Chopping, M., Ritchie, J., Havstad, K., Kustas, W., Schmutge, T., 2000.** Morphological characteristics of shrub coppice dunes in desert grasslands of southern New Mexico derived from scanning LIDAR. *Rem. Sens. Environ.* 74,26–44.
- Rhodes, C.J. 2016. **The 2015 Paris Climate Change Conference: COP21.** *Science Progress* **99 (1): 97-104**.

- Rodríguez, A. 2011.** Metodología para Detectar cambios en el Uso de la Tierra Utilizando los Principios de la Clasificación Orientada a objetos, Estudio de Caso Piedemonte de Villavicencio, Meta. Bogotá, Colombia. 35p.
- Saha, S. K., Nair, P. K. R., Nair, V. D. et Kumar, B. M. 2010.** Carbon storage in relation to soil size fractions under tropical tree-based land-use systems. *Plant Soil*, 328: 433-446.
- Saha, S. K., Nair, P. K. R., Nair, V. D. et Kumar, M. 2009.** Soil carbon stock in relation to plant diversity of homegardens in Kerala, India. *Agroforestry Systems*, 76: 53-65.
- Salissou A. 2004.** Valorisation des produits et sous-produits ligneux dans la partie nord d'Aguié «cas du terroir villageois de Dan Saga» mémoire (Diplôme d'Ingénieur des Techniques Agricoles), Université Abdou Moumouni, 67p.
- Sader, S., Bertran, M., Wilson, E. (2003).** Satellite change detection of forest harvest patterns on an industrialforest landscape. *Forest Science*, 49:341–353.
- Safriel, U. Adeel, Z. (2005).** Dryland Systems. In: *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends Volume 1*. Hassan, R., Scholes, R. and Ash, N., (eds). Washington, DC: Island Press. p. 623–62.
- Sala, O.E. y Austin, A. 2000.** Methods of estimating aboveground net primary productivity. Pp. 31-43 en: *Methods in Ecosystem Science*. Springer. New York. Sala, O.E.; Jackson, R.B.; Mooney, H.A. & Howarth, R.H. (Eds.)
- Salihu SO, Usman AA (2015)** Antimicrobial and phytochemical study of the bioactive fractions of *Guiera senegalensis* from Alasan Tambuwal, Nigeria. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 6: 106-111.25.
- Sallau A, Njoku G, Olabisi A, Wurochekke A, Abdulkadir A, (2005)** Effect of *Guiera senegalensis* leaf extract on some *Echis carinatus* venom enzymes. *J Med Sci* 4: 280-283.
- Salopek, P., 2008.** Lost in the Sahel. *National Geographic* April.
- samba, S.A.N., Camiré, C., Margolis, H.A., 2001. Allometry and rainfall interception of *Cordyla pinnata* in a semi-arid agroforestry parkland. *Senegal. For. Ecol. Manage* 154, 277–288.
- Samuel Abasiba y Joshua Adombire, 2019:** FMNR Restaura la cosecha de termitas para alimento de aves de corral en Talensi, Gana *Documento de Proyecto Talensi Visión Mundial Ghana*

- Sánchez, M. 2016.** Análisis de Calidad Cartográfica mediante el estudio de la Matriz de Confusión. *Revista de Investigación*. Vol 2. Madrid –España. pp. 2.
- Sanou, J., Zougmore, R., Bayala, J., Teklehaimanot, Z., 2010.** Soil infiltrability and water content as affected by baobab (*Adansonia digitata* L.) and néré (*Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth.) trees in farmed parklands of West Africa. *Soil Use Manage* 26, 75–81.
- Sarria, F. A. (2006).** *Sistemas de Información Geográfica*. Universidad de Murcia.
- Sathaye, J.A., Makundi, W.R., Dale, L., Chan P. and Andrasko, K. 2006.** A Dynamic Partial-equilibrium Model for Estimating Global Forestry GHG Potential, Costs and Benefits. In: *The Energy Journal*, Special Issue, pp. 94–125.
- Scarabotti, D.S.; Feldman, S.R. y Refp, R. 2002.** Evaluación de distintos métodos para estimar la biomasa aérea en macollas de *Spartina Argentinensis*. *Parodi. PASTOS*, Vol. XXXII, T 1, pp. 69-79.
- Schlegel, B. (2001).** Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia – Chile. Universidad Austral de Chile. p. 1- 13.
- Schoeneberger MM (2009)** Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agroforest Syst* 75:27–37
- Schroth, G., D'Angelo, S. A., Teixeira, W. G., Haag, D. et Lieberei, R. 2002.** Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 163: 131-150.
- Seaquist, J. W., Hickler, T., Eklundh, L., Ardo, J., Heumann, B. W. (2009).** Disentangling the effects of climate and people on Sahel vegetation dynamics. *Biogeosciences*, 6(3), 469-477.
- Segura, M., Kanninen M.2002.** Inventarios para estimar Carbono en ecosistemas forestales tropicales. Central. Turrialba: CATIE.Pp. 202-222.
- Sendzimir, J., Reij, C. P., & Magnuszewski, P. (2011).** Rebuilding resilience in the Sahel: Regreening in the Maradi and Zinder regions of Niger. *Ecology and Society*, 16(3), 1.
- Sharma, A. K. (2005).** The potential for organic farming in the drylands of India. *Arid Lands Newsletter*. No. 58. 2-9.

**Sharrow SH, Ismail S (2004)** Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforest Syst* 60:123–130

**Shettima YATM, Karumi Y, Sodipo OA (2012)** Phytochemical and Antidiarrhoeal Properties of Methanol root Extract of *Guiera senegalensis* J.F .Gmel. *International Research Journal of Pharmacy* 11: 3.

**Sierra- Del Valle, J.C - Orrego, S.2003** Ecuaciones de biomasa de raíces en bosques primarios intervenidos y secundarios. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Pp 169-188.

**Sileshi G, Akinnifesi FK, Ajayi OC, Chakeredza S, Kaonga M, Matakala P (2007).** Contribution of agroforestry to ecosystem services in the miombo eco-region of eastern and southern African. *African Journal of Environmental Science and Technology* 1: 068-080.

**Sileshi G, Kuntashula E and Mafongoya PL (2006)** Effect of improved fallows on weed infestation in maize in eastern Zambia. *Zambia Journal of Agricultural Science*8: 6-12.

**Sileshi, G.W., 2016.** The magnitude and spatial extent of influence of *Faidherbia albida* trees on soil properties and primary productivity in drylands. *J. Arid Environ.* 132,1–14.

**Sinare, H., 2013.** Linking landscapes and livelihoods – ecosystem services as a lens in Sudano-Sahelian West Africa. Licentiate thesis in natural resources management, Stockholm Resilience Centre, Stockholm University.

**Sinsin, B., 2012.** Biodiversity and socioeconomic factors supporting farmers' choice of wild edible trees in the agroforestry systems of Benin (West Africa). *For. Policy Econ.* 14, 41–49.

**Sivakumar, M.V.K, Das, H.P. and Brunini, O. 2005.** Impacts of present and future climate variability and change on Agricultural and Forestry in the arid and semi-arid tropics. In: Salinger, J., Sivakumar, M.V.K. and Motha, R.P. (eds.), *Increasing Climate Variability and Change: Reducing the Vulnerability of Agriculture and Forestry*. Springer, USA

**Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G, Romanenkov V, Schneider U, Towprayoon S, Wattenbach M, Smith J (2008)** Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos Trans R Soc B-Biol Sci* 363:789–813

**Smith P, Wollenberg E 2012** : Achieving mitigation through synergies with adaptation. In Climate Change Mitigation and Agriculture. Edited by Wollenberg E, Nihart A, Tapio-Bostrom M-L, Grieg-Gran M. London-New York: ICRAF-CIAT; 2012:50-57.

