



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA
AGRICULTURA**

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AGROPECUARIO**

**TEMA: RESPUESTA ESPECTRAL DEL CULTIVO DE CACAO
(*Theobroma cacao* L.) SOBRE UN PASIVO AMBIENTAL, EN LA
PROVINCIA DE SUCUMBÍOS**

AUTOR: ALCOCER AMBULUDI KARINA FERNANDA

DIRECTOR: PÉREZ GUERRERO PATRICIO ALEJANDRO

SANGOLQUÍ

2017

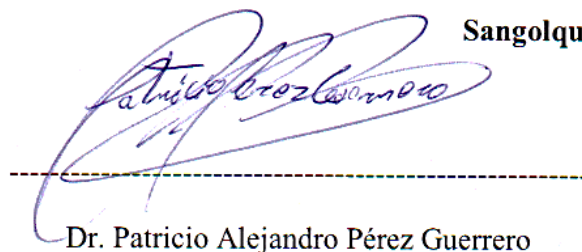


**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERIA AGROPECUARIA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“RESPUESTA ESPECTRAL DEL CULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) SOBRE UN PASIVO AMBIENTAL, EN LA PROVINCIA DE SUCUMBÍOS”*** realizado por la señorita ***ALCOCER AMBULUDI KARINA FERNANDA***, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita ***ALCOCER AMBULUDI KARINA FERNANDA*** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, febrero del 2017



Dr. Patricio Alejandro Pérez Guerrero

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERIA AGROPECUARIA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *ALCOCER AMBULUDI KARINA FERNANDA*, con cédula de identidad N° **1720763372**, declaro que este trabajo de titulación “*RESPUESTA ESPECTRAL DEL CULTIVO DE CACAO (Theobroma cacao L.) SOBRE UN PASIVO AMBIENTAL, EN LA PROVINCIA DE SUCUMBÍOS*” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolqui, Febrero del 2017

A handwritten signature in blue ink that reads 'Karina Fernanda'. The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal dashed line.

KARINA FERNANDA ALCOCER AMBULUDI

C.C: 1720763372



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y LA AGRICULTURA
CARRERA DE INGENIERIA AGROPECUARIA**

AUTORIZACIÓN

Yo, **ALCOCER AMBULUDI KARINA FERNANDA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**RESPUESTA ESPECTRAL DEL CULTIVO DE CACAO (Theobroma cacao L.) SOBRE UN PASIVO AMBIENTAL, EN LA PROVINCIA DE SUCUMBÍOS**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolqui, febrero del 2017

A handwritten signature in blue ink, reading 'Karina Fernanda', is written over a horizontal dashed line.

KARINA FERNANDA ALCOCER AMBULUDI

C.C: 1720763372

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por haberme dado la vida y la oportunidad de estudiar tan hermosa profesión. A mi madre, por su apoyo, sin importar nuestros diferentes pensamientos. A mi padre por su apoyo incondicional en cada paso que he dado, por todos sus esfuerzos para darme todo lo necesario y hacerme feliz. A mis hermanos, Mónica y Julio, que jamás me negaron su mano amiga y con dedicación me han impulsado a ser mejor. A mis pequeñas sobrinas Pamela, Alison y Camila que con sus ojitos me llenan de vida y aliento día a día. A mi querido cuñado que me ha dado un ejemplo para no darme por vencida y cumplir con este mi sueño profesional. A Cristóbal y Margarita a quien quiero como a unos padres, por siempre estar dispuestos a escucharme y ayudarme en todo momento. A mi querido amigo Padre Giovanni Muyulema por haberme enseñado a caminar de la mano de Dios.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mi familia que me ha apoyado durante toda mi vida para poder cumplir mis metas.

A mi Universidad ESPE y a mi querido IASA donde aprendí las bases del área agropecuaria y me desarrollé profesionalmente.

Al Instituto Espacial Ecuatoriano por darme la oportunidad de realizar tan importante investigación.

A José Luis Rivadeneira, Javier Maiguashca, Gabriela Carrera, Carla Suquillo, Melisa Enríquez porque sin el equipo que formamos, no hubiéramos logrado esta meta.

A todos los docentes y personal administrativo de la universidad pero en especial Ing. Patricio Pérez por su paciencia y guía, al Ing. Norman Soria por su apoyo y colaboración.

A la Ab. Fernanda Jaramillo por su disposición y ayuda en los trámites legales, para la presentación de esta investigación.

Agradezco además a mis amigos y compañeros de aula con quienes compartí gratos momentos en especial a Luisa Coba, Gabriela Iza, Jair Sánchez y Juan Black.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA

CERTIFICADO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN (PUBLICACIÓN BIBLIOTECA VIRTUAL)	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Objetivo General	3
1.3.1 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Hipótesis.....	3

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Pasivo ambiental	4
2.2 Actividad hidrocarburífera en el Ecuador.	4
2.3 Metales pesados	5
2.3.1 Movilidad de los Metales Pesados en el Suelo	6
2.3.2 Movilidad de los Metales Pesados en Plantas.....	7
2.3.2.1 Movilidad de los Metales Pesados en Plantas.....	7
2.3.3 Metales Pesados de Interés en un Pasivo Ambiental	8
2.3.3.1 Plomo (Pb)	10

2.3.3.2	Cadmio (Cd).....	10
2.3.3.3	Níquel (Ni)	10
2.4	Respuesta espectral	9
2.4.1	Radiación electromagnética	10
2.4.2	El espectro electromagnético	10
2.4.3	Importancia mundial.	11
2.4.4	Reflectancia en vegetación.....	12
2.4.4.1	Efecto de la geometría de la cobertura.....	12
2.4.5	Índice de vegetación.....	15
2.4.5.1	Índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI).....	15
2.4.5.2	Índice de clorofila de la cobertura (CCI)	15
2.4.5.3	Índice de area foliar (LAI)	15
2.4.5.4	Radiación fotosinteticamente activa (PAR).....	15
2.5	Cultivo de cacao.....	17
2.5.1	Taxonomía.....	17
2.5.2	Descripción Botánica	17
2.5.2.1	La raíz.....	17
2.5.2.2	El tallo	17
2.5.2.3	Las hojas	17
2.5.2.4	La flor.....	17
2.5.2.5	El fruto	17
2.5.3	Variedades.....	19

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS	22	
3.1	Ubicación del lugar de investigación	20
3.1.1	Ubicación política	20
3.1.2	Ubicación Geográfica	20
3.1.3	Ubicación Ecológica	20
3.2	Materiales y métodos	21
3.2.1	Equipos de Campo	21
3.2.2	Materiales de Oficina	21

3.3	Métodos.....	21
3.3.1	Características del campo experimental.....	21
3.3.2	Periodo de estudio y características	21
3.3.3	Diseño Experimental.....	22
3.3.3.1	Factores estudiados	22
3.3.3.2	Tratamientos comparados	22
3.3.3.3	Tipo de diseño	22
3.3.3.4	Respeticiones o bloques	22
3.3.3.5	Características de las UE.....	22
3.3.3.6	Croquis del diseño.....	22
3.3.4	Análisis estadístico.....	24
3.3.4.1	Esquema del análisis de varianza.....	22
3.3.4.2	Coefficiente de variación.....	22
3.3.4.3	Análisis funcional.....	22
3.3.5	Variables medidas	25
3.3.5.1	Respuesta espectral	22
3.3.5.2	Índice del contenido de clorofila (CCI)	22
3.3.5.3	Índice normalizado diferencial de la vegetación.....	30
3.3.5.4	Radiación fotosintéticamente activa	30
3.3.5.5	Metales pesados	30
CAPÍTULO IV		
RESULTADOS		30
4.1	Variables	27
4.1.1	Índices de vegetación	27
4.1.1.1	Índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	27
4.1.1.2	Índices de contenido de clorofila (CCI).....	27
4.1.1.3	Índices de área foliar (LAI).....	27
4.1.1.4	Radiación fotosinteticamente activa	27
4.2	Contenido de metales pesados	34
4.3	Respuesta Espectral.....	35
4.3.1	Localidad control	35

4.3.2	Localidad pasivo ambiental.....	36
4.3.3	Estrato superior	36
4.3.4	Estrato inferior	38
4.3.5	Estrato medio	39
CAPÍTULO V		
DISCUSIÓN		45
5.1	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	41
5.2	Índice de clorofila en la cobertura (CCI)	42
5.3	Análisis foliar	43
5.4	Respuesta espectral	43
CAPÍTULO VI		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		49
6.1	Conclusiones	45
6.2	Recomendaciones.....	45
6.3	Bibliografía	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Descripción el factor localidad y su simbología	22
Tabla 2	Descripción del factor Estrato y su simbología	22
Tabla 3	Identificación de los tratamientos	23
Tabla 4	Identificación de las repeticiones	23
Tabla 5	Distribución de los tratamientos en las localidades	24
Tabla 6	Esquema para el análisis de varianza	24
Tabla 7	Análisis de Varianza del NDVI promedio entre localidades, entre tratamientos y su interacción	27
Tabla 8	Prueba de Fisher al 5% para el NDVI promedio entre localidades	27
Cuatro 9	Prueba de Fisher al 5% para el NDVI promedio entre Estratos	28
Tabla 10	Prueba de Fisher al 5% para el NDVI promedio entre la interacción Localidad vs Estrato	29
Tabla 11	Análisis de Varianza del CCI promedio entre localidades, entre tratamientos y su interacción	29
Tabla 12	Prueba de Fisher al 5% para el CCI promedio entre localidades	29
Tabla 13	Prueba de Fisher al 5% para el CCI promedio entre Estratos	30
Tabla 14	Prueba de Fisher al 5% para el CCI promedio entre la interacción Localidad vs Estrato	30
Tabla 15	Análisis de Varianza del LAI promedio entre localidades, entre tratamientos y su interacción	31
Tabla 16	Prueba de Fisher al 5% para el LAI promedio entre localidades	31
Tabla 17	Prueba de Fisher al 5% para el LAI promedio entre Estratos	31
Tabla 18	Prueba de Fisher al 5% para el LAI promedio entre la interacción Localidad vs Estrato	32
Tabla 19	Análisis de Varianza del PAR promedio entre localidades, entre tratamientos y su interacción	33
Tabla 20	Prueba de fisher al 5% para el par promedio entre localidades	33
Tabla 21	Prueba de Fisher al 5% para el PAR promedio entre Estratos	33
Tabla 22	Prueba de Fisher al 5% para el PAR promedio entre la interacción Localidad vs Estrato	34

Tabla 23 Análisis de laboratorio de suelo para la localidad pasivo ambiental	34
Tabla 24. Análisis foliar de laboratorio de la localidad pasivo ambiental para los estratos	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Firmas espectrales de diferentes elementos.....	10
Figura 2	Firma espectral típica de vegetación.....	13
Figura 3	Firma espectral de vegetación enferma	14
Figura 4	Respuesta espectral de los estratos vegetales de la localidad control.....	35
Figura 5	Respuesta espectral de los estratos vegetales de la localidad control, con acercamiento en la región de 350- 800 nanómetros.....	36
Figura 6	Respuesta espectral de los estratos vegetales de la localidad pasivo ambiental.....	37
Figura 7	Respuesta espectral de los estratos vegetales de la localidad pasivo ambiental, con acercamiento en la región de 350- 1000 nanómetro.....	37
Figura 8	Respuesta espectral del estrato superior de las localidades pasivo ambiental y control.....	38
Figura 9	Respuesta espectral del estrato superior de las localidades pasivo ambiental y control, con acercamiento en la desviación estándar en la región de 400- 1700 nanómetro.....	38
Figura 10	Respuesta espectral del estrato inferior (cubierta vegetal) de las localidades pasivo ambiental y control.....	39
	39
Figura 11	Respuesta espectral del estrato inferior (cubierta vegetal) de las localidades pasivo ambiental y control, con acercamiento en la desviación estándar en la región de 350- 1800 nanómetro.....	39
Figura 12	Respuesta espectral del estrato medio (cacao) de las localidades pasivo ambiental y control.....	40
Figura 13	respuesta espectral del estrato medio (cacao), de las localidades pasivo ambiental y control, con acercamiento en la región de 550- 1400 nanómetro.....	40

RESUMEN

La presente investigación se llevó a cabo en la provincia de Sucumbíos, cantón Lago Agrio, parroquia Pacayacu y Shacha. Se comprobó la presencia de cadmio en un pasivo ambiental mediante índices de vegetación y respuestas espectrales de los estratos vegetales sobre el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). Los equipos utilizados para la obtención de los índices de vegetación y respuestas espectrales fueron: Espectro radiómetro Field Spec Hi Res 4 y el Ceptómetro AccuPAR LP- 80. Se muestrearon un total de 30 individuos en base a los tratamientos establecidos en un diseño de bloques completamente al azar por localidades. Los datos obtenidos se analizaron mediante el software estadístico “InfoStat” versión 2008. Las firmas espectrales se realizaron en el software View Spec Pro TM versión 5.6. Se pudo comprobar la presencia de Cadmio en el estrato medio y superior así como su respectiva asociación con la respuesta espectral. Los análisis de suelo presentan cantidades $<1 \text{ mg.kg}^{-1}$, lo que demuestra que no permanecen retenidos en el suelo. Se determinó el índice de LAI y PAR, sin embargo los resultados no fueron los esperados debido a que las condiciones de luminosidad propias de la región no fueron las adecuadas. Se estableció las respuestas espectrales por estratos, encontrándose una diferencia en el estrato inferior en la región del visible. Por otro lado la presencia de cadmio modifico la respuesta espectral de las localidades. Finalmente se determinó menores contenidos de clorofila a causa de la estratificación vegetal y de la presencia de cadmio.

PALABRAS CLAVE:

- **RESPUESTA ESPECTRAL**
- **CADMIO**
- **ESTRATOS**
- **CACAO**

ABSTRACT

The current investigation was carried out in the province of Sucumbios, the county of Lago Agrio, in the parish of Pacayacu and Shacha, The presence of Cadmium, an environmental liability, was verified by indexes of vegetation and spectral responses of the plant strata on the cacao (*Theobroma cacao L.*) plantation. The equipment used to obtain the vegetation indexes and the spectral responses were: FieldSpec 4 Hi-Res Spectroradiometer and the AccuPAR LP-80 Ceptometer. The sampling consisted of a total of 30 individual samples based on the established procedure in a random block design by location. The data obtained was analyzed with the statistical software “InfoStat”, version 2008. The spectral signatures were done with the statistical software View Spec Pro TM version 5.6. One can establish the presence of Cadmium in the middle and superior strata as well as the respective association with the spectral response. The analysis of the soil shows amounts $<1 \text{ mg.kg}^{-1}$, which demonstrates that they do not remained trapped in the soil. The LAI and PAR indices were determined, however the results were not expected because the conditions of luminosity of the region were not adequate. The spectral responses were established by strata, finding a difference in the lower stratum in the visible region. On the other hand, the presence of Cadmium modified the spectral response of the locations. Finally, we determined small content of chlorophyll due to the vegetative stratification and the presence of cadmium.