**Smith P, Martono D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Olge S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O (2007)** Agriculture. In: Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA (eds.) Climate change 2007: mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 497–540

**Smucker, GR; Timyan, JC. 1995.** Impact of Tree Planting in Haiti: 1982-1995. Work performed under USAID Contract No. 521-0217-C-0004-00, Unpublished internal USAID study.

**Snowdon, P., Raison, J., Keith, H., Ritson, P., Grierson, P., Adams, M., Montagu, K., BI, H., Burrows, W. & Eamus, D. 2002.** National carbon accounting system: Protocol for Sampling Tree and Stand Biomass. The lead Commonwealth agency on greenhouse matters. 76pp

**Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., Plaza, A., Guanter, L., J., M., Martínez, P. (2009).** Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: Case study of proba/chris data over an agricultural area. Sensors, 9:768–793.

**Somarriba E. & Harvey C. 2003.** ¿Como integrar simultáneamente producción sostenible y conservación de la biodiversidad en cacaotales orgánicos indígenas? Agroforestería en las Américas 10 (37-38).

**Somboro AA, Patel K, Diallo D, Sidibe L, Chalchat J, (2011)** An ethnobotanical and phytochemical study of the African medicinal plant *Guiera senegalensis* JF Gmel. J Med Plants Res 9: 1639-1651.

**Sourabié T, Some N, Bognonou O, Ouattara Y, Ouédraogo J (2013)** Ethnobotanical and ethnopharmacognostical survey on medicinal plants of Malon village and surrounding in the Cascades Region (Burkina Faso). IOSR Journal of Pharmacy pp: 11-15

**Sousa, J.R. Marques da Silva, A.C. Gonçalves, P.A. Mesquita, L.L. Silva, F. Batista. (2013).** Estimación de La Biomasa forestal para las especies *Quercus Rotundifolia* y *Quercus Suber* basada en imágenes del satélite Quickbird. XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección INTA, Torrejón de Ardoz (Madrid). 22-24 octubre, 2013.

**Stern, N., 2007.** El informe Stern: la verdad del cambio climático. Barcelona: Paidós.

**Steve, F., Milliman, T., Seto, K., Friedls, M. (2013).** A global fingerprint of macro-scale changes in urban structure from 1999 to 2009. *Environm Research Letters*, 2(8):024004.

**Stige, L.C., Ottersen, G., Brander, K., Chan, K.-S. and Stenseth, N.C. 2006.** Cod and climate: effect of the North Atlantic Oscillation on recruitment in the North Atlantic. *Marine Ecological Programme Series 325*: 227–241.

**Stokes, A., Atger, C., Bengough, A. G., Fourcaud, T. and Sidle, R. C. 2009.** Desirable root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant Soil*, 324:1- 30.

**Suleiman MM, Mamman M, Sidiama A, Igboja EJ, Tauheed M, (2014)** Evaluation of anthelmintic activity of Nigerian ethnoveterinary plants; *Cassia occidentalis* and *Guiera senegalensis*. *Veterinary World* 7:3.

**Syampunani, S., P.W. Chirwa, F.K. Akinnifest & O.C. Ajayi. 2010.** The potential of using agroforestry as a win-win solution to climate change mitigation and adaptation and meeting food security challenges in Southern Africa. *Agricultural Journal* 5:80-88.

**Sedjo, R., Sohngen, B. 2012.** Carbon sequestration in forests and soils. *Annual Review of Resource Economics* 4 (4): 126-143.

**Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M.,2013.** The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture Ecosystems and Environment* 164, 80-99.

**Schlegel B, J Gayoso, J Guerra. 2000.** Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: Manual de procedimientos: Muestreos. Proyecto FONDEF D98I1076. Ministerio de Educación de Chile. 26 p.

**Seignobos, C., Marzouk, Y. et Sigaut, F. 2000.** Outils aratoires en Afrique : innovations, normes et traces. Paris: Institut de recherche pour le développement / Karthala.

**Salhi, S., Fadli, M., Zidane, L., Douira, A., 2010.** Études floristique et ethnobotanique des plantes médicinales de la ville de Kénitra (Maroc). *Lazaroa* 31: 133-146.

**Shibu, J. (2009).** Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76, 1-10. doi: 10.1007/s10457-009-9229-7

- t'Mannetje. 2000.** Measuring biomass of grassland vegetation in Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production, Edited by, L. t'Mannetje and R.M. Jones. cap. 7.
- Tagesson T. (2015).** Ecosystem properties of semiarid savanna grassland in West Africa and its relationship with environmental variability. *Global Change Biol.*, 21, 250-264.
- Takagi, K., Yone, Y., Takahashi, H., Sakai, R., Hojyo, H., Kamiura, T., Oguma, H. (2015).** Forest biomass and volume estimation using airborne LiDAR in a cool-temperate forest of northern Hokkaido, Japan. *Ecological Informatics*, 26, 54–60. <http://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.01.005>
- Takimoto A, Nair PKR, Alavalapati JRR (2008a)** Socioeconomic potential of carbon sequestration through agroforestry in the West African Sahel. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 13:745–761
- Takimoto A, Nair PKR, Nair VD (2008)** Carbon stock and sequestration potential of traditional and improved agroforestry systems in the West African Sahel. *Agric Ecosyst Environ* 125:159–166.
- Takimoto A, Nair PKR, Nair VD (2008b)** Carbon stock and sequestration potential of traditional and improved agroforestry systems in the West African Sahel. *Agric Ecosyst Environ* 125:159–166
- Tambo, J.A., Abdoulaye, T., 2013.** Smallholder farmers' perceptions of and adaptations to climate change in the Nigerian savanna. *Reg. Environ. Chang.* 13, 375–388.
- Tao, S., Guo, Q., Li, L., Xue, B., Kelly, M., Li, W., Su, Y. (2014).** Airborne Lidar-derived volume metrics for aboveground biomass estimation: A comparative assessment for conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198-199, 24–32. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.07.008>
- Tappan, G., McGahuey, M., 2007.** Tracking environmental dynamics and agricultural intensification in southern Mali. *Agricultural Systems* 94, 38e51.
- Teklehaimanot, Z., 2004.** Exploiting the potential of indigenous agroforestry trees: *Parkia biglobosa* and *Vitellaria paradoxa* in sub-Saharan Africa. *Agrofor. Syst.* 61–62, 207–220.
- TAITA P., 2003,** Use of woody plants by locals *in: Mare aux hippopotames Biosphere Reserve in western Burkina Faso. Biodiv. and Conserv.* 12, 1205-1217

- Tabuti, J, R, S., Lye, k.a., Dhillion, S, S., 2003.** Traditional herbal drugs of Bulamogi, Uganda: plants, use and administration. *J. Ethnopharmacology*. 88: 19-44
- Tesfaye Shiferaw Sida, Frédéric Baudron, Haekoo Kim, Ken E. Giller, 2017.** Climate-smart agroforestry: *Faidherbia albida* trees buffer wheat against climatic extremes in the Central Rift Valley of Ethiopia. Disponible en
- Tewkesbury, A. P., Comber, A. J., Tate, N. J., Lamb, A., & Fisher, P. F. (2015).** A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques. *Remote Sensing of Environment*, 160, 1-14.
- Thangata, P., M. Mudhara, C. Grier & P. Hildebrand. 2008. **Potential for agroforestry adoption in Southern Africa: A comparative study of improved fallow and green manure adoption in Malawi, Zambia and Zimbabwe.** *Ethnobotany Research & Applications* 5:67-75.
- Thiery, J.M., d'Herb`es, M., Valentin, C., 1995:** A Model Simulating the Genesis of Banded Vegetation Patterns in Niger". *Journal of Ecology*, 83, 497-507.
- Thiombiano A., Schmidt M., Kreft H., Guinko S., 2006.** Influence du gradient climatique sur la distribution des espèces de Combretaceae au Burkina Faso (Afrique de l'Ouest). *Candollea*, 61 : 189-213.
- Thiombiano, D.N.E., Lamien, N., Dibong, D.S., Boussim, I.J. & Belem, B. (2012).** Le rôle des espèces ligneuses dans la gestion de la soudure alimentaire au Burkina Faso. *Sécheresse*; 23 : 86–93.
- Thomson AM, Calvin KV, Chini LP, Hurtt G, Edmonds JA, Bond-Lamberty B, Frolking S, Wise MA, Janetos AC (2010)** Climate mitigation and the future of tropical landscapes. *Proc Natl Acad Sci U S A* 107:19633–19638.
- Thorlakson T, Neufeldt H 2012:** Reducing subsistence farmers' vulnerability to climate change: evaluating the potential contributions of agroforestry in Western Kenya. *Agric Food Security* 2012, 1:15
- Thornton P, Lipper L (2013):** How does climate change alter agricultural strategies to support food security? Background paper for the conference 'Food Security Futures: Research Priorities for the 21st Century', 11–12 April 2013, Dublin, 2013.

**Throop, H.L., Archer, S.R., 2008.** Shrub (*Prosopis velutina*) encroachment in a semidesert grassland: spatial–temporal changes in soil organic carbon and nitrogen pools. *Glob. Chang. Biol.* 14, 2420–2431.

**Tomppo, E., Nilsson, M., Rosengren, M., Aalto, P. & Kennedy, P. 2002.** Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass. *Remote Sensing of Environment*, 82, pp. 156–171

Torquebiau, E. (2013) *Agroforestry and Climate Change*, **FAO Webinar, 5 February 2013, CIRAD. Agricultural Research for Development**

**Torres J., Tenorio A. & Gómez A. 2008.** Agroforestería: una estrategia de adaptación al cambio climático propuesta de adaptación tecnológica del cultivo de café y cacao en respuesta al cambio climático en San Martín. Ed. Soluciones Prácticas-ITDG. Lima, Perú. 124 p.

**Torres, J.M. y A. Guevara. 2002.** El potencial de México para la producción de servicios ambientales: Captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*, abril-junio, número 063. Instituto Nacional de Ecología, Distrito Federal, México. Pp 40-59

**Tovar, C. M. (2012).** El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva: Revista Internacional de Silvicultura E Industrias Forestales*, (238), 39–46

**Towers, P. 2002.** Conceptos Iniciales sobre Teledetección y su Aplicación al Agro. Buenos Aires, 138 p.

**Traoré, K. 2003.** Le parc à Karité: Sa contribution à la durabilité de l'agrosystème. Cas d'une toposéquence à Konobougou (Mali-Sud). Thèse de Doctorat, ENSAM, Montpellier, 216 p.

**Treitz, P. Rogan, J. (2004).** Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change: an introduction. *Progress in Planning*, 61:269–279.

Trexler, M.C. y Haugen, C. 1995. Keeping it green: evaluating tropical forestry strategies to mitigate global warming. World Resources Institute. EE.UU.

**Trumper K., Raviliuos C., Dickson B. (2008).** Carbon in Drylands: Desertification, Climatic Change and Carbon Finance. A UNEP-UNDP-UNCCD Technical Note for Discussions at CRIC 7, Istanbul, Turkey, 3-14 November 2008. 1-9.

- Tschakert P (2004)** Carbon for farmers: assessing the potential for soil carbon sequestration in the old peanut basin of Senegal. *Clim Chang* 67:273–290.
- Tschakert P (2004a)** Carbon for farmers: assessing the potential for soil carbon sequestration in the old peanut basin of Senegal. *Climate Change* 67:273–290
- Tschakert, P., Sagoe, R., Ofori-Darko, G., Codjoe, S. N. (2010)**. Floods in the Sahel: an analysis of anomalies, memory, and anticipatory learning. *Climatic Change*, 103(3-4), 471–502.
- Tucker, C. J. (1979)**. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- Tahri, N., EL Basti, A., Zidane, L., Rochdi, A., Douira, A., 2012**. Etude Ethnobotanique des plantes médicinales dans la province De Settat (Maroc). *Journal of Forestry Faculty Kastamonu Üni., Orman Fakültesi Dergisi*, 12 (2): 192-208.
- Tougiani A, Guero C, Rinaudo T, 2009**. Community mobilisation for improved livelihoods through tree crop management in Niger. *Geo Journal*, 74: 377-389.
- UNFCCC (2006)** Revised simplified baseline and monitoring methodologies for selected small-scale afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism. Bonn. Available at
- UNFCCC (2007)** Report of the conference of parties on its thirteenth session, Bali, Indonesia. United nations framework convention on climate change, Geneva.
- United Nations World Food Program (2005)**. “WFP’s Niger appeal triples to help 2.5million people facing extreme hunger”.
- UNESA, (2005)**. Forestación y Reforestación. Sumideros de Carbono. En: Metodologías para la Implementación de los Mecanismos flexibles de Kioto – Mecanismo de Desarrollo Limpio en Latinoamérica.
- UNDP, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DESA), (2017)**. Proyecciones demográficas probabilistas basadas en el “World Population Prospects: The 2017 Revision”. División de la Población DESA. Disponible en: <https://population.un.org/wpp/>
- Vagen, T.G., Lal, R., and Singh, B.H., 2005**. Soil Carbon Sequestration in Sub-Saharan Africa: A Review. *Land Degradation and Development*, 16: 53-71.
- Valentin, C. & d’ Herb`es, J.M., 1999**: “Niger tiger bush as a natural harvesting system”. *Catena*, 37, 231-256.

- Vargas, O. y F. Mora. 2007.** La restauración ecológica. Su contexto, definiciones y dimensiones. En: O. Vargas (ed). Estrategias para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia – Colciencias. Pp. 14-32.
- Valenzuela H., T. 2001.** Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Distrito Federal. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 127 p.
- Vallejo, Joyas; M.I; Londoño, A.C; López, R.; Galeano, G; Alvarez, E Y Devia, W. (2005).** Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá – Colombia. 310 p y 277 p.
- Van Noordwijk M, Ong CK (1999)** Can the ecosystem mimic hypotheses be applied to farms in African savannahs? *Agrofor Syst* 45:131–158
- Vandenbelt, R. J. (ed) (1992) :** *Faidherbia albida* in the West African semi-arid tropics : proceedings of a workshop, 22-26 April 1991, Niamey, Niger.
- Vanlauwe, B. Kihara J, Chivenge P, Pypers P, Coe R, 2005.** *Sennasiamea* trees recycle Ca from a Ca-rich subsoil and increase the topsoil pH in agroforestry systems in the West African derived savanna zone. *Plant and Soil*, 269: 285-296.
- Velásquez, A., Durán, E., Larrasábal, A., López, F., & Medina, C. (2010).** La Cobertura Vegetal y los Cambios e Uso de Suelo. *Publicación México*,5.
- Verchot, LV; Van Noordwijk, M; Kandji, S; Tomich, T; Ong, C; Albrecht, A; Mackensen, J; Bantilan, C; Anupama, KV; Palm, C. 2007.** Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Global Change* 12:901-918.
- Vidal, A.; Benítez, Y.; Carlos, R. y Gra, H. 2004.** Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la EFI La Palma de la Provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho*. 11:60-66.
- Vine, E; Sathaye, J; Makundi, W. 1999.** Guidelines for the monitoring, evaluation, reporting, verification, and certification of forestry projects for climate change mitigation. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. 125p.
- Virginia, R., Wall, D. (2001).** Principles of Ecosystem function. *Encyclopedia of Biodiversity* 2:345–352.
- Vlek, P. L. G., Le, Q. B and Tamene, L. (2008).** Land Decline in Land-Rich Africa: A Creeping Disaster in the Making. CGIAR Science Council Secretariat. Rome.