KEY WORDS

- SPECTRAL RESPONSES
- CADMIUM
- STRATA
- CACAO

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental de la actividad petrolera implica un conjunto de efectos sobre el medio natural, las consecuencias sobre los componentes bióticos, físicos y sociales son variadas y de características múltiples. Es importante enunciar una serie de problemas como alteraciones en las formas de cultivo, deterioro en los medios de cría de ganado y vida de los animales salvajes, amenaza a las subsistencias de las comunidades; problemas que ponen en riesgo la calidad de vida (Chávez & Real, 2011)

En el caso de las provincias de la región amazónica la principal causa de contaminación por metales pesados está dada por las actividades hidrocarburíferas, que desde sus inicios, y durante todos estos años han provocado gran cantidad de contaminantes alterando la integridad de suelos, aguas superficiales, aguas subterráneas, flora y fauna (San Sebastián, y otros, 2004).

La proximidad que tienen las familias de Orellana y Sucumbíos a las fuentes de contaminación, han determinado que por lo menos una vez hayan sufrido algún tipo de impacto originado por la actividad petrolera, ya sea; por derrames de petróleo, contaminación del aire por ruido o por gases, aguas de formación, lodos de perforación, etc. (Maldonado & Narváez, 2001)

La presencia de contaminantes en el suelo se refleja de forma directa sobre la vegetación; induciendo su degradación, la reducción del número de especies propias del suelo, y más frecuentemente la acumulación de metales pesados en las plantas. Sin considerar los costos de la recuperación de un suelo, la acumulación de petróleo en un área supone la desvalorización de la misma, derivada de las restricciones de uso y por tanto una pérdida económica para sus propietarios (Chávez & Real, 2011)

Los metales pesados por sus características físico-químicas presentan un problema ambiental ya que los mismo son tóxicos, persistentes y bioacumulativos (Rodríguez & Alvarado, 2015)

Davidson y Tyler (Como citó en Arrellano, Tansey, Balzter y Boyd, 2015) indican que la presencia de metales pesados como contaminante por hidrocarburos puede causar

estrés en la vegetación, esto a su vez ocasiona cambios en la tasa de fotosíntesis, cambios en la concentración absoluta y relativa del pigmento fotosintético (clorofila a y b, los carotenoides) y cambios en el tamaño de la hoja, el grosor y estructura, por lo que es posible utilizar índices de vegetación y respuestas espectrales para determinar este tipo de estrés y análisis de laboratorio que corroboren la presencia del contaminante.

Las actividades hidrocarburíferas en la provincia de Sucumbíos han generado una serie de problemas de contaminación, una de esas es la bioacumulación de metales pesados a lo largo de la cadena trófica, afectando de esta manera a los cultivos de importancia económica de la zona, la falta de información sobre el efecto de este tipo de contaminación en la respuesta espectral del cultivo de cacao impide contar con una nueva alternativa de identificación utilizando tecnología espectral.

1.1 Justificación

Ecuador es el mayor productor y exportador de cacao fino de aroma del mundo con una participación del 63% del mercado mundial en el 2012. Las provincias de mayor producción de cacao fino de aroma son: Los Ríos, Guayas, Manabí y Sucumbíos (Ministerio de Comercio Exterior, 2016). En la actualidad la exportación de cacao fino de aroma se ha visto afectada debido a la contaminación de metales pesados como el cadmio, el cual se encuentra presente en la mayoría de los suelos, esto puede ser debido a condiciones naturales y por antropización.

Este metal generalmente se acumula en las plantas y en el caso del cacao en las almendras provocando toxicidad a lo largo de la cadena trófica, lo que ocasiona problemas de salud en los consumidores (Carrillo, Mite, & Durango, 2010).

En el 2012 un estudio que realizó el Departamento de Ambiente y Biodiversidad del Gobierno Provincial de Sucumbíos, concluyó que el mayor grado de contaminación de los ríos y la alta presencia de pasivos ambientales (derrames de petróleo, aguas de formación, entre otras) se debe a los 45 años de explotación hidrocarburífera que ha ocurrido en la provincia (Gobierno Autónomo Provincial de Sucumbíos, 2013) Sin embargo no se conoce el efecto de estos contaminantes sobre el suelo y la vegetación, así como tampoco la presencia de metales pesados a causa de estas actividades. Con esta investigación se busca determinar el efecto de un pasivo ambiental sobre la respuesta

espectral en el cultivo de cacao, ya que es un cultivo de importancia económica para esta zona.

1.2 Objetivos

1.3 Objetivo General

- Comprobar la presencia de metales pesados en un pasivo ambiental mediante la respuesta espectral de los estratos vegetales sobre el cultivo de cacao en la provincia de Sucumbíos.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Determinar el índice de área foliar (LAI) y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en los estratos vegetales presentes en el cultivo de cacao bajo sombra.
- Establecer las respuestas espectrales por estratos vegetales presentes en el cultivo de cacao bajo sombra.
- Determinar las medidas de clorofila por estratos vegetales presentes en el cultivo de cacao bajo sombra.

1.4 Hipótesis

- H0: La respuesta espectral de los diferentes estratos vegetales no se ven alteradas por influencia de metales pesados, presentes en un pasivo ambiental.
- H1: La respuesta espectral de los diferentes estratos vegetales se ven alteradas por influencia de metales pesados, presentes en un pasivo ambiental.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Pasivo ambiental

Es aquella situación que generada por el hombre a lo largo de un periodo de tiempo, ha ocasionado deterioro progresivo al ambiente (calidad de agua, suelo, aire y ecosistemas) y a la calidad de vida de las personas. Esta situación es provocada por el abandono de instalaciones o zonas sin un manejo, que evite la pérdida progresiva de recursos naturales para prestar bienes y servicios a la humanidad como al medio físico. Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía (SNMPE, 2011).

La industria manufacturera origina pasivos por la liberación de sustancias tóxicas (Cromo, dioxinas, aguas ácidas, entre otras). La extracción de hidrocarburos generó pasivos por el derrame de los mismos en el ambiente, rebalse de pozas de sedimentación con agua salada en la selva, roturas de tuberías, pozos mal sellados y movimiento de tierras (SNMPE, 2011).

2.2 Actividad hidrocarburífera en el Ecuador

Desde 1972 la actividad petrolera se convirtió en el eje principal de la economía nacional. Sin embargo los impactos sociales y ambientales han sido significativos poniendo en riesgo la biodiversidad del país (Larrea, 2013).

La región Amazónica del Ecuador representa el 48% del territorio nacional además alberga a once nacionalidades indígenas. La explotación petrolera de Texaco se realizó en las provincias de Pastaza y Orellana, en las cuales habitan las nacionalidades: SIONA, SIEKÓYA PÂI, SHUAR, KICHWA Y WAORANI, conjuntamente con los colonos. Según el censo de población y vivienda realizado por el INEC en el 2010, Sucumbíos cuenta con 176.472 habitantes, dicha población se concentra principalmente en Lago Agrio (51,98%) y en Shushufindi (25,11%), precisamente los cantones afectados por la actividad petrolera de Texaco (Narváez, 2011).

La explotación petrolera ha sido la responsable del derrame de 650.000 barriles de crudo en 2 000.000 de hectáreas en bosques, ríos y esteros. Las sustancias tóxicas y los

metales pesados han contaminado las fuentes de agua, las cuales han sido utilizadas por los pobladores ocasionando una serie de problemas de salud pública (Narváez, 2011).

Se cree erróneamente que los impactos directos de la extracción petrolera solo se pueden controlar con tecnología y durante el proyecto. Sin embargo estudios destinados al medio ambiente demuestran que aunque la toxicidad del crudo disminuye con la degradación, este sigue siendo una fuente de contaminación para los organismos presentes en el ecosistema a lo largo del tiempo convirtiéndose en un pasivo ambiental (Di Toro, McGrath, & Stubble field, 2007).

Los lodos de perforación pueden estar basados en agua o en petróleo. Los lodos solubles en agua incluyen varios metales pesados tóxicos, sales inorgánicas, detergentes, etc. Estos desechos son colocados en piscinas abiertas a la interperie sin ningún tratamiento convirtiéndose en un foco de contaminación, pues los desechos migran a capas subterráneas del suelo. Por otro lado en zonas tropicales, donde hay altos niveles de pluviosidad, estos pozos rebasan contaminando las áreas adyacentes como: chacras indígenas, fincas de campesinos, cuerpos de agua y ecosistemas naturales (Bravo, 2007).

2.3 Metales pesados

Después de un largo periodo de meteorización y bajo condiciones climáticas estables el suelo puede alcanzar el equilibrio pero si uno de estos factores del sistema sufre variación el equilibrio se rompe, este tipo de modificaciones se conoce como degradación. La presencia en los suelos de algún elemento químico en concentraciones nocivas se denomina contaminante y generalmente ocasionan efectos adversos sobre algunos organismos. Los primeros contaminantes pueden proceder de la propia roca madre por algún proceso natural como: meteorización, erupciones volcánicas o lixiviación de minerales. Por otro lado los antropogénicos se producen por los residuos producidos por peligrosos derivados de las actividades industriales, hidrocarburíferas, mineras, etc. (Galán & Romero, 2009).

Se considera metales pesados aquellos elementos químicos cuyos pesos atómicos se encuentran entre 63.55 cobre (Cu) y 200.59 mercurio (Hg) y presentan un peso específico superior a 4 g.cm^{-3} , como el plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr),

mercurio (Hg), zinc (Zn), cobre (Cu), plata (Ag), arsénico (As), que en altas concentraciones resultan tóxicos para los seres vivos (Rodríguez, y otros, 2006).

Por otro lado tenemos a los oligoelementos requeridos por las plantas y animales para que completen su ciclo de vida, convirtiéndose en tóxicos cuando pasan cierto umbral, dentro de este grupo se encuentran: arsénico (As), bromo (Br), cobalto (Co), cromo (Cr), molibdeno (Mo), manganeso (Mn) , níquel (Ni), selenio (Se) , zinc (Zn). (Nedelkoska como se citó en Bonilla, 2013).

2.3.1 Movilidad de los Metales Pesados en el Suelo

La movilidad de los metales pesados no depende solamente de su naturaleza química, sino una serie de parámetros edáficos tales como el pH, materia orgánica, carbonatos, minerales de la arcilla, etc. En general la movilidad de los metales pesados es muy baja, quedando acumulados en la superficie del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores en pequeñas cantidades. Por eso la concentración de metales decrece en profundidad cuando la contaminación es antrópica (Galán & Romero, 2009).

Los metales pesados existentes en el suelo pueden seguir diferentes vías:

- Permanecer retenidos en el suelo ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo u ocupando sitios de intercambio (absorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo).
- Asociados con la materia orgánica del suelo y precipitados como sólidos puros o mixtos
- Pueden ser absorbidos por las plantas y formar parte de las cadenas tróficas
- Pasan a la atmósfera por volatilización o a las aguas superficiales o subterráneas (García & Dorronsoro, 2005).

La movilidad natural de los metales pesados en los suelos es consecuencia de la actividad biológica, de las reacciones solido-líquido y de la acción del agua. Cuando el causante de esta movilidad es el agua, estos pueden migrar de forma soluble o lavado y de forma particulada, estos lavados pueden ser:

- Lavado ascendente, por precipitados en la superficie del suelo en forma de sales hidratadas

- Lavados descendentes, puede alcanzar la capa freática e incluso llegar a aguas subterráneas.
- Lavado lateral, a causa de la topografía en forma descendente.

2.3.2 Movilidad de los Metales Pesados en Plantas

Por otro lado es importante considerar la presencia simultánea de los metales pesados, ya que sus efectos pueden ser tóxicamente sinérgicos o antagónicos (la toxicidad se reduce al mezclarse), los efectos de un compuesto o de la mezcla de ellos puede ser inocuos, letales o subletales (no matan al individuo pero ocasionan alteraciones fisiológicas o genéticas), (Navarro, Aguilar, & López, 2007).

Los vegetales presentan diferentes tipos de barreras que influyen en el transporte de metales pesados, a sus diferentes partes entre esos están:

2.3.2.1 Membrana plasmática

La membrana plasmática es un sistema complejo y de un funcionamiento altamente sofisticado, siendo la puerta de entrada de cualquier elemento (nutrientes, tóxicos, etc.) al lugar donde se realiza la química que mantiene la vida de la célula. La membrana plasmática es utilizada por la célula para mantener los gradientes iónicos, que a su vez regulan el volumen celular. Si se daña la membrana, entran iones Ca^{+2} y salen iones K^{+} (responsables de los fenómenos de polarización y despolarización de la membrana y, en definitiva, de la transmisión eléctrica). La membrana plasmática puede estar involucrada en las tolerancias a metales pesados reduciendo la capacidad o estimulando las bombas de flujo de metales que promueven la entrada al citosol.

Los metales pesados provocan en el interior de las células un estrés oxidativo, inhiben el flujo de electrones de la cadena de transporte o ciclo de Calvin; por tanto cuando la intensidad lumínica es alta, en el proceso fotosintético habrá mayor cantidad de absorción de luz que la que suele absorberse en reacciones metabólicas normales. La reducción de la apertura estomática en la inhibición de la fotosíntesis inducida por metales pesados seguramente depende del tipo de metales pesados. El Cd y el Al inhiben con igual intensidad, la fotosíntesis y la transpiración mientras que el Zn, Pb y

Cu pueden causar una reducción en la eficiencia del uso del agua (García & Dorronsoro, 2005).

2.3.3 Metales Pesados de Interés en un Pasivo Ambiental

2.3.3.1 Plomo (Pb)

El Pb es un contaminante ambiental altamente tóxico, su presencia en el ambiente se debe principalmente a las actividades antropogénicas como; la industria, la hidrocarburífera, la minería y la fundición. En los suelos contaminados con Pb se suele encontrar también Cd y Zn por analogía entre sus propiedades y características metálicas (Sánchez, 2010).

Se realizaron estudios en cultivos de lechuga, en suelos con capacidades de absorción nutricional diferentes debido a sus características (pH, contenido de arcilla, materia orgánica) y se realizó una aplicación intencional de Pb y Zn en diferentes concentraciones. Después de la cosecha, se evaluaron nuevamente los suelos y se observó que disminuyó la concentración de estos metales, lo que pone de manifiesto que estos contaminantes, presentes en el suelo son un riesgo para la salud porque las plantas pueden absorber y acumular estos metales (Prieto, Ramírez, Román, & Prieto, 2009).