- Vrieling, A., de Leeuw, J., Said, M. (2013).** Length of Growing Period over Africa: Variability and Trends from 30 Years of NDVI Time Series. *Remote Sensing*, 5(2), 982–1000.
- Walker, S.M. and Desanker, P.V., 2004.** Impact of land use on soil carbon in Miombo woodlands of Malawi Forest Ecology and Management, 203: 345-360.
- Walker, S; Brown, S. 2007.** Procedimientos operativos estándares para la estimación de carbono. Winrock internacional. Virginia, USA. 50 p.
- Walker, W., Baccini, A., Nepstad, M., Horning, N., Knight, D., Braun, E., & Bauch, A. (2011).** Guia de campo para la Estimation de Biomasa y Carbono forestal. Falmouth, Massachusetts, USA: Woods Hole Research Center.
- Walkley A, Black A 1947.** A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soil. Effect of variations in digestion conditions and inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63:251-263
- Washington DC: International Food Policy Research Institute**
- Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranathan NR, Verardo DJ, Dokken DJ (2000)** IPCC special report on landuse, land use change, and forestry. Available at [http://www.rida.no/climate/ipcc/land\\_use/](http://www.rida.no/climate/ipcc/land_use/).
- WeitzMan, M. (2007):** «A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change». *Journal of Economic Literature*, vol. XLV: 703-724
- Wezel A, Rajot JL, Herbrig C. 2000.** Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *J Arid Environ.* 44:383–398.
- Wezel, A., 2000.** Scattered shrubs in pearl millet fields in semiarid Niger: effect on millet production. *Agrofor. Syst.* 48, 219–228.
- Wezel, A., and Haigis, J. (2000).** Farmers' Perception of Vegetation Changes in Semi-arid Niger. *Land Degradation and Development* 11: 523–534.
- Wezel, A., and Lykke, A. M. (2006).** Woody Vegetation Change in Sahelian West Africa: Evidence from Local Knowledge. *Environmental Development and Sustainability* 8: 553–567.
- White, L.P. (1970)** 'Brousse tigrée' pattern in southern Niger. *Journal of Ecology*, 58, 54
- Wiegand, K., Ward, D., Saltz, D., 2005.** Multi-scale patterns and bush encroachment in an arid savanna with a shallow soil layer. *J. Veg. Sci.* 16, 311–320.
- Williams E, Barminas J, Akinniyi J, William A (2009)** Antidiarrhoeal effects of the root

extracts of *Guiera senegalensis* in male mice. *African Journal of Pure and Applied Chemistry* 8: 152-157.

**Woomer PL, Tieszen LL, Tappan G, Touré A, Sall M (2004)** Land use change and terrestrial carbon stocks in Senegal. *J Arid Environ* 59:625–642.

**Woomer PL, Tieszen LL, Tappan G, Touré A, Sall M (2004a)** Land use change and terrestrial carbon stocks in Senegal. *J Arid Environ* 59:625–642

**Woomer PL, Touré A, Sall M (2004b)** Carbon stocks in Senegal's Sahel transition zone. *J Arid Environ* 59:499–510

**Woomer, P., Touré, A., Sall, M., 2004.** Carbon stocks in Senegal's Sahel transition zone. *J. Arid Environ.* 59, 499–510.

**Woomer, P.L., 2005.** The impact of cultivation on carbon fluxes in woody savannas of Southern Africa. *Water, Air, and Soil Pollution* 70(1-4): 403-412.

Woomer, P.L., Tieszen, L.L., Tappan, G., Toure, A. and Sall, M. (2004) '**Land Use Change and Terrestrial Carbon Stocks in Senegal**', *Journal of Arid Environments*, **59:625-642**

**World Bank. (2013).** World Bank approves funds to boost Niger's resilience to natural hazards and climate change.

World Bank 2012. *Carbon Sequestration in Agricultural Soils No. 67395-GLB.*

**World Meteorological Organization. (2006).** Regional workshop on improved meteorological and hydrological forecasting for floods in West and Central African countries. Retrieved from

**Wu, T., Schoenau, J.J., Li, F., Qian, P., Malhi, S.S., Shi, Y., 2005.** Influence of fertilization and organic amendments on organic-carbon fractions in Heilu soil on the loess plateau of China. *J. Plant Nut. Soil Sci.* 168, 100–107.

[www.wfp.org/english/?moduleid=137&key=1355](http://www.wfp.org/english/?moduleid=137&key=1355).

**Yélé mou B, Yaméogo G, Koala J, Bationo BA, Hien V. 2014.** Influence of the leaf biomass of *Piliostigma reticulatum* on Sorghum production in North Sudanian Region of Burkina Faso. *J Plant Studies.* 3:1.

**Yves-AB., Janat A., Mamyrbekova B., Boua BB., Fézan H., Tra B., Ehouan EE., 2007.** Étude ethnobotanique et screening phytochimique de *Caesalpinia benthamiana* (Baill.) Herend. Et Zarucchi (Caesalpiniaaceae). *Sciences et Nature*,. 4 (2): 217 – 225

**Zamora C., J.C. 2003.** Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido "La Majada" municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis

de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México. 47 p.

**Zerbo, P., Rasolodimby, J.M., Ouedraogo O.G.N. & Van Damme P., 2011.** Plantes médicinales et pratiques médicales au Burkina Faso : cas des Sanan. *Bois et forêts des tropiques*, N° 307 (1).

**Zhu, Z., Wang, S., Woodcock, C.E., 2015.** Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and sentinel 2 images. *Remote Sens. Environ.* 159, 269–277.

**Zianis, D., Muukkonen, P., Makipaa, R. and Mencuccini, M. 2005.** Biomass and stem volumen equations for tree species in Europe. *Silva Fennica* (Monographs 4): pp. 1-63.

**Zomer RJ, Trabucco A, Coe R, Place F, 2009:** Trees on Farm: Analysis of Global Extent and Geographical Patterns of Agroforestry. ICRAF Working Paper No. 89. Nairobi, Kenya: World Agroforestry Centre; 2009.

Zorom, M., Barbier, B., Mertz, O. and Servat, E. (2013) **‘Diversification and Adaptation Strategies to Climate Variability: A Farm Typology for the Sahel’**, *Agricultural Systems*, 116:7-15.

### **Páginas de internet**

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.013>.

<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

[http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Global\\_ES/SEMJH5TWT1H\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEMJH5TWT1H_0.html)

[http://www.pim.cgiar.org/files/2013/03/ClimateChangeAndFoodSecurity\\_PrioritiesForPublicResearch.pdf](http://www.pim.cgiar.org/files/2013/03/ClimateChangeAndFoodSecurity_PrioritiesForPublicResearch.pdf).

[http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/documents/FFI/NiameyFinal\\_report.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/documents/FFI/NiameyFinal_report.pdf)

<http://www.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/BL17569.pdf>

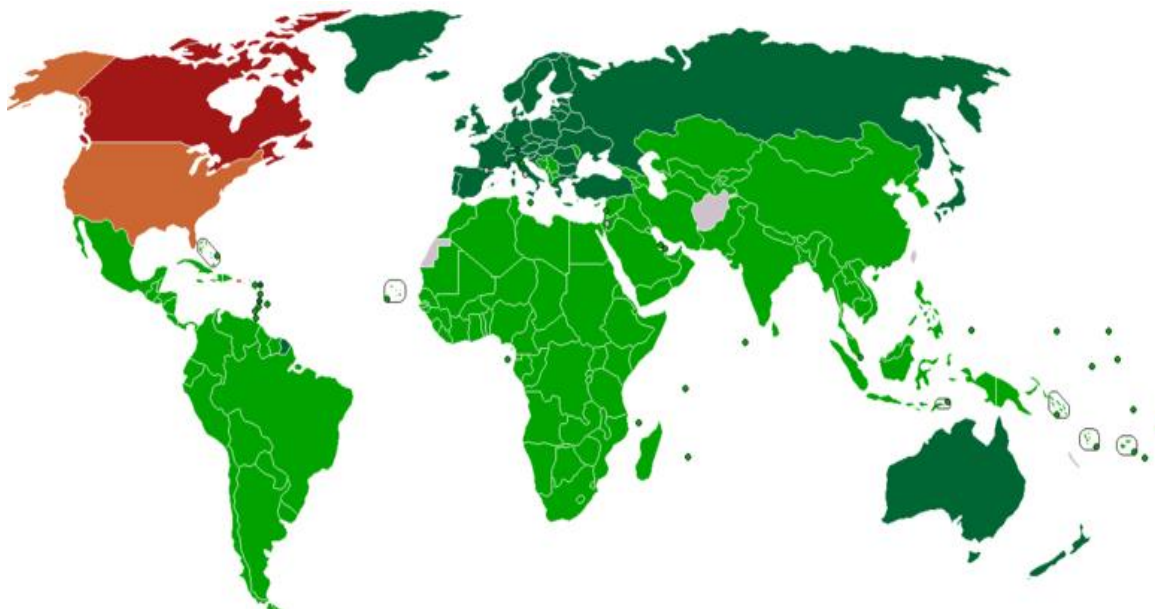
<https://cgspace.cgiar.org/rest/bitstreams/58510/retrieve>

<https://www.fisterra.com/mbe/investiga/kappa/kappa2.pdf>

[https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/doc/Aspectos\\_tecnicos\\_landsat.pdf](https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/doc/Aspectos_tecnicos_landsat.pdf)

## ANEXOS

**ANEXO1:** Posición de los diversos países en 2011 respecto del Protocolo de Kioto.



Fuente: Kyoto Protocol participation map 2010.

Firmado y ratificado (Anexo I y II).  Firmado y ratificado.  Firmado, pero con ratificación rechazada.  Abandonó.  No posicionado.

## **ANEXO 2: LAS ENCUESTAS**

### A- HOJA DE ENCUESTA INDIVIDUAL

Departamento de:.....

Municipio de:.....

Pueblo de:.....

a) Unidad familiar:

Nombre y Apellidos:

Sexo: M   F  Edad

Estado civil: Casado   Soltero  Viudo

Número de personas a cargo:

Actividades económicas:

Agricultura..... Ganadería..... Artesanía..... Comercio.....

b) Recursos de la vivienda – especies de cultivos

Tipo de tierra: Huertos   Campo

Número:                      área:

Distancia desde el campo al pueblo:

0-500m.....500-1000m.....1000-1500m.....1500-2000m.....más de 2000m.....

Modo de adquisición de tierras:

Heredad.....Compra.....Préstamo.....Donación.....Alquiler.....

c) Técnicas de manejo del suelo

¿Conoces la RNA? Si..... No.....

¿La practicas? Si.....No.....

Si es sí, ¿por cuánto tiempo? ¿Cuántos árboles existen en su campo?

¿Son naturales? Si.....No.....

¿Cuántos árboles plantaste o escoger?

¿Por qué practican la RNA?

¿Cuáles son las técnicas que utilizan en el mantenimiento de la RNA?

¿Cuáles son las principales limitaciones relacionadas con la práctica de la RNA?

¿Cuáles son los diferentes usos que usted hace de la madera de la RNA?

¿Cuáles son los diferentes usos que usted hace del producto no leñoso (hojas, frutos etc) de la RNA?

¿Cuál es la contribución de la RNA en la dieta de la familia?

¿Cuál es la contribución de la RNA en la dieta de los animales?

¿Cómo usted aprecia la técnica con RNA o sin RNA en el campo?

B- HOJA DE ENCUESTA GRUPAL

Fecha:

Departamento de:.....

Municipio de:.....

Pueblo de:.....

Número de habitantes:

Número de participantes:                      Mujeres:                      hombres:

a) Estudio de la práctica de la RNA:

¿Conocen la RNA? Si..... No.....

¿La practican? Si.....No.....

Si es No                      ¿Por qué?

Si es Si                      ¿Cuáles son las especies que se mantienen?

1..... 2..... 3.....

4..... 5..... 6.....

7.....

¿Por qué la selección de estas especies?

¿Cuáles son las especies dominantes?

¿Existe una Junta de gestión de la RNA? ¿Si es sí cómo funciona?

¿Hay un mercado de los árboles en el pueblo? ¿Cuál es el precio?

¿Pueden comparar la situación en sus campos antes de la RNA y hoy?

¿Cuáles son los cambios notables?

¿Qué cambios han notado en el caso de las precipitaciones?

¿Cuáles son las principales limitaciones relacionadas con la práctica de la RNA?

b) Valore de 1 a 10 su grado de satisfacción con la práctica de RNA (1 representa la máxima insatisfacción y 10 la máxima satisfacción). Marcar con una cruz.

grado de satisfacción	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RNA										

### **ANEXO 3: Respuestas de las encuestas**

grado de satisfacción con la práctica de RNA (1 a 10)	10
Cuáles son los diferentes usos que usted hace de los productos de la RNA	para la familia, para los animales
Cuáles la más abundante	GUERA
hay muchas especies de RNA en el campo	Si
por cuánto años practicas la RNA	0-3
Manejo del uso de suelo	Con RNA
Número de Campo	más de 1
Modo de adquisición de tierras	Herencia
Actividades económicas	Agricultura
Número de personas a cargo	más de 7
Lugar de nacimiento	FAKARA
Sexo	Hombre
Nombre y apellidos	AKIKOU MOUSSA

10	9	10	6	10	10	9	10	10	10	10	10	9	9
para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para la familia	para los animales	para los animales	para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para la familia
GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA
SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
0-3	0-3	más de 3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3
Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA
más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1
Préstamo	Heredad	Heredad	Heredad	Heredad, Préstamo	Heredad, Préstamo	Heredad, Préstamo	Préstamo	Heredad	Heredad	Heredad	Heredad	Préstamo	Heredad
Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura
1-7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	1-7	1-7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7
FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA
Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre
MOUNKEIL AIBRAHIM	AMADOU MOUSSA	HALIDOU ABDU	ABDOU SEYDOU	ISSOUFOU NOUHOU	MAROU ADAMOU	ABDOU HAMMANI	OUSEINI MOUSSA	ABDOU HAROUNA	HAMIDOU GADOU	SEYNI SEYDOU	ISSAKA TONKO	ADAMOU MOUSSA	

9	9	8	6	10	10	10	10	9	9	10
para la familia	para los animales	para los animales	para los animales	para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales
GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA
SI	No	No	No	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
0-3	0-3	0-3	0-3	más de 3	más de 3	0-3	más de 3	más de 3	más de 3	más de 3
Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA
más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1
Heredad	Heredad	Heredad	Heredad	Heredad	Heredad	Heredad	Heredad	Heredad	Heredad, Préstamo	Heredad
Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura
más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	1-7	más de 7	más de 7	más de 7	1-7	más de 7
FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	FAKARA	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU
Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre
GARBA MOUSSA	OUMAROU SEIDOU	OUSMANE SEYDOU	ISSOUFOU MOUSS	IBRAHIM SADOU	SEVNI HAMANI	ALMOCTAR HAMADOU	ADAMOU SEVNI	BASSIROU NOUHOU	KOUDOU MOUSSA	HAMANI DJIBO

9		9	9	10	9	10	9	9	9	9
	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales
GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	OTRAS
No	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	Si	No
0-3	más de 3	0-3	más de 3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3
Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA
más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1
Heredad	Heredad	Préstamo	Préstamo	Compra, Préstamo	Préstamo	Préstamo	Compra, Préstamo	Préstamo	Préstamo	Préstamo
Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura
1-7	más de 7	1-7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7
DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU
Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre
SOULEY ADAMOU	HASSAN DJIBO	MOUNKEILA TAHIROU	MOUSSA HAMIDOU	HASSAN SALATIKOYE	ADAMOU HAMIDOU	YAVÉ HASSAN	IDÉ ABDOU	MOUSSA HIMMA	KIMBA HIMMA	