2.3.3.2 Cadmio (Cd)

El Cd interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta. El Cd también reduce la absorción de nitratos y el transporte de los mismos de la raíz al tallo. Las plantas expuestas a suelos contaminados con cadmio presentan modificaciones en la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración (Sandalo, Dalurzo, Gomez, Romero-Puertas, & del Río, 2001). Uno de los síntomas más extendidos de la toxicidad por cadmio es la clorosis producida por una deficiencia en hierro (Benavides, Gallego, & Tomaro, 2005).

En el ambiente, el cadmio es peligroso porque muchas plantas y algunos animales lo absorben eficazmente y lo concentran dentro de sus tejidos. A nivel molecular el cadmio es un conocido bloqueador del calcio en la membrana plasmática. En general, se sabe que desplaza al calcio y al zinc en determinadas proteínas además de causar estrés

oxidativo. El resultado de todo ello suele ser un daño severo en el ADN y en los lípidos (Navarro, Aguilar, & López, 2007).

2.3.3.3 Níquel (Ni)

Moral (Como se citó en Prieto *et al*, 2009) afirma que el Ni puede llegar a ser menos adsorbido en suelos, sin embargo puede ser fácilmente adsorbido por las plantas y ligeramente tóxico para las mismas, siendo un elemento móvil en los tejidos de las plantas, se acumulan preferiblemente en las hojas y en las semillas.

González *et al.*, (2001) realizó un estudio con trigo con la adición de 10 mg. Ni L^{-1} , encontró que la acumulación de este metal pesado ocasionó disminuciones en el crecimiento, la fotosíntesis, disminución en el área foliar, el contenido de clorofilas y la absorción y acumulación de nutrimentos cationes divalentes en la etapa vegetativa principalmente en los órganos vegetales.

Por otro lado constituye un riesgo a la salud de los seres vivos.

2.4 Respuesta espectral

De los sensores remotos que se encuentran en satélites de observación de la tierra, están los equipos pasivos, los mismos que tienen la capacidad de captar la radiación reflejada por los elementos presentes en la superficie terrestre.

Pinilla (como se citó en Castaño y Quintanilla, 1999) afirma que para poder analizar los datos es necesario realizar medidas radiométricas en laboratorio o en campo, a partir de dichas medidas es posible determinar la relación entre esas curvas de referencia, que son las firmas espectrales, y las características del objeto observado.

La energía solar, al llegar al objeto, interactúa de diversas formas dependiendo de las características propias del objeto. De esta forma, tenemos que la Energía Incidente (I), puede ser Reflejada (R), parte Transmitida (T) y parte Absorbida (A).

El comportamiento teórico o la respuesta modelo de cada uno de los objetos con la interacción con la energía, expresada en la resultante de energía reflejada, en este caso, es lo que se llama “firmas espectrales”, las cuales ayudan a identificar cada uno de los objetos de la superficie de la tierra, por cuanto cada uno de los objetos tiene una respuesta espectral única (Enoki, Castillo, & Merlet, 1999).

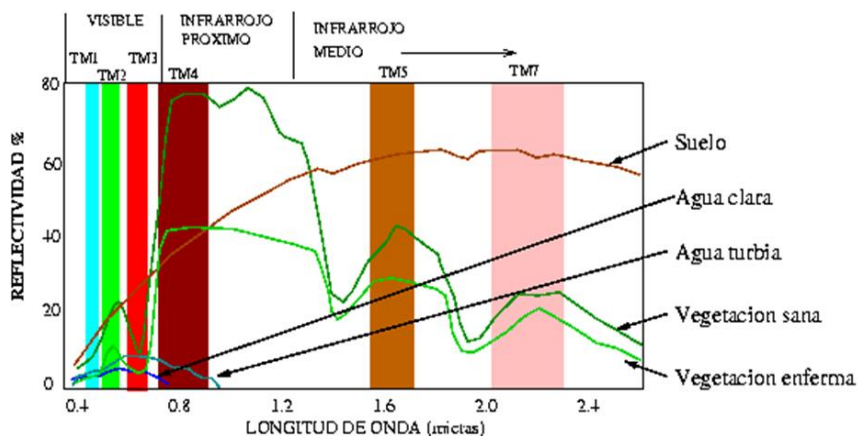


Figura 1. Firmas espectrales de diferentes elementos.

En esta figura se aprecia las firmas espectrales de cada elemento y como difieren estas, así como las longitudes de ondas donde las respuestas se hacen parecidas (Enoki, Castillo, & Merlet, 1999).

2.4.1 Radiación electromagnética

La radiación electromagnética (EMR) es una forma de energía que puede ser observada por su interacción con la materia. La EMR está hecha de componentes eléctricos y magnéticos los cuales se afectan por las mismas propiedades presentes en la materia (Fontal, 2005).

2.4.2 El espectro electromagnético

La longitud de onda es la magnitud más utilizada, excepto para algunos sistemas de radar, para describir la EMR. Las diferentes porciones del espectro electromagnético son designadas en bandas de longitud de onda. Algunas regiones de interés del espectro se describen a continuación:

- La ultravioleta fotográfica, con longitud de onda de 300-400 nanómetros.
- La visible, con longitudes de onda de 400-700 nanómetros; esta región tiene todos los colores de la luz que pueden ser percibidos por el ojo humano.
- La infrarroja cercana, con longitudes de onda de 700 nanómetros; no es visible pero puede ser detectada por películas con emulsiones.
- La infrarroja media, con longitudes de onda de 800 nanómetros; no contiene información de las propiedades térmicas de los materiales.

- La infrarroja lejana (térmica), con longitudes de onda desde 800-1000 nanómetros; esta región es utilizada para medir la emisión terrestre pero es también importante para sensores activos tales como el sistema radar.

Dentro de la banda visible, las longitudes de onda se pueden dividir así: entre 400-500 nanómetros corresponde a la luz azul, entre 500-600 nanómetros a la luz verde, entre 600-700 nanómetros a la luz roja. Se puede conseguir una discriminación más fina dependiendo de la resolución del sensor (Fontal, 2005). Las plantas absorben menos la luz verde a esto se debe el color característico de los vegetales.

2.4.3 Importancia mundial

Las respuestas espectrales constituyen una herramienta precisa para la identificación y diferenciación de forestaciones, es decir indica la posibilidad de utilizar diferentes tipos de bandas para discriminar diferentes tipos de especies arbóreas. Como se muestra en un trabajo realizado en el departamento Colón, Provincia de Entre Ríos (Argentina) con tres especies seleccionadas *Eucalyptus glóbulos L.*, *Eucalyptus grandis L.* y *Pinus elliottii L.* (Nosetto, Brizuela, & Aceñolaza, 2003)

Los protocolos basados en sensores remotos han contribuido para la elaboración de mapas agrícolas y estimación de superficies cultivadas. Como se muestra en un estudio realizado en dos aéreas piloto; la primera situada en el noroeste argentino y la segunda en la República Oriental del Uruguay. Se utilizó firmas espectrales de alta resolución temporal para la elaboración de un protocolo basado en sensores remotos y monitoreo a campo para la estimación de la superficie sembrada por los principales cultivos, espacialmente explícita a escala de lote, con error de estimación conocido y a nivel nacional (Bagnato, y otros, 2012)

Castillo, Ferrer, Bayarri y Viguri (2005) realizaron un trabajo sobre “Respuesta espectral del agua ante diferentes concentraciones de sedimentos orgánicos e inorgánicos en la Bahía de Santander”. Se utilizaron imágenes del sensor aerotransportado CASI perteneciente al Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

para estudiar los parámetros fisicoquímicos (contenido orgánico total, tipo de grano, humedad de sedimento, pH) y de los sedimentos inorgánicos (Pb y Zn). Así como también la relación espectral de estos parámetros con otras propiedades del suelo. Se

pudo observar una correlación bastante alta entre todos los parámetros y especialmente entre los tipos de grano y los metales pesados. En la fase de calibración se establecieron relaciones entre los datos muestreados en campo para cada uno de los métodos observándose muy buenos resultados al utilizar técnicas robustas.

La teledetección con imágenes de satélite, facilita la elaboración de mapas de recursos agrícolas y forestales. Con el tratamiento informático de las imágenes satélite se pueden discriminar las condiciones del suelo, los tipos de vegetación y su estado. A partir de estos datos es posible obtener la superficie cultivada o arbolada e incluso identificar las especies vegetales (Fontal, 2005).

En el 2014 se realizó un estudio sobre predicción en el rendimiento del cultivo de maíz usando datos espectrales en diferentes regiones del Ecuador (Los Ríos, Manabí, Guayas en el lado costero y Loja en la región sierra), mediante un modelo de regresión polinomial y cuatro variables. Las predicciones podrían servir para hacer recomendaciones como aumentar el rendimiento, la replantación donde la densidad es baja, el aumento de la fertilización, y el uso de pesticidas. El rendimiento previsto es importante para la toma de decisiones estatales sobre la producción nacional del cultivo (Kunapuli, y otros, 2015).

Mediante la aplicación de sensores remotos la detección, registro y análisis de las alteraciones ocurridas en el comportamiento de la respuesta espectral de la cobertura vegetal, permite caracterizar y evaluar el estado nutricional y fitosanitario de las plantas, detectando incidencia de plagas y enfermedades (Castaño & Quintanilla, 1999).

2.4.4 Reflectancia en vegetación

Según European Space Agency (2009) diferentes tipos de superficie como el agua, la tierra desnuda o la vegetación, reflejan la radiación de manera distinta.

La radiación está reflejada en distintas longitudes de onda que se llama firma espectral de la superficie. La reflexión del suelo desnudo aumenta ligeramente de la gama visible a la infrarroja del espectro. Existen grandes diferencias entre los distintos tipos de suelo, de tierra seca y húmeda. Las distintas composiciones minerales de la superficie también se reflejan en la firma espectral.

En la región del visible entre 400-700 nm. La respuesta vegetal está caracterizada principalmente por los pigmentos (clorofila, el caroteno, y la xantofila) de la hoja en la absorción de la energía y varía por la composición, concentración y absorción. Mientras que las propiedades externas de la hoja son en parte responsables de la reflectancia (Enoki, Castillo, & Merlet, 1999).

La clorofila es responsable de dos bandas de absorción, una en el azul y otra en el rojo. Esto se traduce en un máximo de reflectancia en torno a los 550 nm. En esta región del espectro se produce la fotosíntesis, proceso que implica la absorción de energía. En síntesis, esta región se caracteriza por una escasa reflectancia (20%) y una fuerte absorción debida a los pigmentos foliares (Castaño & Quintanilla, 1999).

La clorofila no absorbe toda la luz del sol, las moléculas de clorofila preferentemente absorben la luz roja y azul para ser usada en la fotosíntesis, la luz verde es absorbida en menor cantidad y es más reflejada, entonces el observador humano, que solo puede ver el espectro visible, observa la reflexión dominante de la luz verde como vegetación viva (Ochoa, Marin, Rivero, Saborít, & María, 2013).

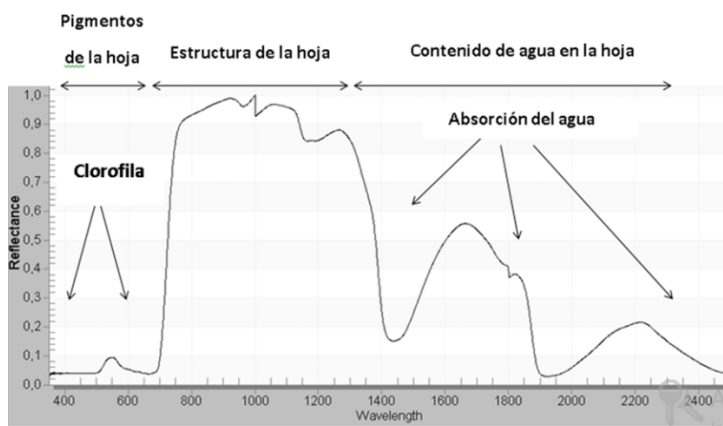


Figura 2 Firma espectral típica de vegetación

El espectro cercano al infrarrojo, es controlado por la estructura del tejido esponjoso, entonces la estructura interna de la hoja es responsable por el brillo de la reflectancia infrarroja en la vegetación viva. En el borde del espectro visible la absorción de la luz roja sufre un declive por lo que la reflectancia aumenta considerablemente por lo tanto la reflectancia pico en la vegetación viva no está en el verde pero si en el infrarrojo cercano. Es por este motivo que el infrarrojo cercano nos ayuda a diferenciar las

superficies con vegetación de las que no tiene cubierta vegetal ya que se presentan muy oscuras en el infrarrojo cercano (Ochoa, Marin, Rivero, Saborít, & María, 2013).

Cuando las plantas presentan algún tipo de alteración las características espectrales de las hojas deben cambiar en ambas regiones visible e infrarrojo. Sin embargo la región del infrarrojo es más sensible a este tipo de alteraciones, algunos expertos asumen este tipo de cambio con el envejecimiento celular (Ochoa, Marin, Rivero, Saborít, & María, 2013).

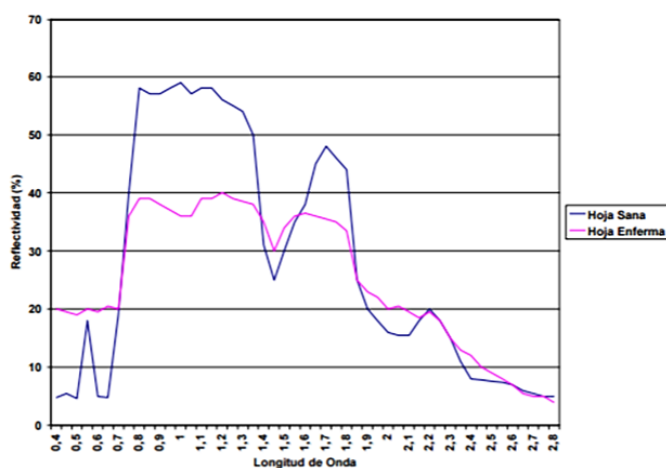


Figura 3 Firma espectral de vegetación enferma

En la vegetación senescente y/o enferma los pigmentos disminuyen, por lo cual se produce un aumento en la reflectancia de las longitudes del azul y rojo y en menor medida en el infrarrojo (figura 3) lo que da como resultado una disminución de los índices de vegetación como el de resta y el índice normalizado (Enoki, Castillo, & Merlet, 1999).

2.4.4.1 Efecto de la geometría de la cobertura

La geometría del cultivo determina la cantidad de luz solar que es interceptada y que interacciona con la vegetación y con el suelo. El efecto de la disposición de la cobertura está en función del ángulo solar, produciéndose alteraciones en la reflectancia por la cantidad de sombras que se producen, disminuyéndola por predominancia de la reflectancia del suelo.

2.4.5 Índice de vegetación

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es 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. Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable.

2.4.5.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI es usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación según la intensidad de la radiación de ciertas bandas dentro del espectro electromagnético que emite o refleja (Cecenque, 2013).

Muñoz (2013) afirma. “El NDVI es un índice sencillo de calcular y dispone de un rango de variación fija (entre -1 y +1) lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes, su fórmula es:

$$NDVI = \frac{IR\ Cercano - Rojo}{IR\ Cercano + Rojo}$$

Se caracteriza por minimizar efectos topográficos y producir escala lineal de medición. La escala va de -1 a 1 con el valor cero representando el valor aproximado donde empieza la ausencia de la vegetación. Los valores negativos representan superficies sin vegetación. La normalización que realiza, reduce el efecto de la degradación de calibración del sensor y la influencia de los efectos atmosféricos. Rouse *et al* (Como se citó en Muñoz, 2013).

2.4.5.2 Índice de clorofila de la cobertura (CCI)

El CCI se utiliza en el examen *in situ* de la fotosíntesis del dosel. Los medidores de clorofila utilizan la absorbancia para estimar el contenido de clorofila en el tejido de la hoja y calcula un índice de concentración de clorofila (CCI) valor que es proporcional a la cantidad de clorofila en la muestra (Sims & Gamon, 2002).

Especialmente CCI es conocido como un buen indicador del contenido de clorofila en la hoja y la capacidad fotosintética.

$$CCI = \frac{D720}{D700}$$

D720 y D700 representan la primera derivada de la reflectancia para el rango de longitud de onda de 715-725 nm y 695-705 nm, respectivamente (Sims & Gamon, 2002). Entonces el CCI corresponde a la derivada en 720 sobre la derivada en 700 de la reflectancia.

2.4.5.3 Índice de área foliar (LAI)

El LAI se define como la cantidad y organización de material vegetal por encima del nivel del suelo o también como el conjunto de características que describen la forma, tamaño y geometría de una planta.

El LAI es uno de los principales impulsores de la productividad primaria del dosel y ha sido una variable clave en la mayoría de los modelos de ecosistemas. LAI puede ser directamente medible por teledetección óptica de la vegetación incluyendo pastizales y pastos. Índices de vegetación como el NDVI, SAVI, y el aumento de índice de vegetación (EVI), derivados de sensores multispectrales, han sido ampliamente utilizados para estimar el índice LAI en grandes regiones (Prasad, Lyon, & Huete, 2012).

2.4.5.4 Radiación fotosintéticamente activa (PAR)

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) es la cantidad de fotones de energía radiada en el rango espectral de 400 y 700 nm. Los valores del PAR son importantes como parámetro de entrada de energía en diversos procesos biológicos y su evaluación temporal tiene particular interés en el seguimiento del crecimiento de cultivos. Debido a que las plantas realizan fotosíntesis y que el PAR es su fuente de energía, conocer la distribución espacial y temporal del mismo es fundamental para el análisis de los procesos biológicos asociados

Además este índice también es utilizado para determinar la actividad fotosintética de microalgas y bacterias (Grossi, 2004).

2.5 Cultivo de cacao

2.5.1 Taxonomía

El cacao pertenece a la siguiente clasificación taxonómica según (Torres, 2012):

Reino	Vegetal
Tipo	Espermatofita
Subtipo	Angiosperma
Clase	Dicotiledóneas
Subclase	Dialipétalas
Orden	Malvales
Familia	Esterculiácea
Género	Theobroma
Especie	Cacao

2.5.2 Descripción Botánica

El cacao es un árbol que puede alcanzar una altura de 6 a 8 m, la altura del árbol depende de las condiciones medio ambientales. Cultivado con alta luminosidad el tamaño es menor que los que crecen en exceso de sombra.

2.5.2.1 La raíz

Las plantas reproducidas por semilla tienen un sistema radicular caracterizado por una raíz principal llamada raíz pivotante. A partir de la raíz principal se desarrolla la mayoría de raíces primarias a unos 15 a 20 cm de profundidad del suelo y se extienden horizontalmente, mientras que las raíces secundarias tienen crecimiento horizontal con dirección a la capa freática. Por otro lado la cantidad de pelos adsorbentes presentes en una planta depende directamente del sustrato en donde se desarrollan. (Batista, 2009).

Un estudio realizado por Mejía (1949) menciona el crecimiento del sistema radicular de plantas de cacao bajo diferentes niveles de luminosidad. Es así como las plantas bajo 50% de sombra desarrollaron la raíz terminal más profunda y las raíces laterales más extensas que plantas bajo un 25% de sombra. Plantas bajo el 90% de sombra desarrollaron el sistema radicular más pobre.

2.5.2.2 El tallo

Las plantas de cacao, reproducidas por semillas, desarrollan un tallo principal de crecimiento vertical que puede alcanzar 1 a 2 metros de altura a la edad de 12 a 18 meses. A partir de ese momento la yema apical detiene su crecimiento y del mismo nivel emergen de 3 a 5 ramas laterales. A este conjunto de ramas se le llama comúnmente verticilo u horqueta (Torres, 2012).

La longitud del tallo generalmente guarda relación directa con el crecimiento radicular entre 1 a 6 meses de desarrollo

2.5.2.3 Las hojas

Las hojas adultas son de color verde, de lámina simple, entera de forma que va desde lanceoladas o casi ovaladas, con una nervadura pinnada y ambas superficies glabras. Las hojas cuando jóvenes son muy delicadas por lo que son apetecidas por los insectos y dañadas por el viento poseen un color verde pálido y al alcanzar su madures hacen el cambio de color (Torres, 2012).

2.5.2.4 La flor

La flor del cacao es hermafrodita es decir cuenta con ambos sexos, su polinización es estrictamente entomófila, para lo cual la flor inicia su proceso de apertura con el agrietamiento del botón floral en horas de la tarde. El día siguiente en horas de la mañana la flor ya está abierta en su totalidad.

La floración del cacao se produce a lo largo de todo el año en dos ciclos de 6 meses.

2.5.2.5 El fruto

El fruto es conocido botánicamente como una drupa; pero comúnmente se le conoce como mazorca. El tamaño y la forma dependen en gran medida de las características genéticas de la planta, el medio ambiente así como el manejo de la plantación (Torres, 2012).

Es la parte más preciada del cultivo y la más susceptible a contaminación por metales pesados, como es el caso del cadmio.

2.5.3 Variedades

Actualmente en el mundo existe una gran cantidad de variedades, la riqueza genética con la que se cuenta es muy amplia; aunque originalmente solo existían dos tipos: el criollo y el forastero, el cruce de estas dos especies ha dado origen al trinitario.

- Cacao Criollo o dulce: su origen se centra principalmente en América; Ecuador, Colombia y Venezuela. La cáscara es de color blanco o violeta, las semillas son dulces y de ellas se elabora el cacao denominado fino (Estrada, Romero, & Moreno, 2011).
- Cacao Forastero o amargo: su principal centro de origen se limita a la zona de América del sur y es el más cultivado tanto en África como en Brasil. Entre sus características se cita que posee una cascara dura y más o menos lisa, de apariencia redondeada y la cascara suele ser de color verde a amarillo. Las semillas son aplanadas de color morado y sabor amargo (Estrada, Romero, & Moreno, 2011).
- Cacao Trinitario: esta variedad surge del cruce de la variedad criolla y forastero, las mazorcas por lo general son de muchas formas y colores; las semillas son más grandes que de las otras variedades; las plantas son fuertes, de tronco grueso y hojas grandes. Actualmente es la variedad más cultivada en el mundo (Estrada, Romero, & Moreno, 2011).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del lugar de investigación

Esta investigación se realizó en las parroquias; Pacayacu y Shacha en la provincia de Sucumbios. El área total de muestreo fue de 4,8 ha. Divididas en dos localidades; con presencia de contaminante (pasivo ambiental) y sin presencia de contaminante (control).

3.1.1 Ubicación política

El proyecto se realizó en:

- País: Ecuador
- Provincia: Sucumbíos
- Cantón: Lago Agrio
- Parroquias: Pacayacu y Shacha

3.1.2 Ubicación Geográfica

El área de la investigación estuvo ubicada en las siguientes coordenadas UTM



3.1.3 Ubicación Ecológica

- Zona de vida.- Bosque tropical húmedo /zonas bajas bosque siempre verde
- Altitud.- 297 msnm
- Temperatura.- 26.5° (media anual)
- Precipitación.- 4014 mm (anual)

- Suelos.- Ligeramente Ácidos, textura arcillosa de color rojo.
- Vegetación.- El área presenta una formación vegetal caracterizada como zona agropecuaria urbana. Existen pequeñas manchas de bosque natural y antropizado con cultivos como cacao, plátano, palma africana, etc.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Equipos de Campo

- Medidor de Clorofila CCM 200 plus
- Espectro radiómetro Field Spec Hi Res 4
- Ceptómetro AccuPAR de Decagon LP- 80 PAR / LAI
- GPS GARMIN 62SC

3.2.2 Materiales de Oficina

- Computador de escritorio, con el respectivo software de procesamiento (InfoStat versión 2008, View Spec Pro TM versión 5.6, ArcGIS 9.x)
- Calculadora
- Cámara fotográfica
- Libreta de campo
- Internet

3.3 Métodos

3.3.1 Características del campo experimental

Para la investigación en la fase de campo se utilizó un área de terreno de 4.8 ha divididas en dos localidades. La localidad control de 2,4 ha ubicada en Joya de los Sachas y la Localidad Pasivo Ambiental de 2,4 ha ubicada en Pacayacu. El área de cultivo a evaluar fue de 1600 m² por cada tratamiento.

3.3.2 Periodo de estudio y características

La fase de campo se realizó desde Octubre del 2015 a Diciembre del 2016.

3.3.3 Diseño Experimental

Se realizó un diseño de bloques completamente al azar, con tres tratamientos y cinco repeticiones dentro de cada localidad.

3.3.3.1 Factores estudiados

Factor 1: Localidad

Las dos localidades estudiadas según la presencia de contaminante fueron:

Tabla 1
Descripción el factor localidad y su simbología

Símbolo	Localidad
L1	Sin pasivo ambiental (control)
L2	Con pasivo ambiental

Factor 2: Estratos

Los estratos en el ensayo fueron:

Tabla 2
Descripción del factor Estrato y su simbología

Símbolo	Estrato
T1	Superior o sombra
T2	Medio o cacao
T3	Inferior o cobertura herbácea

El estrato superior correspondió a los árboles que proporcionan sombra al cultivo de cacao; el estrato medio correspondió a los árboles de cacao y el estrato inferior a la cobertura vegetal.

3.3.3.2 Tratamientos comparados

De las combinaciones de los factores en estudio resultaron los siguientes tratamientos, entre las localidades (L1 y L2) y los estratos (T1, T2 y T3).

Tabla 3
Identificación de los tratamientos

# Tratamiento	Nomenclatura	Descripción
1	L1T1	En la localidad sin pasivo ambiental sobre el estrato medio.
2	L1T2	En la localidad sin pasivo sobre el estrato superior.
3	L1T3	En la localidad sin pasivo sobre el estrato inferior.
1	L2T1	En la localidad con pasivo ambiental sobre el estrato medio.
2	L2T2	En la localidad con pasivo ambiental sobre el estrato superior.
3	L2T3	En la localidad con pasivo ambiental sobre el estrato inferior.

3.3.3.3 Tipo de diseño

Para la investigación se utilizó un Diseño de Bloques Completos al Azar, con arreglo factorial 2x3 con cinco repeticiones; que corresponden a las 2 localidades y a los 3 estratos.

3.3.3.4 Repeticiones o bloques

Para el diseño se emplearon cinco repeticiones por tratamiento. Los bloques se determinaron en base a distancias de 40m cada una.

Tabla 4
Identificación de las repeticiones

Símbolo	Distancia (m)
I	40
II	80
III	120
IV	160
V	200

3.3.3.5 Características de las UE

La unidad experimental correspondió a las sub unidades de muestra identificadas dentro de proyecto " DESARROLLO DE METODOLOGÍAS INTEGRALES PARA LA IDENTIFICACIÓN EN VEGETACIÓN DE CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS ESPACIALES ESPECTRALES Y ESPECTROSCOPIA DE IMÁGENES " PIC-15-IEE-001. La unidad experimental fue cada árbol, el total de las unidades experimentales fue 30, en una área de 2,4 ha para cada localidad (pasivo ambiental y control) y 1600 m² por tratamiento.

3.3.3.6 Croquis del diseño

Tabla 5

Distribución de los tratamientos en las localidades

L1					L2				
Curvas de nivel	I	T3	T1	T2	Curvas de nivel	I	T3	T2	T1
	II	T1	T2	T3		II	T2	T1	T3
	III	T2	T3	T1		III	T3	T2	T1
	IV	T1	T3	T2		IV	T1	T2	T3
	V	T2	T1	T3		V	T3	T1	T2

3.3.4 Análisis estadístico

3.3.4.1 Esquema de análisis de varianza

Tabla 6

Esquema para el análisis de varianza

Fuentes de variación	Grados de libertad
Modelo	13
Localidad (L)	1
Localidad>Repetición	8
Estratos (T)	2
Localidad*Estrato	2
Error experimental	16
Total	29

3.3.4.2 Coeficiente de variación

Se calculó mediante la siguiente fórmula.

$$CV = \frac{\sqrt{CME}}{X} \times 100$$

3.3.4.3 Análisis funcional

Prueba de FISHER al 5 % para tratamientos en general, localidades, estratos e interacción.

3.3.5 Variables medidas

3.3.5.1 Respuesta espectral

Las respuestas espectrales del área foliar se registraron por medio del espectro radiómetro para obtener el porcentaje de luz que reflejan las hojas del tercio superior de la vegetación según estrato, al azar por cada tratamiento. Se registraron un total de 1500 firmas por cada localidad.

3.3.5.2 Índice del contenido de clorofila (CCI)

Para la obtención del contenido de clorofila en unidades CCI se tomó tres muestras de las hojas del tercio superior de cada planta, dentro de cada tratamiento, con el medidor de clorofila CCM-200, de las mismas plantas que se registra la respuesta espectral.

Índice de Clorofila de la cobertura fue obtenida por medio de la primera derivada de los datos registrados en la respuesta espectral con el uso del programa View Spec Pro TM versión 5.6 se procedió con el cálculo del CCI mediante la siguiente fórmula propuesta por (Sims y Gamon, 2002):

$$CCI = \frac{D_{720}}{D_{700}}$$

Se obtuvo de la primera derivada de la reflectancia para el rango de longitud de onda de 715-725 nm y 695-705 nm, respectivamente.

Donde D significa la derivada de la reflectancia en 720 sobre la derivada en 700.