10	8	10	8	9	9	8	9	9	8
para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para la familia, para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales
GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA
Si	No	No	No	Si	No	No	No	No	No
más de 3	más de 3	más de 3	0-3	0-3	0-3	más de 3	0-3	0-3	0-3
Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA
más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	1	más de 1
Heredad, Compra	Compra	Heredad, Compra, Préstamo	Heredad, Compra	Heredad	Heredad	Heredad, Compra	Heredad, Préstamo	Compra	Heredad
Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio
más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	1-7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7
DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	DANCHANDOU	FALMEY
Hombre	Mujer	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Mujer	Hombre	Hombre
SEYNI DJIBO	RAMOU MOUSSA	AMINOUBOUKARI	DIBO IDÉ	MOUSSAZAKARI	BADIO SOULEY	KIMBA ABDOU	ADAWA IDE	NASIROUGARBA	SOULEYMAN E SAIDOU

8	para los animales	8	para los animales	8	para los animales	8	para los animales	10	para la familia, para los animales	10	para la familia, para los animales	8	para los animales	10	para la familia, para los animales	9	para los animales	9	para los animales	10	para la familia, para los animales	10	para los animales
GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA
No	No	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
0-3	0-3	0-3	0-3	más de 3	más de 3	más de 3	más de 3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	más de 3	más de 3	más de 3
Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA
más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1
Préstamo	Herencia	Herencia	Herencia	Préstamo	Herencia	Préstamo	Herencia	Préstamo	Herencia	Préstamo	Herencia	Préstamo	Herencia	Préstamo	Herencia	Préstamo	Herencia	Herencia	Herencia	Herencia	Herencia	Herencia	Herencia
Agricultura	Agricultura	Agricultura , Comercio	Agricultura , Comercio	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura	Agricultura
1-7	1-7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7
FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY
Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre
AMADOU ALI	HASSAN SEYDOU	HASSAN HAMIDOU	MOUNKAIL A MOUSSA	MOUSSA SOUMANA	SOUMAILA MOUSSA	BOUBACAR ZAKARI	YACOUBA HASSOUMI	MOUSSA MAROU	HASSAN SEYNI	IDE HAMADOU	MOUSSA YOUNOUSSA												

10	10	10	10	10	10	9	8	10	8	9	10
para la familia, para los animales	para los animales	para la familia	para los animales	para la familia	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales	para los animales
GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA	GUIERA
SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	No	No	No
0-3	más de 3	más de 3	más de 3	0-3	0-3	más de 3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3
Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA	Con RNA
más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1	más de 1
Herencia, Compra	Préstamo	Herencia	Herencia	Préstamo	Herencia	Herencia	Herencia	Herencia	Herencia	Herencia	Herencia
Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura	Agricultura, Comercio	Agricultura	Agricultura, Comercio	Agricultura	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura, Comercio	Agricultura
más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7	más de 7
FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY	FALMEY
Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre	Hombre
HAMA MOUSSA	ADAMOU GADOU	SEYBOU HALIDOU	ABDOULAVE YACOUBA	KOUDOU AMADOU	HASSAN IDE	HASSOUMI HAMADOU	SOULEY MOUSSA	YACOUBA ABDOU	MOUSSA DJIBO	NOUHOU DJIBO	

**ANEXO 4: Nombre científico de las especies de la zona de estudio.**

N°	Nombre científico	Nombre local	Familia
1	<i>Piliostigma reticulatum</i>	Kossey	Caesalpiaceae
2	<i>Guiera senegalensis</i>	Sabara	Combretaceae
3	<i>Annona senegalensis</i>	Mufa	Annonaceae
4	<i>Combretum glutinosum</i>	Kokorbey	Combretaceae
5	<i>Combretum micranthum</i>	Kubu	Combretaceae
6	<i>Combretum niggricans</i>	Déli	Combretaceae
7	<i>Combretum aculeatum</i>	Buburé	Combretaceae
8	<i>Calotropis procera</i>	Sagaye	Asclepiadaceae
9	<i>Cassia sieberiana</i>	Sisan	Caesalpiaceae
10	<i>Ziziphus mauritiana</i>	Darey	Rhamnaceae
11	<i>Azadirachta indica</i>	Turi forta	Meliaceae
12	<i>Acacia albida</i>	Gau	Mimosaceae
13	<i>Albizia Chevalieri</i>	Nkolo	Mimosaceae
14	<i>Acacia senegal</i>	Danga	Mimosaceae
15	<i>Acacia seyal</i>	Sakirey	Mimosaceae
16	<i>Acacia nilotica</i>	Baani	Mimosaceae
17	<i>Balanites aegyptiaca</i>	Garbey	Zygophyllaceae
18	<i>Bauhinia rufescens</i>	Nammary	Caesalpiaceae
19	<i>Boscia senegalensis</i>	Anza	Capparidaceae
20	<i>Boscia angustifolia</i>	Hasu	Capparidaceae
21	<i>Entenda africana</i>	Bâtala	Mimosaceae
22	<i>Prosopis africana</i>	Zam - turi	Mimosaceae
23	<i>Parkia biglobosa</i>	Dosso mari	Mimosaceae
24	<i>Parinari macrophylla</i>	Gamsa	Rosaceae
25	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Tôlo	Papilionaceae
26	<i>Detarium microcarpum</i>	Fantu	Caesalpiaceae
27	<i>Stereospermum</i>	Bâri turi	Bignoniaceae

	kunthianum		
28	Strychnos spinosa	Kulukulu	Logoniaceae
29	Sclerocarya birrea	Diney	Anacardiaceae
30	Terminalia avicennioïdes	Farka hanga	Combretaceae
31	Maytenus senegalensis	Marihanga	Celastraceae
32	Hyphaene thebaïca	Kangaunya	Palmae
33	Borassus aethiopum	Sabb izé	Palmae
34	Vitex doniana	Bôye	Verbenaceae
37	Adansonia digitata	Koo nya	Bombacaceae
38	Maerua angolensis	Buguhi	Capparidaceae
39	Croton zambesicus	Tondi bonhawey	Euphorbiaceae
40	Commiphora africana	Korombé	Burseraceae
41	Lannea microcarpa	Falunfa	Anacardiceae
42	Grewia bicolor	Saari	Tiliaceae
43	Cola laurifolia	Farka hanga	Sterculiceae

**ANEXO 5: Nombres de los pueblos donde se tomó las muestras de suelo.**

Departamentos	Pueblos	Uso de suelo
Fakara	Gobir Zanguina	Recuperación de los suelos
	Kobadaye	RNA
	Kodo	Sin RNA
		Con RNA
	Marouberizeno	Con RNA
		Sin RNA
	Kampa	Sin RNA
		Kampa RNA 30 años

Dantchandou		Con RNA
	Zornay	Con RNA
Falmey	Kiota	Kiota 2 frutales
		Kiota1 frutales
	Birnin ciudad	Birni frutales (9 variedades)
	Sakala Gonga	Con RNA
		Sin RNA
		Matorral denso
	Zoukoira	Sin RNA
		Con RNA
	Koumbourfou	Con RNA
		Matorral denso

**ANEXO 6: pH de las muestras del suelo.**

Departamentos	Pueblos	Uso de suelo	pH
Fakara	Kobadaye	Con RNA	5.99
	Kodo	sin RNA	6.6
		Con RNA	6.33
	Marouberizeno	RNA	6.32
		Sin RNA	6.2
	Kampa	Sin RNA	6.65
		RNA 30 años	6.48

Dantchandou		Con RNA	6.61
	Zornay	Con RNA	6.06
Falmey	Kiota	Kiota 2 frutales	7.52
		Kiota1 frutales	7.33
	Birnin ciudad	Birni frutales (9 variedades)	6.73
	Sakala Gonga	Con RNA	5.92
		Sin RNA	6.28
		Matorral denso	6.36
	Zoukoira	Sin RNA	6.58
		Con RNA	6.12
	Koumbourfou	Con RNA	6.53
		Matorral denso	6.3