3.3.5.3 Índice normalizado diferencial de la vegetación (NDVI)

Con el uso del programa View Spec Pro TM versión 5.6 se exportaron los promedios de las respuestas espectrales a un archivo *.txt y posteriormente al cálculo del NDVI o Índice de diferencia normalizada de vegetación mediante la siguiente fórmula descrita por (Sims y Gamon, 2002):

$$NDVI = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705}}$$

3.3.5.4 Radiación fotosintéticamente activa (PAR) e Índice de área foliar (LAI)

Los índices LAI y PAR se registraron por medio del Ceptómetro AccuPAR LP- 80 para medir la intercepción de luz en la planta, y para calcular el índice de área foliar de las hojas del tercio superior de los vegetales escogidos al azar por cada tratamiento. El registro de esta variable se llevó a cabo siguiendo el protocolo modificado basado en lo propuesto por el fabricante.

3.3.5.5 Metales pesados

Las muestras se recolectaron en fundas ziploc con geles refrigerantes, posteriormente enviadas al laboratorio Grun tec con acreditación N° OAE LE 2C 05-008, seleccionado para el respectivo análisis químico.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Variables

Se obtuvo los siguientes resultados para las variables en estudio, por localidades; pasivo ambiental (L2) y Control (L1). Así como para tratamientos; estrato superior (T1), estrato medio (T2) y estrato inferior (T3).

4.1.1 Índices de vegetación

4.1.1.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Del análisis de varianza para el índice NDVI, como se observa en la tabla 7 se desprende que existen diferencias altamente significativas para la localidad (P-valor = 0,0005) y para los estratos (P-valor= 0,0001). La interacción de Localidad vs estrato (P-valor= 0,0683) presenta diferencia no significativas (tabla 7).

Se realizó la comparación entre localidades por medio de la prueba de Fisher al 5%, para la variable NDVI, obteniendo los siguientes resultados: La localidad control presenta mayor vigor vegetal con un NDVI=0,61 que la localidad pasivo Ambiental con un NDVI=0,54. (F1, 29 = 12,85; p=0,05) (Tabla 8).

Tabla 7
Análisis de Varianza del NDVI promedio entre localidades, entre tratamientos y su interacción

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,12	13	0,01	6,14	0,0005
Localidad	0,03	1	0,03	12,85	0,0071
Localidad>Repetición	0,02	8	2,50E-03	1,7	0,174
Estrato	0,06	2	0,03	18,96	0,0001
Localidad*Estrato	0,01	2	4,60E-03	3,19	0,0683
Error	0,02	16	1,50E-03		
Total	0,14	29			

Se realizó la comparación entre tratamientos por medio de la prueba de Fisher al 5%, para la variable NDVI, obteniendo los siguientes resultados: El Estrato T1 que

corresponde a los árboles de sombra presenta mayor vigor vegetal con un NDVI=0,63; seguido por el estrato T2 que corresponde a los árboles de cacao (*Theobroma cacao L.*) con un NDVI=0,54 y el estrato T3 que corresponde a la cubierta vegetal con un NDVI=0,52 presenta la menor vigor vegetal. ($F_{2, 29} = 18,96$; $p=0,05$) (Tabla 9).

Tabla 8
Prueba de Fisher al 5% para el NDVI promedio entre localidades

<u>Localidad</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
Pasivo Ambiental	0,54	15	0,01	A
Control	0,61	15	0,01	B

Tabla 9
Prueba de Fisher al 5% para el NDVI promedio entre Estratos

<u>Estrato</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
T3	0,52	10	0,01	A
T2	0,58	10	0,01	B
T1	0,63	10	0,01	C

Se realizó la comparación para la interacción estratos vs tratamientos por medio de la prueba de Fisher al 5%, para la variable NDVI, obteniendo los siguientes resultados: La interacción Localidad x Estrato presenta cuatro rangos de significación de Fisher al 5% donde el A lo conforma la interacción Pasivo Ambiental x T3 con la menor vigor vegetal (NDVI=0,51), en el rango AB esta la interacción control x T3, el rango ABC es compartido con las interacciones; Pasivo Ambiental x T2, Pasivo Ambiental x T1 y Control x T2, y en el rango C esta la interacción Control x T1 con la mayor vigor vegetal (NDVI=0,69). ($F_{2, 29} = 3,19$; $p=0,05$) (Tabla 10).

4.1.1.2 Índice de contenido de clorofila (CCI)

Del análisis de varianza como se observa en la Tabla 11 se desprende que existen diferencias altamente significativas para la localidad (P-valor = 0,0118), para los estratos (P-valor= 0,0015) y para la interacción Localidad x Estrato (P-valor= 0,0343) (tabla 11).

Se realizó la comparación entre localidades por medio de la prueba de Fisher al 5% obteniendo los siguientes resultados: La localidad control presenta mayor contenido de clorofila con un CCI=1,76 que la localidad Pasivo Ambiental con un CCI= 1,15. ($F_{1, 29}$

= 10,53; p=0,05)(Tabla 12).

Tabla 10

Prueba de Fisher al 5% para el NDVI promedio entre la interacción Localidad vs Estrato

Localidad	Estrato	Media	n	E.E	
Pasivo Ambiental	T3	0,51	5	0,02	A
Control	T3	0,54	5	0,02	A B
Pasivo Ambiental	T2	0,55	5	0,02	A B C
Pasivo Ambiental	T1	0,57	5	0,02	B C
Control	T2	0,6	5	0,02	C
Control	T1	0,69	5	0,02	D

Tabla 11

Análisis de Varianza del CCI promedio entre localidades, entre tratamientos y su interacción

Variable	N	R²	R² Aj	CV
CCI	30	0,84	0,71	20,70

F.V.	SC	gl	CM	F	P-valor
Modelo.	7,51	13	0,58	6,4	0,0004
Localidad	2,82	1	2,82	10,53	0,0118
Localidad>Repetición	2,14	8	0,27	2,96	0,0308
Estrato	1,8	2	0,90	9,96	0,0015
Localidad*Estrato	0,76	2	0,38	4,2	0,0343
Error	1,44	16	0,09		
Total	8,95	29			

Tabla 12

Prueba de Fisher al 5% para el CCI promedio entre localidades.

Localidad	Medias	n	E.E.	
Pasivo Ambiental	1,15	15	0,13	A
Control	1,76	15	0,13	B

Se realizó la comparación entre tratamientos por medio de la prueba de Fisher al 5%, para la variable CCI, obteniendo los siguientes resultados:

El Estrato T1 que corresponde a los arboles de sombra presenta mayor contenido de clorofila con un CCI=1,75; seguido por el estrato T2 que corresponde a los arboles de

cacao (*Theobroma cacao L.*) con un CCI=1,46 y el estrato T3 que corresponde a la cubierta vegetal con un CCI= 1,15 presenta la menor contenido de clorofila. ($F_{2, 29} = 9,96$; $p=0,05$)(Tabla 13).

Tabla 13
Prueba de Fisher al 5% para el CCI promedio entre Estratos

Estrato	Medias	n	E.E.	
T3	1,15	10	0,10	A
T2	1,46	10	0,10	B
T1	1,75	10	0,10	C

Se realizó la comparación para la interacción estratos vs tratamientos por medio de la prueba de Fisher al 5%, para la variable CCI, obteniendo los siguientes resultados: La interacción Localidad x Estrato presenta tres rangos de significación donde el rango A lo comparten las tres interacciones del Pasivo Ambiental, en el rango AB esta la interacción Control x T3, el rango B esta la interacción Control x T2 y en el rango C esta la interacción Control x T1 con el mayor contenido de clorofila (CCI=2,27), ($F_{2, 29} = 4,20$; $p=0,05$) (Tabla 14)

Tabla 14
Prueba de Fisher al 5% para el CCI promedio entre la interacción Localidad vs Estrato

Localidad	Estrato	Media	n	E.E	
Pasivo Ambiental	T3	1,00	5	0,13	A
Pasivo Ambiental	T2	1,21	5	0,13	A
Pasivo Ambiental	T1	1,23	5	0,13	A
Control	T3	1,30	5	0,13	A B
Control	T2	1,70	5	0,13	B
Control	T1	2,27	5	0,13	C

4.1.1.3 Índice de área foliar (LAI)

Del análisis de varianza para el índice LAI, como se observa en el Tabla 15 se desprende que existen diferencias altamente significativas para la localidad (P-valor = 0,0044). Para los estratos (P-valor= 0,2613), la interacción de Localidad vs estrato (P-valor= 0,6252) presenta diferencia no significativas (Tabla 15).

Tabla 15
Análisis de Varianza del LAI promedio entre localidades, entre tratamientos y su interacción

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>		
LAI	30	0,53	0,15	44,76		
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo.	15,34	13	1,18	1,39	0,2636	
Localidad	7,93	1	7,93	15,42	0,0044	
Localidad>Repetición	4,11	8	0,51	0,61	0,7609	
Estrato	2,48	2	1,24	1,46	0,2613	
Localidad*Estrato	0,82	2	0,41	0,48	0,6252	
Error	13,59	16	0,85			
Total	28,94	29				

Se realizó la comparación entre localidades por medio de la prueba de Fisher al 5%, para la variable LAI, obteniendo los siguientes resultados: La localidad control presenta mayor abundancia de la cobertura vegetal con un LAI=2,57 que la localidad Pasivo Ambiental con un LAI= 1,55. (F1, 29 = 15,42; p=0,05) (Tabla 16).

Tabla 16
Prueba de Fisher al 5% para el LAI promedio entre localidades

<u>Localidad</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
Pasivo Ambiental	1,55	15	0,19	A
Control	2,57	15	0,19	B

Se realizó la comparación entre tratamientos por medio de la prueba de Fisher al 5%, para la variable LAI, obteniendo los siguientes resultados:

Podemos determinar que la abundancia de la cobertura vegetal entre los estratos no presenta diferencia significativa, según Fisher al 5 % (F2, 29 = 1,46; p=0,05), (Tabla 17)

Tabla 17
Prueba de Fisher al 5% para el LAI promedio entre Estratos

<u>Estrato</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
T2	1,65	10	0,29 A
T3	2,26	10	0,29 A
T1	2,27	10	0,29 A

Se realizó la comparación para la interacción estratos vs tratamientos por medio de la prueba de Fisher al 5%, para la variable LAI, obteniendo los siguientes resultados: La interacción Localidad x Estrato presenta tres rangos de significación, donde el rango A lo comparten las interacciones; Pasivo Ambiental x T2, Pasivo Ambiental x T1 con la menor abundancia de la cobertura vegetal, en el rango AB esta la interacción Pasivo Ambiental x T3, el rango BC está la interacción Control x T3 y en el rango C esta la interacción Control x T1 con la mayor abundancia de la cobertura vegetal (LAI=2,96), ($F_{2,29} = 0,48$; $p=0,05$), (tabla 18).

Tabla 18
Prueba de Fisher al 5% para el LAI promedio entre la interacción Localidad vs Estrato

Localidad	Estrato	Media	n	E.E	
Pasivo Ambiental	T2	1,36	5	0,41	A
Pasivo Ambiental	T1	1,57	5	0,41	A
Pasivo Ambiental	T3	1,70	5	0,41	A B
Control	T2	1,95	5	0,41	A B C
Control	T3	2,81	5	0,41	B C
Control	T1	2,96	5	0,41	C

4.1.1.4 Radiación fotosintéticamente activa (PAR)

Del análisis de varianza como se observa en el Tabla 19 se desprende que existen diferencias altamente significativas para la localidad (P-valor = 0,0017). Para los estratos (P-valor= 0,3476), la interacción de Localidad vs estrato (P-valor= 0,7094) presenta diferencia no significativas (tabla 19).

Se realizó la comparación entre localidades por medio de la prueba de Fisher al 5%, para el PAR obteniendo los siguientes resultados: La localidad control presenta mayor radiación fotosintéticamente activa con un PAR=459,26 que la localidad Pasivo Ambiental con un PAR= 228,39. ($F_{1, 29} = 21,56$; $p=0,05$), (tabla 20).

Se realizó la comparación entre tratamientos por medio de la prueba de Fisher al 5%, para el PAR obteniendo los siguientes resultados: Podemos determinar que la radiación fotosintéticamente activa entre los estratos no presenta diferencia significativa, según Fisher al 5 % ($F_{2, 29} = 1,13$; $p=0,05$).

Tabla 19
Análisis de Varianza del PAR promedio entre localidades, entre
tratamientos y su interacción

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>		
PAR	30	0,36	0,008	6,43		
F.V.	SC	gl	CM	F	P-valor	
Modelo.	809526,99	13	62271,31	0,71	0,7345	
Localidad	399740,63	1	399740,63	21,56	0,0017	
Localidad>Repetición	148294,69	8	18536,84	0,21	0,9845	
Estrato	199537,51	2	99768,75	1,13	0,3476	
Localidad*Estrato	61954,15	2	30977,08	0,35	0,7094	
Error	1413031,8	16	88314,49			
Total	2222558,79	29				

Tabla 20
Prueba de Fisher al 5% para el PAR
promedio entre localidades

<u>Localidad</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
Pasivo Ambiental	228,39	15	35,15	A
Control	459,26	15	35,15	B

Tabla 21
Prueba de Fisher al 5% para el
PAR promedio entre Estratos

<u>Estrato</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
T3	259,82	10	93,98	A
T1	317,39	10	93,98	A
T2	454,27	10	93,98	A

Se realizó la comparación para la interacción estratos vs tratamientos por medio de la prueba de Fisher al 5%, para el PAR obteniendo los siguientes resultados:

La interacción Localidad x Estrato presenta dos rangos de significación de Fisher al 5% en donde el rango A esta la interacción Pasivo Ambiental x T1, el rango AB lo comparten las interacciones; Pasivo Ambiental x T3, Control x T3, Pasivo ambiental x T2, control x T1 y el rango B esta la interacción Control x T2 con la mayor la radiación fotosintéticamente activa (PAR=585,60). (F2, 29 = 0,35; p=0,05).

Tabla 22
Prueba de Fisher al 5% para el PAR promedio entre la interacción Localidad vs Estrato

Localidad	Estrato	Media	n	E.E	
Pasivo Ambiental	T2	1,36	5	0,41	A
Pasivo Ambiental	T1	1,57	5	0,41	A B
Pasivo Ambiental	T3	1,70	5	0,41	A B
Control	T2	1,95	5	0,41	A B
Control	T3	2,81	5	0,41	A B
Control	T1	2,96	5	0,41	B

4.2 Contenido de metales pesados

Los análisis de laboratorio de la muestra de suelo, de la localidad pasivo ambiental, presentan los siguientes valores $0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$ para cadmio, 11 mg.kg^{-1} para níquel y $9,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ para Plomo, estos valores no representan ningún riesgo de contaminación ya que no sobrepasan los límites permisibles para ecosistemas ni para uso agrícola (tabla 23).