Tabla 6: Promedio de los resultados de pH

Uso de suelos	Promedio	Desviación Típica
Frutales	7.19	0.41
Sin RNA	6.46	0.20
Con RNA	6.26	0.25
Matorral denso	6.33	0.04

**ANEXO 7: Caliza activa de las muestras del suelo.**

Departamentos	Pueblos	Uso de suelo	Concentración
Fakara	Kobadaye	Con RNA	17.25
	Kodo	Sin RNA	-34.5
		RNA	-23

	Marouberizeno	Con RNA	-17.25
		Sin RNA	-23
Dantchandou	Kampa	Sin RNA	-11.5
		RNA 30 años	-28.75
		Con RNA	-17.25
	Zornay	RNA	-17.25
Falmey	Kiota	Kiota 2 frutales	-11.5
		Kiota1 frutales	-34.5
	Birnin	Birni frutales (9 variedades)	-28.75
	Sakala Gongga	Con RNA	-17.25
		Sin RNA	-23
		Matorral denso	0
	Zoukoira	Sin RNA	-23
		Con RNA	-34.5
	Koumbourfou	Con RNA	0
		Matorral denso	-11.5

Tabla 7: Promedio de los resultados de la caliza activa

Uso de suelos	Promedio	Desviación Típica
Frutales	-24.91	11.96
Sin RNA	-23	8.13

Con RNA	-15.33	15.48
Matorral denso	-5.75	8.13

**ANEXO 8: Materia orgánica de las muestras de suelo**

<b>Departamentos</b>	<b>Pueblos</b>	<b>uso de suelo</b>	<b>Materia orgánica</b>
Fakara	Kobadaye	Con RNA	1.67127424
	Kodo	Sin RNA	1.30421674
		Con RNA	2.2196329
	Marouberizeno	Con RNA	1.33053558
		Sin RNA	0.98251928
			Sin RNA

Dantchandou	Kampa	RNA 30 años	1.86641756
		Con RNA	1.75620619
	Zornay	Con RNA	1.11758575
Falmey	Kiota	Kiota 2 frutales	2.06104889
		Kiota1 frutales	1.82369168
	Birnin cuidad	Birni frutales (9 variedades)	3.50312573
	Sakala Gongga	Con RNA	1.57577007
		Sin RNA	1.391208
		Matorral denso	1.57577007
	Zoukoira	Sin RNA	1.32484224
		Con RNA	1.25445329
	Koumbourfou	Con RNA	1.62545765
		Matorral denso	1.82686792

Tabla 8: Promedio de los resultados de Materia orgánica.

Uso de suelos	Promedio	Desviación Típica
Frutales	2.46	0.90
Sin RNA	1.31	0.21
Con RNA	1.60	0.33
Matorral denso	1.70	0.17

**ANEXO 9: Concentración del nitrógeno total de las muestras del suelo.**

<b>Departamentos</b>	<b>Pueblos</b>	<b>uso de suelo</b>	<b>concentración [%]</b>
Fakara	Kobadaye	Con RNA	0.004020617
	Kodo	Sin RNA	0.004594268
		Con RNA	0.005843758
	Marouberizeno	Con RNA	0.003773714
		Sin RNA	0.002723576
Dantchandou	Kampa	Sin RNA	0.003872585
		RNA 30 años	0.005230131
		Con RNA	0.003844971
	Zornay	Con RNA	0.002843047
Falmey	Kiota	Kiota 2 frutales	0.004556429
		Kiota1 frutales	0.004223457
	Birnin cuidad	Birni frutales (9variedades)	0.006616034
	Sakala Gonga	Con RNA	0.003806729
Sin RNA		0.001891095	
Matorral denso		0.00305831	

	Zoukoira	Sin RNA	0.003603746
		Con RNA	0.004454661
	Koumbourfou	Con RNA	0.003831966
		Matorral denso	0.005994714

Tabla 9: Promedio de los resultados de nitrógeno total.

Uso de suelos	Promedio	Desviación Típica
Frutales	0.005	0.0012
Sin RNA	0.003	0.0010
Con RNA	0.004	0.0008
Matorral denso	0.004	0.0020

**ANEXO 10: Concentración del fosforo asimilable de las muestras de suelo.**

<b>Departamentos</b>	<b>Pueblos</b>	<b>uso de suelo</b>	<b>Concentración de fósforo (mg/l)</b>

Fakara	Kobadaye	Con RNA	0.11
	Kodo	Sin RNA	0.16
		Con RNA	0.14
	Marouberizeno	Con RNA	0.07
		Sin RNA	0.1
Dantchandou	Kampa	Sin RNA	0.3
		RNA 30 años	0.28
		Con RNA	0.17
	Zornay	Con RNA	0.16
Falmey	Kiota	Kiota 2 frutales	0.28
		Kiota1 frutales	0.2
	Birnin ciudad	Birni frutales (9 variedades)	0.12
	Sakala Gongga	Con RNA	0.07
		Sin RNA	0.11
		Matorral denso	0.12
	Zoukoira	Sin RNA	0.21
		Con RNA	0.3
	Koumbourfou	Con RNA	0.27
		Matorral denso	0.13

Tabla 10 Promedio de los resultados del fosforo asimilable.

Uso de suelos	Promedio	Desviación Típica
---------------	----------	----------------------

Frutales	0.02	0.08
Sin RNA	0.17	0.09
Con RNA	0.17	0.09
Matorral denso	0.12	0.01

**ANEXO 11** Concentraciones de Ca, Mg, Na y K de las muestras de suelos

<b>Departamentos</b>	<b>Pueblos</b>	<b>uso de suelo</b>	<b>Ca_cmol/kg</b>	<b>Mg_cmol/kg</b>	<b>Na_cmol/kg</b>	<b>K_cmol/kg</b>
Fakara	Kobadaye	Con RNA	2.39	0.85	1.13	0.37
		Sin RNA	2.91	1.18	1.21	0.5
	Kodo	Con RNA	3.03	1.32	1.23	0.53
		Con RNA	2.04	0.88	1.16	0.29
	Marouberizeno	Sin RNA	1.76	0.75	1.2	0.26
		Sin RNA	2.77	0.97	1.23	0.36

Dantchandou	Kampa	RNA 30 años	3.66	1.51	1.2	0.55
		Con RNA	3.47	1.07	1.22	0.29
	Zornay	Con RNA	1.48	0.72	1.15	0.4
Falmey	Kiota	Kiota 2 frutales	8.56	1.51	1.44	0.32
		Kiota1 frutales	6.77	2.39	1.29	0.45
	Birnin cuidad	Birni frutales (9 variedades)	7.26	2.32	1.22	0.58
		Con RNA	2.49	1.05	1.22	0.38
	Sakala Gonga	Sin RNA	2.04	0.79	1.11	0.19
		Matorral denso	1.34	0.74	0.98	0.3
		Sin RNA	3.05	1.06	1.14	0.56
	Zoukoira	Con RNA	3.38	1.09	1.16	0.52
		Con RNA	5.55	1.28	1.13	0.51
	Koumbourfo u	Matorral denso	14.28	1.49	1.13	0.5

Tabla 11: Promedio de los resultados de concentraciones de Ca, Mg, Na y K.

Ca		Mg		Na		K		Uso de suelos
Promedio	Desviación Típica	Promedio	Desviación Típica	Promedio	Desviación Típica	Promedio	Desviación Típica	
7.53	0.92	2.08	0.49	1.31	0.11	0.45	0.13	Frutales

2.50	0.57	0.95	0.18	1.18	0.05	0.38	0.16	Sin RNA
3.05	1.18	1.09	0.25	1.17	0.04	0.42	0.10	Con RNA
7.81	9.14	1.11	0.53	1.06	0.10	0.4	0.14	Matorral denso

## **ANEXO 12: Términos técnicos**

**Cobertura del suelo:** Es la cobertura biofísica tal cual se observa sobre la superficie de la tierra a través de sensores remotos, independiente de su origen; incluyen la vegetación natural o cultivada, afloramientos rocosos, depósitos de arena, hielo, agua, construcciones hechas por el hombre (Lara *et al.* 2002). El conocimiento de la cobertura del suelo es un paso fundamental para la gestión sustentable de los recursos naturales, la conservación de la biodiversidad, mitigación de los impactos en las dinámicas territoriales y en el cambio climático (FAO 2015).