Tabla 23
Análisis de laboratorio de suelo para la localidad pasivo ambiental.

Metales en peso seco	Contenido en la muestra.	Limite	Max.	Limite	Max.
		Permisibles.	Tabla 6 – Ecosistemas Sensibles RAOHE	Permisibles.	Tabla 6 – Uso Agrícola Sensibles RAOHE
Cadmio mg.kg^{-1}	0,1	<1		<2	
Níquel mg.kg^{-1}	11	<40		<50	
Plomo mg.kg^{-1}	9,2	<80		<100	

Al igual que para los análisis de suelos se determinó los valores para níquel, plomo y cadmio en hojas de los diferentes estratos en estudio. Para los metales pesados níquel y plomo se encontraron valores $<1 \text{ mg.kg}^{-1}$ como se muestra en el anexo 2.

Para el cadmio se encontraron valores cercanos a los límites máximos permisibles para el estrato superior con un valor de $0,8 \text{ mg.kg}^{-1}$. Para el estrato medio (cacao) se

encontraron valores de $1,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ que sobre pasan los límites máximos permisibles y para el estrato inferior se encontró un valor de $<1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (tabla 24).

Tabla 24
Análisis foliar de laboratorio de la localidad pasivo ambiental para los estratos

Cadmio $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Contenido en la muestra.	Limite Max. Permisibles. Tabla 6 – Ecosistemas Sensibles RAOHE	Limite Max. Permisibles. Tabla 6 – Uso Agrícola Sensibles RAOHE
Estrato superior	0,8	<1	<2
Estrato medio	1,2	<1	<2
Estrato Inferior	<0,1	<1	<2

4.3 Respuesta Espectral

4.3.1 Localidad control

Para la respuesta espectral por estratos se encontró que en la localidad control, las firmas espectrales presentan diferencias visuales ligeramente en todas las regiones del espectro (figura 4).

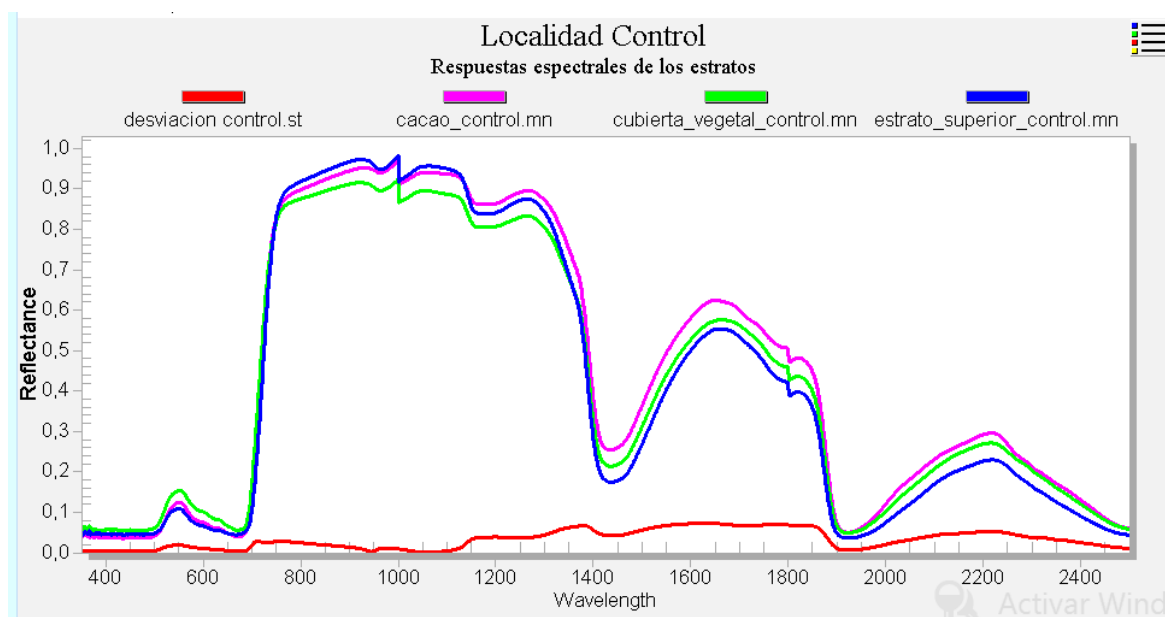


Figura 4 Respuesta espectral de los estratos vegetales de la localidad control

Además se puede observar que todas las firmas responden al patrón de vegetación sana. Para la región del espectro comprendida entre 500 a 600 nanómetros (figura 5) la cubierta vegetal presenta mayor porcentaje de reflectancia en la región del visible, seguida del estrato medio (cacao) y del estrato superior con una desviación estándar de 0,013.

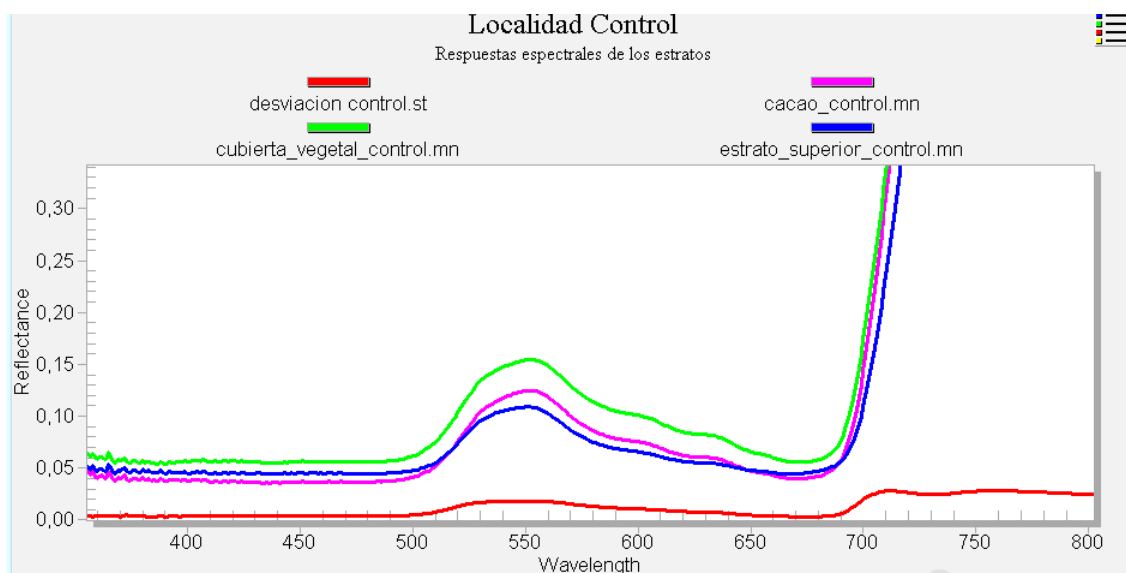


Figura 5 Respuesta espectral de los estratos vegetales de la localidad control, con acercamiento en la región de 350- 800 nanómetros

4.3.2 Localidad pasivo ambiental

Para la respuesta espectral por estratos se encontró que en la localidad pasivo ambiental, las firmas espectrales presentan diferencias visuales, ligeramente en todas las regiones del espectro (figura 6). Para la región del espectro comprendida entre 500 a 650 nanómetros, la cubierta vegetal presenta mayor porcentaje de reflectancia en la región del visible, en comparación con las firmas espectrales de los estratos medio y superior con una desviación estándar de 0,0139 (figura 7).

4.3.3 Estrato superior

Para la respuesta espectral del estrato superior de las localidades pasivo ambiental y control, se encontró una diferencia visual marcada en el espectro que va desde los 700 a

2400 nanómetros (figura 8). La firma espectral del estrato superior del pasivo ambiental presenta una ligera diferencia visual con una desviación estándar 0,00954 en la región del visible (520- 580 nanómetros) que corresponde al contenido de clorofila y una diferencia marcada en la región del infrarrojo (730- 1000 nanómetro) que corresponde a la estructura de la hoja, mientras que la firma que corresponde a la localidad control presenta el menor porcentaje de reflectancia (figura 9).

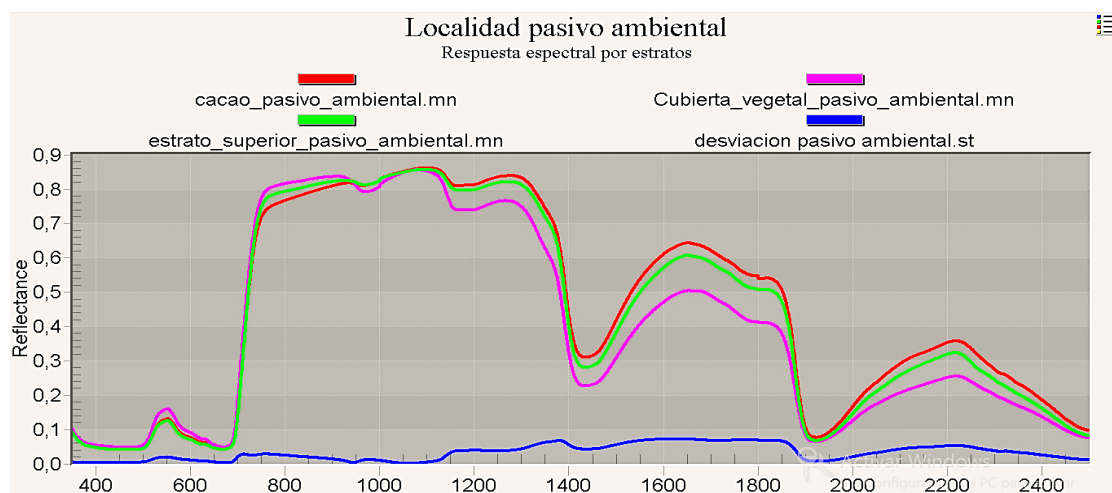


Figura 6 Respuesta espectral de los estratos vegetales de la localidad pasivo ambiental

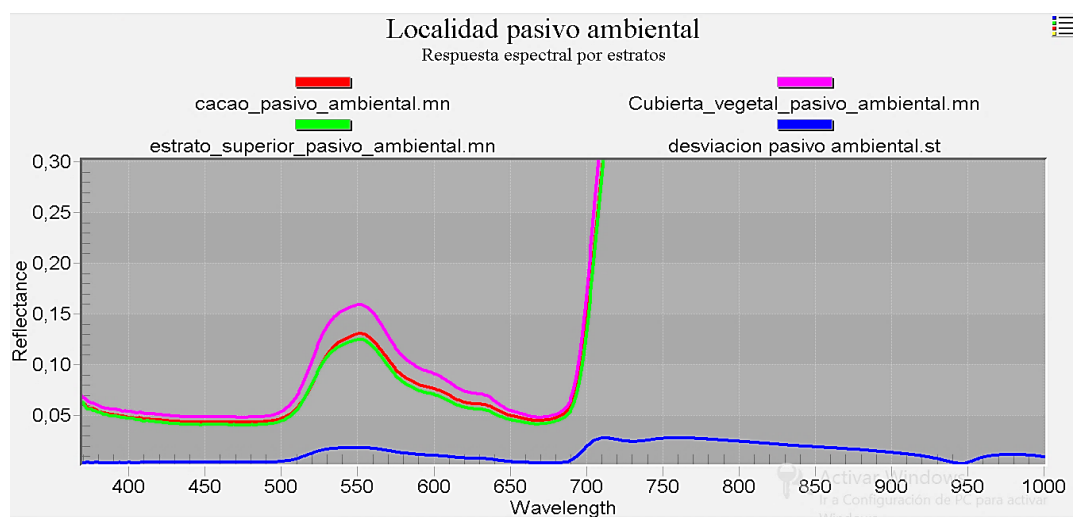


Figura 7 Respuesta espectral de los estratos vegetales de la localidad pasivo ambiental, con acercamiento en la región de 350- 1000 nanómetro

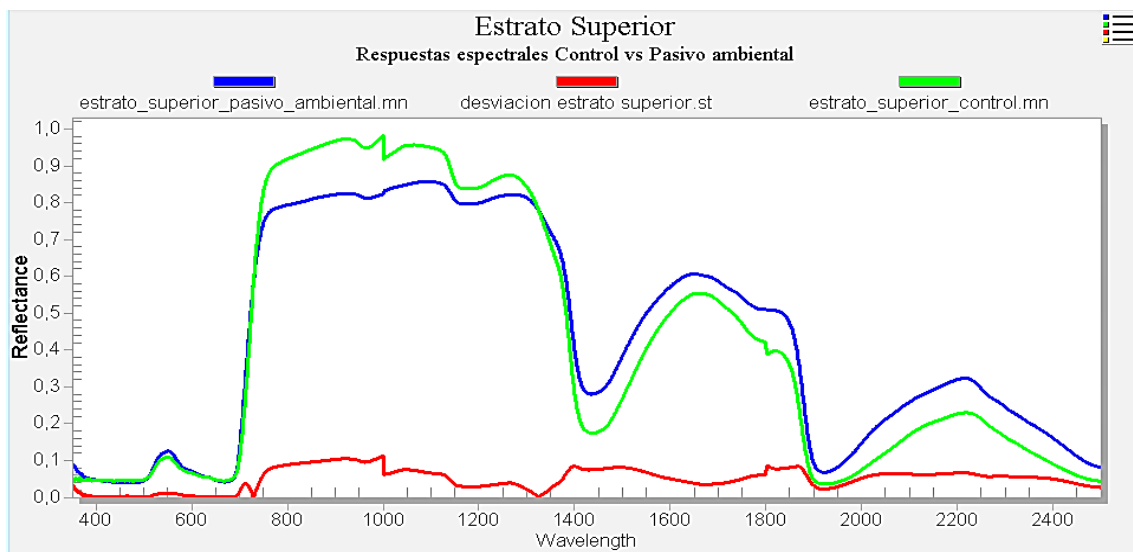


Figura 8 Respuesta espectral del estrato superior de las localidades pasivo ambiental y control

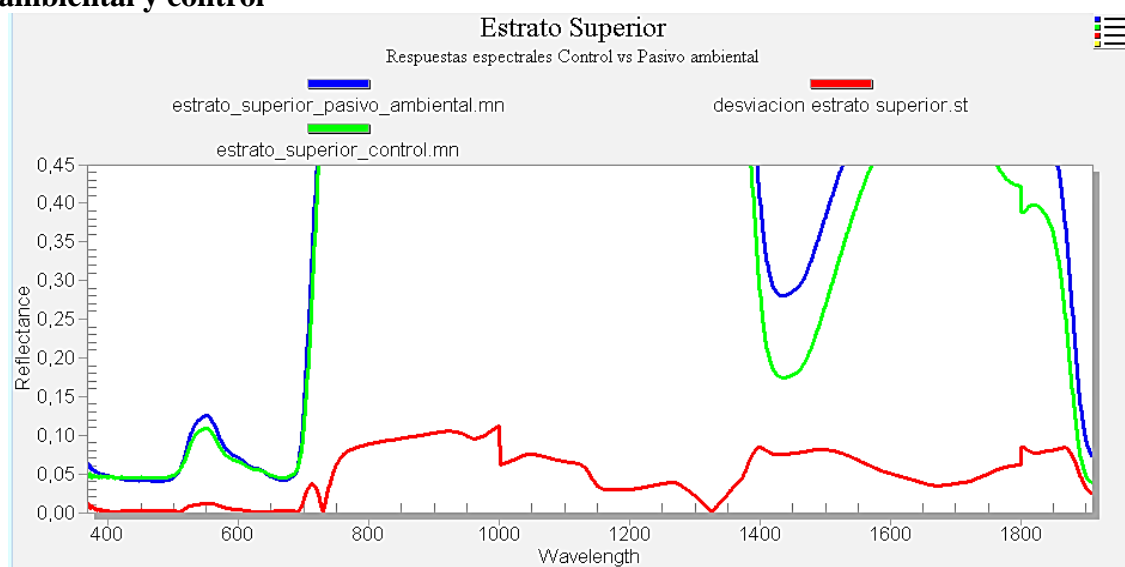


Figura 9 Respuesta espectral del estrato superior de las localidades pasivo ambiental y control, con acercamiento en la desviación estándar en la región de 400-1700 nanómetro

4.3.4 Estrato inferior

Para la región del espectro comprendida entre 725 a 1000 nanómetros la firma el estrato inferior (cubierta vegetal) presenta una diferencia visual con una desviación estándar de 0,0507 en la región del infrarrojo que corresponde a la estructura de la hoja.