**La biomasa** según Eamus *et al.* (2000) es un parámetro que caracteriza la capacidad de los ecosistemas para acumular materia orgánica a lo largo del tiempo y está compuesta por el peso de la materia orgánica aérea y subterránea que existe en un ecosistema forestal (Schlegel *et al.* 2000). Para estos mismos autores, la biomasa es toda materia orgánica que puede ser convertida en energía, siendo la biomasa leñosa aquella que puede ser restaurada en el corto plazo.

**Uso del suelo:** Está caracterizado por las funciones que se desarrollan sobre la cobertura del suelo, actividades realizadas por el hombre para producir, cambiarla o mantenerla, con la finalidad de obtener beneficios mediante la producción de bienes y servicios (Lara *et al.* 2002).

**Cambio de la cobertura vegetal:** Los cambios de la cobertura vegetal son generados a partir de la influencia de factores naturales como climáticos (meteorológicos), hídricos y factores antrópicos como el cambio de uso del suelo, cultivos, incendios, construcciones, así mismo estos factores pueden influir en la ascendencia y/o descendencia de las superficies de coberturas vegetales (Ramos *et al.* 2007).

A pesar de que el cambio de la cobertura del suelo es un proceso natural, las actividades humanas son responsables de la mayoría de los cambios cuya influencia es más significativa en la capacidad de los ecosistemas para prestar ciertos servicios ambientales (Velásquez *et al.*, 2010).

**La detección de cambios** se define como el proceso de identificación de diferencias de un objeto o fenómeno, como puede ser la vegetación (Sader *et al.*, 2003).

**Resolución de un sensor:** Es el grado de detalle con el que el sensor registra la información (Chuvienco, 2010). Se puede hablar de varios tipos de resolución. La resolución espacial, que hace referencia al objeto más pequeño posible de distinguir en una imagen; la resolución espectral indica número y anchura de las bandas del sensor;

la resolución radiométrica se refiere a la capacidad del sensor para detectar variaciones de radiancia espectral; la resolución temporal es la frecuencia o periodicidad con la que el sensor adquiere las imágenes; y la resolución angular se refiere a los ángulos en los que la misma zona puede ser observada por el sensor (Chuvienco 2010).

**Imagen de satélite:** Es un registro de los niveles de energía electromagnética reflejada o emitida por los elementos de la superficie de la tierra. Resulta en una representación gráfica o descripción de una escena típicamente producida por un dispositivo o electrónico (un sensor), que en este caso se encuentra ubicado en un satélite (Mendoza 2018).

**Programa Landsat:** El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que se inició en 1972, es la más larga de la historia y continúa registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada (IGAC 2013).

#### **Aspectos técnicos de las imágenes landsat**

**Landsat 5:** es un avanzado sensor multiespectral, opera a la vez en 7 bandas espectrales (Azul, Verde, Rojo, Infrarrojo cercano, Infrarrojo medio, Infrarrojo térmico, Infrarrojo lejano), siendo 3 en el visible, una en el infrarrojo cercano, 2 en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal. Tiene una resolución espacial de 30 m en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 m en la banda del infrarrojo termal. La escena terrestre registrada por este sensor es de 185 km<sup>2</sup>.

**Landsat 8:** Las imágenes Landsat 8 adquiridas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de 9 bandas espectrales ( ) con una resolución espacial de 30 m para las bandas de 1 a 7 y 9. La banda nueva (1) es útil para estudios costeros y aerosoles; la banda (9) es útil para la detección de cirrus; la banda 8 (pancromática) consta de una resolución de 15 m; las bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 m de resolución espacial (IGAC, 2013).

#### **Análisis visual de las imágenes.**

Se ejecuta empleando tres bandas del sensor, coincidiendo con la capacidad de los monitores, empleados en informática, monitores RGB. Los monitores poseen en total tres cañones, RGB, red, Green y blue – Rojo / Verde / Azul, con los que, por combinación de estos tres colores básicos, se construyen el resto de los colores (Cieza, 2017).

### **Combinación en color natural Landsat 5TM (321); Landsat 8 (432)**

Constituye la combinación más próxima a la percepción de la tierra con nuestros ojos desde el espacio, de ahí el nombre de color verdadero. Las bandas visibles dan respuesta a la luz que ha penetrado más profundamente y por tanto sirven para discriminar el agua poco profunda, aguas turbias, corrientes, batimetría y zonas con sedimentos (Fernández y Eliecer, 2001).

### **Combinación en falso color Landsat 5TM (453); Landsat 8 (564)**

Realza detalladamente los límites entre el agua y suelo, muestra los tipos de vegetación en colores marrones, verdes y naranjas y diferencia la humedad; es usada para su análisis de humedad, generalmente el suelo aparece más oscuro (Fernández y Eliecer, 2001).

### **Combinación falso Color Landsat 5 TM (742); Landsat 8 (753)**

Áreas urbanas aparecen en tonos magentas, pastos son verde claro. Tonos de Verde oliva a verde brillante muestran áreas forestales, suelos áridos (rosado), vegetación seca (naranja) y el agua (azul) (Fernández y Eliecer 2001).

### **Procesamiento y análisis de imágenes satelitales**

Las fuentes de error en el caso particular de las imágenes se deben frecuentemente a distorsiones originadas por la plataforma, por la rotación terrestre, por el sensor o por la atmósfera. Algunos de estos inconvenientes se arreglan comúnmente en los centros encargados de la recepción o venta de imágenes; sin embargo, otros persisten, haciendo precisas una serie de técnicas de ajuste (González 2012).

### **Clasificación de imágenes**

Las diversas coberturas sobre una imagen pueden ser discriminadas empleando algoritmos de clasificación, los que operan usando las características espectrales de los componentes del paisaje; esto es, la información de brillo y color contenido en cada píxel. Cada tipo de cobertura es conocido como un “tema”, y el producto de la clasificación se conoce como un “mapa temático”. Los procedimientos de clasificación pueden ser “supervisados” o “no supervisados” (BIODAMAZ 2004).

**Clasificación supervisada:** Este método parte del conocimiento previo de la zona de estudio, adquirido por trabajos de campo o por experiencia previa y por ello permite delimitar sobre la imagen áreas representativas de cada categoría de la leyenda definida, estas áreas se denominan áreas de entrenamiento (Sarria 2006).

**Clasificación no supervisada:** Este no requiere conocimiento del área de estudio, es un método por el cual los píxeles de una imagen son asignados a clases espectrales sin que el operador tenga conocimiento de la naturaleza de dichas categorías o áreas de entrenamiento (BIODAMAZ 2004).

**Random forest:** Es un algoritmo de clasificación no lineal que permite identificar patrones en los datos que se incorporan como entrada de información. Este algoritmo emplea un sistema de “votos” entre el conjunto de árboles para “decidir” la clase. Cada árbol calibrado es un voto, y se asigna la clase en función de cuántos votos obtiene cada una de las unidades a ser clasificadas, la clase más popular (Breiman 2001).

**Matriz de confusión** llamada matriz de error o de contingencia es una herramienta que permite evaluar la precisión de una clasificación. Está compuesta por filas y columnas: sobre las columnas se ordenan las clases reales (verdad-terreno) y sobre las filas las unidades cartográficas (unidades-o clases-del mapa) (Sánchez 2016).

**Índice kappa:** nos indica la forma de medir la exactitud de un mapa, en el cual se basa en comparar la concordancia observada en un conjunto de datos, respecto a la que podría ocurrir por mero azar, y puede ser calculado en tablas de cualquier dimensión, siempre y cuando se contrasten dos observadores (López de Ullibarry y Pita 2001).