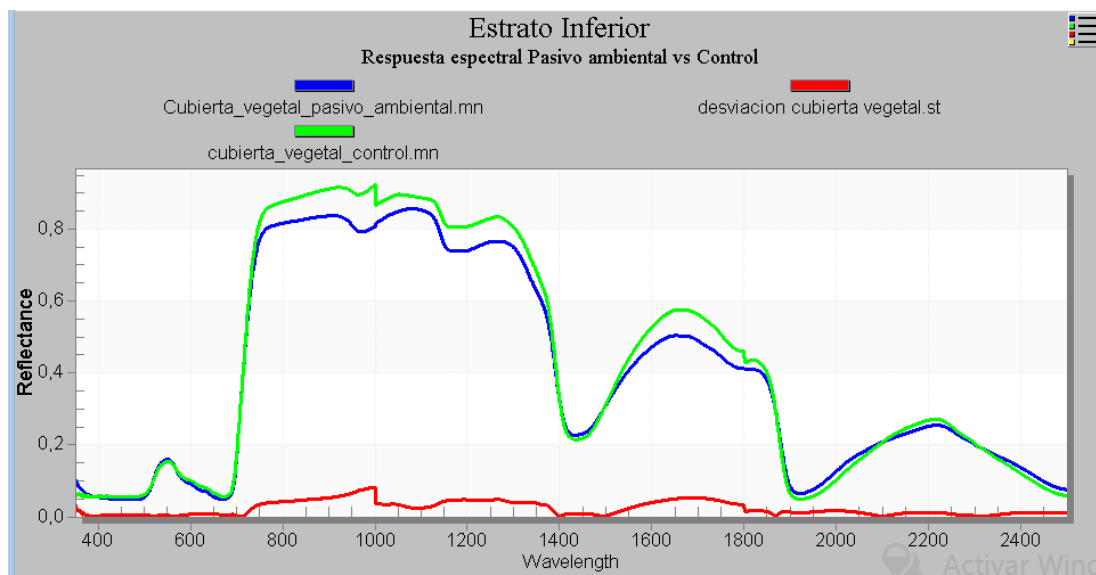


Figura 10. Respuesta espectral del estrato inferior (cubierta vegetal) de las localidades pasivo ambiental y control

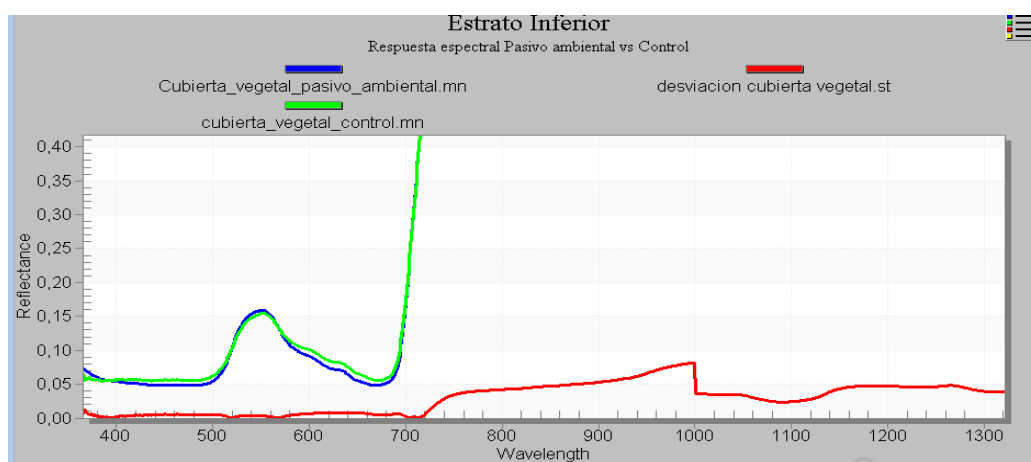


Figura 11 Respuesta espectral del estrato inferior (cubierta vegetal) de las localidades pasivo ambiental y control, con acercamiento en la desviación estándar en la región de 350- 1800 nanómetro

4.3.5 Estrato medio

Para la respuesta espectral del estrato medio (figura 12) de las localidades pasivo ambiental y control, se encontró una diferencia visual en el espectro que va desde los 700 a 1000 nanómetros (figura 13) que corresponde a la estructura de la hoja con una desviación estándar 0,085. Encontrándose la firma del estrato medio (cacao) de la localidad pasivo ambiental con tendencia al patrón de la firma de vegetación enferma (Figura 3).

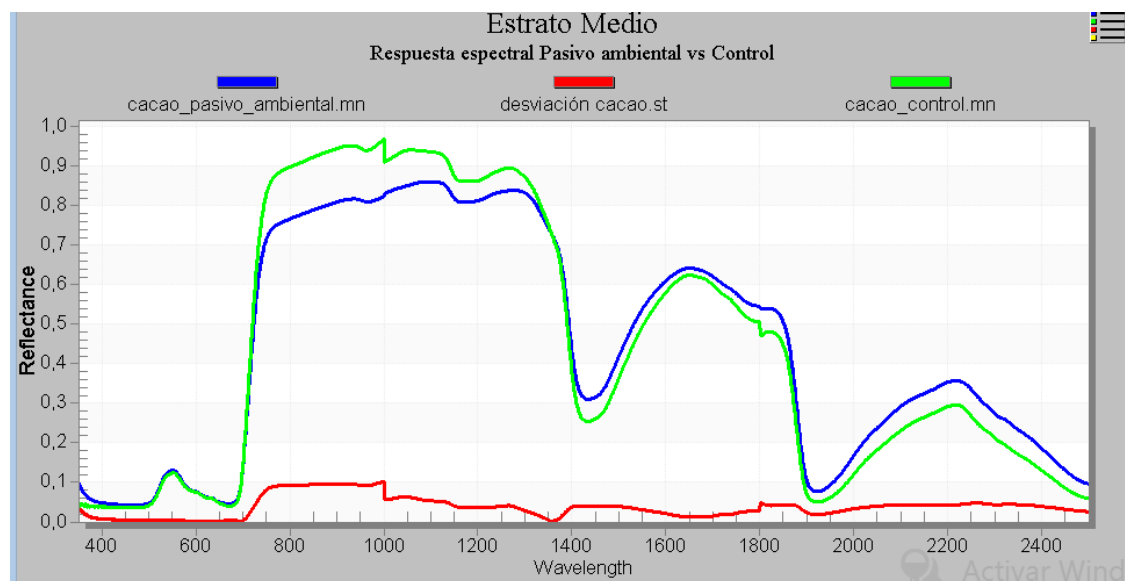


Figura 12 Respuesta espectral del estrato medio (cacao) de las localidades pasivo ambiental y control

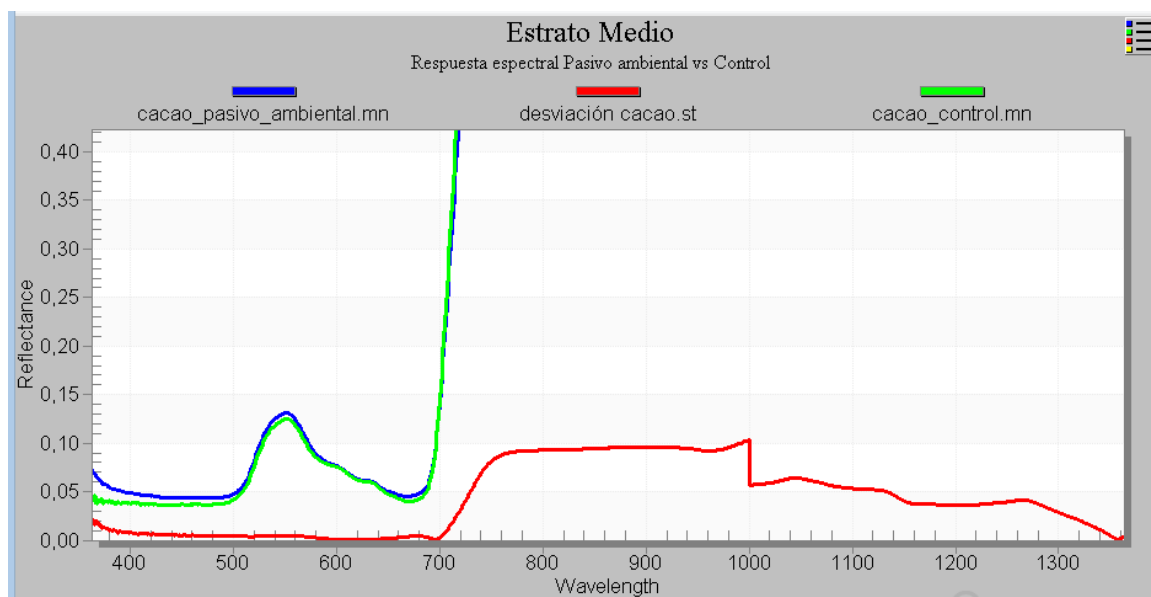


Figura 13 Respuesta espectral del estrato medio (cacao), de las localidades pasivo ambiental y control, con acercamiento en la región de 550- 1400 nanómetro

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Entre las localidades se encontró que la zona control posee un mejor vigor en los estratos con un NDVI promedio de 0,61 a diferencia del NDVI promedio de 0,54 de la localidad pasivo ambiental. “Esto significa que, la escala de medida del NDVI oscila de -1 a 1 con el 0 representando el valor aproximado de la falta de superficies vegetales. Entonces los valores cercanos a cero y los negativos indican menor existencia de vegetación” (Abeurrea, 2013, pág. 12). Además estas diferencias quedan sustentadas en base a los análisis foliares de laboratorio (Tabla 24) donde se muestra el contenido de cadmio en la localidad pasivo ambiental.

Se puede observar, que todos los promedios del NDVI de los estratos para las localidades, ocupan un rango de significancia diferente, como se muestra en el Tabla 9 en la prueba de Fisher al 5%. Klaus, Sánchez y Álvarez (2007) refieren que la reducción de la intensidad de la radiación, se da a medida que atraviesa las copas de los árboles y no es lineal, sino que depende del área que ocupan las superficies de las hojas por unidad de superficie de terreno. Por otro lado Gutiérrez, Escalante, Rodríguez, y Reynolds (2003) afirman: “El índice de reflectancia del dosel (NDVI) es; un estimador de la radiación interceptada, del crecimiento foliar, de la producción de biomasa y de su rendimiento”. Esto queda demostrado porque cada estrato guarda una relación directa entre el promedio del NDVI y la intensidad de luz que recibe. Es decir que los estratos superiores presentan un mayor NDVI debido a su incidencia directa con la radiación solar.

En la interacción de los estratos por localidades, se encontró que T3 (cubierta vegetal) del pasivo ambiental, posee el valor de NDVI más bajo, esto puede corresponder a que son especies anuales que se desarrollan en condiciones adversas tanto de luminosidad como de contaminación. En tanto el T2 y T1 del control ocupan los NDVI más altos con

rangos diferentes, esto quiere decir que las condiciones medio ambientales en las que se desarrollan son mejores.

5.2 Índice de clorofila en la cobertura (CCI)

Entre las localidades se encontró que la localidad control presenta mayor contenido de clorofila en los estratos con un CCI promedio de 1,76 con relación al CCI promedio de 1,15 de la localidad pasivo ambiental, lo que indica que la vegetación de la localidad pasivo ambiental se encuentra bajo estrés, uno de los factores que pueden generar esta condición es la presencia de Cadmio, como se puede corroborar con los análisis foliares de laboratorio (Tabla 24). Sandalio y otros. (2001) manifiesta que uno de los efectos negativos de los metales pesados en plantas es la disminución del contenido de clorofila y del potencial hídrico en las hojas, con la consiguiente falta de CO_2 para llevar a cabo una correcta fotosíntesis.

Se puede observar, que todos los promedios del CCI de los estratos para las localidades, ocupan un rango de significancia diferente, como se muestra en el Tabla 12 en la prueba de Fisher al 5%. El estrato superior (T1) muestra mayor contenido de clorofila con un CCI promedio de 1,75, lo que indica que de igual manera que en el NDVI los estratos se ven influenciados por la incidencia de la radiación solar. Azcón, Fleck, Aranda y Gómez (2005) afirman que, el ambiente luminoso al que se encuentran expuestas las plantas afecta a su crecimiento y su fisiología, es así como las hojas de las plantas de sol poseen mayor contenido de clorofila total y carotenos por unidad de área mientras que las de sombra contienen más clorofilas de tipo b por unidad de peso fresco. Es decir que los niveles de estratificación vegetal si se ven afectados por la incidencia luminosa. A mayor incidencia luminosa, mayor contenido de clorofila.

En la interacción del promedio del CCI se puede comprobar claramente la diferencia entre los estratos por localidades. Los estratos del pasivo ambiental ocupan los valores más bajos, mientras que los estratos del control muestran rangos diferentes y ocupan los valores más altos. Esto se debe a que la presencia de cadmio y los niveles de estratificación influyen conjuntamente en el contenido de clorofila de la vegetación.

5.3 Análisis foliar

En los análisis foliares de laboratorio (Tabla 24) realizados en la localidad pasivo ambiental, se muestran diferentes valores de absorción de cadmio por estratos, la mayor absorción de este metal pesado corresponde al estrato medio con plantas de cacao fino de aroma (*Theobroma cacao L.*). Por lo tanto es la especie que presenta mayor acumulación de cadmio con respecto a las demás especies de los estratos en estudio. Esta información es corroborada por Rodríguez y otros. (2008) donde, se afirma que, la absorción de metales pesados como el cadmio varía principalmente de acuerdo a la especie, las plantas han desarrollado distintas estrategias para evitar la toxicidad de metales pesados. En general los mecanismos responsables de la hiperacumulación pueden variar por la capacidad de cada especie para secuestrar estos metales.

Las hojas de las plantas de cacao muestreadas en la localidad pasivo ambiental, presentaron valores promedios de cadmio (1,0- 1,2 mg kg⁻¹), que guardan similitud con valores máximos encontrados por Carrillo y otros. (2010), en 6 muestras recolectadas en la provincia de Sucumbíos, en hojas de cacao con un valor máximo 1,07 mg kg⁻¹. Por lo tanto se sustenta el valor promedio de cadmio presente en cacao en la provincia de sucumbíos.

5.4 Respuesta espectral

Las firmas espectrales de los estratos dentro de cada localidad control y pasivo ambiental mostraron similitud visual entre ellas y una ligera diferencia en la región visible del espectro que va desde los 500 a 700 nanómetros, siendo la firma del estrato inferior (cubierta vegetal), de las dos localidades la que presenta mayor porcentaje de reflectancia. Esto puede deberse a que las hojas de la cubierta vegetal son de diferente estructura ya que corresponde a especies herbáceas. Estos resultados quedan corroborados por Melia. (1991) quien afirma que: “Las diferencias de reflectancia entre especies dependen del grosor de la hoja, que afecta la cantidad de pigmentos contenidos y la estructura fisiológica (región visible), es así como las hojas gruesas tienden a absorber más y reflejar poco a diferencia de las delgadas que absorben poco y reflejan más .

Las firmas espectrales de los estratos vegetales de la localidad pasivo ambiental mostraron diferencias visuales con relación a las firmas de los estratos de la localidad control, en las regiones del espectro que van desde los 700 a 2400 nanómetros. Es decir que las respuestas espectrales de la localidad pasivo ambiental, si se ven afectadas por la presencia del contaminante. Esto guarda relación con lo escrito por la FAO (Enoki., 1999) quienes afirman: “En la vegetación senescente y/o enferma los pigmentos disminuyen, por lo cual se produce un aumento en la reflectancia de las longitudes del azul y rojo y en menor medida en el infrarrojo.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se pudo comprobar la presencia de Cadmio en el estrato medio y superior así como su respectiva asociación con la respuesta espectral en la localidad pasivo ambiental. Sin embargo los análisis de suelo presentan cantidades $<1 \text{ mg.kg}^{-1}$, lo que demuestra que no permanecen retenidos en el suelo ya sea disueltos en la fase acuosa u ocupando sitios de intercambio.
- Se determinó el índice de LAI y PAR, sin embargo los resultados encontrados no fueron los adecuados, debido a que las condiciones de luminosidad propias de la región son muy inestables. Las diferencias obtenidas que se presentan (Tablas 15 al 22) no se asocian a la fuente de contaminación sino a la variación de la incidencia solar sobre el sensor externo al momento del muestreo (Anexo 4).
- Se estableció las respuestas espectrales por estratos, encontrándose una diferencia visual en todos los estratos de la localidad pasivo ambiental con relación a los estratos de la localidad control en las regiones comprendidas entre 700 a 1000 nanómetros con una desviación estándar máxima de 0,08.
- Se determinó menores contenidos de clorofila para los estratos de la localidad pasivo ambiental con el menor valor de CCI= 1 y menor vigor vegetal NDVI= 0,51 para el estrato inferior (T3). Por el contrario en la localidad control se presentaron los mayores contenidos de clorofila y absorción fotosintética para el estrato superior (T1) con el mayor índice de CCI= 2,27 y NDVI=0,69.

6.2 Recomendaciones

- Generar una metodología específica para la colecta de datos utilizando el ceptómetro AccuPAR de Decagon LP- 80 para determinar el LAI y PAR, considerando la variabilidad lumínica de las zonas de estudio.

- Evaluar el cultivo de cacao bajo condiciones controladas, por medio de herramientas espectrales para determinar un patrón de vegetación sana. Que servirá como base para estudios posteriores en cultivos cacao bajo estrés.
- Realizar este tipo de estudios en los diferentes cultivos de importancia para el país.
- Realizar un estudio sobre la presencia de cadmio en el cultivo de cacao por causa de volatilización de metales pesados.

6.3 Bibliografía

- Abeurrea, P. (2013). *Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra* (tesis de pregrado). Universidad Pública de Navarra. España. , 12.
- Azcón, B. J., Fleck, I., Aranda, X., y Gómez, C. N. (2005). Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático. Fundamentos de la fisiología vegetal. Recuperado de <http://www.uees.edu.sv/editorial/publicaciones/Normas%20APA%20Sexta%20Edici%C3%B3n.pdf>
- Bagnato, C., Conde, C., Noe, Y., Caride, C., Baeza, S., Paoli, H., & Paruelo, J. M. (2012). Utilización de firmas espectrales de alta resolución temporal para la elaboración de mapas de uso agrícola y estimaciones de superficie cultivada a escala de lote en Argentina y Uruguay. Recuperado de *In Congreso Argentino de Teledetección* (pp. 18-21).
- Batista, L. (2009). *Morfología de la planta de cacao*. República Dominicana, Sto Dgo. Fundesyram. Recuperado de <http://www.fundesyram.info/biblioteca.php?id=3096>
- Benavides, M., Gallego, S., & Tomaro, M. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17:, 21-34.
- Bravo, E. (2007). *Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad*. Recuperado de http://inredh.com/archivos/documentos_ambiental/impactos_explotacion_petrolera_esp.pdf.
- Carrillo, M., Mite, F., & Durango, W. (Noviembre de 2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas en Ecuador. *XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. Santo Domingo, Ecuador.
- Castaño, S., & Quintanilla, A. (Agosto de 1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección. *VIII Congreso Nacional de Teledetección*. Albacete, España.

- Castaño, S. y Quintanilla, A. (Agosto de 1999). *Aplicación de sensores remotos en la detección y evaluación de plagas y enfermedades en la vegetación*. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España.
- Castillo, E., Ferrer, R., Bayarri, V., y Viguri, J. (2005). Respuesta espectral del agua ante diferentes concentraciones de sedimentos orgánicos e inorgánicos en la Bahía de Santander. In XI Congreso Nacional de Teledetección. Puerto de la Cruz, Tenerife (pp. 21-23).
- Cecenque, R. (2013). *Manual para el tratamiento de imágenes satelitales con índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)*. La Cruz, Chile. Recuperado de <http://www.monitoreosatelital.cl/wp-content/uploads/2014/11/Manual-Tratamiento-de-Imagenes-NDV.pdf>
- Chávez, A., & Real, C. (2011). *Evaluación integral: Económica, social y ambiental de las actividades petroleras en las provincias de Orellana y Sucumbíos*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- Di Toro, D., McGrath, J., & Stubble field, W. (2007). Predicting the Toxicity of Neat and Weathered Crude Oil: Toxic Potencial and the Toxicity of Saturated Mixtures. *Environ menatl Toxicology and Chemistry* 26(1): 24 36. Mencionado por: Elizabeth Bravo. .
- Enoki, A., Castillo, E., & Merlet, H. (1999). Sistema para el seguimiento y análisis de tierras mediante teledetección. *Bases teóricas*. Recuperado de: http://www2.inia.cl/medios/platina/descarga/TallerSatelital/bsesteoricasp.remota_rcastro.pdf
- Estrada, W., Romero, X., & Moreno, J. (2011). *Guía técnica del cultivo de cacao manejado con técnicas agroecológicas*. San Salvador, El Salvador. Recuperado de: http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/01/Estrada_et_al_Guia_Tecnica_Cacao.pdf
- European Space Agency. (2009). Firmas espectrales. Recuperado de http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html

- Fontal, B. (2005). *El espectro electromagnético y sus aplicaciones*. Recuperado de http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/16746/1/espectro_electromagnetico.pdf
- Galán, E., & Romero, A. (2009). Contaminación de suelos por metales pesados. *Conferencia llevado a cabo en Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola*. Facultad de Química. Universidad de Sevilla.
- García, I., & Dorronsoro, C. (2005). *Contaminación por metales pesados, en tecnologías de suelos* (Tesis de ingeniería). *Universidad de Granada*. España.
- Gobierno Autónomo Provincial de Sucumbíos. (2013). *En Sucumbíos, elevados niveles de hidrocarburos y coliformes en agua*. Recuperado de <http://www.sucumbios.gob.ec/ambiente/index.php/login/actores-ambientales/81-en-sucumbios-elevados-niveles-de-hidrocarburo>
- González Cossio, F. V., Larqué Saavedra, M. U., Díaz Aguilar, I., Alcántar González, G., Carrillo González, R., & Vázquez Alarcón, A. (2001). Acumulaciones tóxicas de níquel en el crecimiento y la nutrición de trigo. *Terra Latinoamericana*, 19,199-209. Recuperado.
- Grossi, H. (2004). Estimación de la distribución espacial en Argentina de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR). *En Anais do XIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, vol.1., (págs. pp. 543-544). Santa María, RS, Brasil.
- Gutierrez, R. M., Escalante, E. A., Rodríguez, G. M., y Reynolds, M. P. (2003). Índices de reflectancia y rendimiento del frijol con aplicaciones de nitrógeno. Recuperado por <http://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/1454/80859.pdf?sequence=1>.
- Instituto Espacial Ecuatoriano. (2012). Perfil de proyecto. Desarrollo de metodologías integrales para la identificación en vegetación de contaminación por hidrocarburos mediante el uso de tecnologías espaciales espectrales y espectroscopia de imágenes. Quito, Ecuador.

- Klaus, G. V., Sánchez, O. S., y Álvarez, G. J. (2007). Estructura del bosque. Recuperado de http://www.usc.es/uxfs/IMG/pdf/Estructura_y_crecimiento_del_bosque1-2.pdf.
- Kunapuli, S., V, R., Benavídez, G., A, C., Cabrera, A., Fernández, C., & Maignashca, J. (2015). Yield prediction for precision territorial management in maize using spectral data. . *Precision agriculture*, 15(1), 1.
- Larrea, C. (2013). Yasuní-ITT. *Una Iniciativa para Cambiar la Historia*. Recuperado de http://www.otca.info/portal/admin/_upload/paises/pdf/yasuni.pdf.
- Maldonado, A., & Narváez, A. (2001). *Ecuador ni es, ni será ya un país amazónico*. Quito, EC.: Acción ecológica. . Obtenido de http://www.accionecologica.org/images/2005/Ecuador_ni_es_ni_ser%C3%A1_ya_pa%C3%ADs_Amaz%C3%B3nico._Inventario_de_impactos_petrole
- Mejía, U. (1949). Estudio del sistema radicular del árbol de cacao (*Theobroma cacao L.*) (Tesis de pregrado). Instituto Interamericano De Ciencias Agrícolas. Costa Rica.
- Melia, J. (1991). Fundamentos Físicos de la Teledetección: Leyes y Principios Básicos en Gandía y Melia (ed.): La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales. Curso de PostGrado. Universidad de Valencia, pp.51-83.
- Ministerio de comercio exterior. (2016). Cacao y elaborados (45). Recuperado de <http://www.proecua.dor.gob.ec/compradores/oferta-exportable/cacao-y-elaborados/>
- Moral, R., Gilkes, R.J., & Moreno-Caselles, J. (2002). A comparison of extractants for heavy metals in contaminated soils from Spain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 33 (4), 2781-2791pp.
- Muñoz, P. (2013). Índices de vegetación. Recuperado de <http://agroclimatico.minagri.gob.cl/wp-content/uploads/sites/26/2015/05/Indices-de-vegetaci%C3%B3n-Pedro-Mu%C3%B1oz.pdf>.
- Narváez, H. (2011). *Luchas políticas ambientalistas y poder económico transnacional: estrategias de comunicación en el caso Texaco* (Tesis de maestría). Universidad Andina Simón Bolívar. Quito, Ecuador.

- Navarro, J., Aguilar, A., & López, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16 (2), 1-17 .
- Nosetto, M., Brizuela, A., & Aceñolaza, P. (2003). *Obtención de firmas espectrales en forestaciones a partir de imágenes Landsa*. Entre Ríos, Argentina. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=6mf1ycxrMOwC&oi=fnd&pg=PA83&dq=importancia+firmas+espectrales+&ots=sP615V0q0V&sig=nLahrBbUdcgL7wMZD6-CgKyMoLM#v=onepage&q=importancia%20firmas%20espectrales&f=false>
- Ochoa, A., Marin, J., Rivero, D., Saborít, A., & María, E. (2013). Caracterización física, físico-química y química de extractos totales de hojas frescas de *Petiveria alliacea* L. con acción antimicrobiana. . *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, 44(1).
- Prasad, S., Lyon, G., & Huete, A. (2012). *Detección remota hiperespectral de la vegetación*. . London: CRC Press.
- Prieto, J., Ramírez, C., Román, A., & Prieto, F. (2009). Contaminación y fito toxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10 (1) , 29-44 .
- Rodríguez, J., & Alvarado, D. (2015). *Propuesta de un plan de manejo ambiental, en base a la presencia de metales pesados en el estero Huaylá pto. Bolivar*. (Tesis de pregrado). Universidad politécnica salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Rodríguez, J., Valdez, R., Lara, J., Rodríguez, H., Vázquez, R., Magallanes, R., & J., G. (2006). Soil nitrogen fertilization efect on phytoextraction of Cd and Pb By tobacco (*Nicotiana tabacum*). *Bioreediation Journal*.
- San Sebastián, M., Tanguila, A., Santi, S., Armstrong, B., Stephe, C., & Córdoba, J. (2004). *Informe Yana Curi, impacto de la actividad petrolera en la salud de la población rurales de la Amazonia Ecuatoriana*. Recuperado de <https://repository.unm.edu/bitstream/handle/1928/11778/Informe%20Yana%20curi.pdf?sequence=1>.

- Sánchez, J. (2010). *Metodologías analíticas para la detección de metales tóxicos en muestras de interés ambiental* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Sandalio, L., Dalurzo, H., Gomez, M., Romero-Puertas, M., & del Río, L. (2001). Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *Journal of Experimental Botany*.52:, 2115-2126.
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing Environ* , 81,337–354.
- Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. (2011). Informe quincenal de la SNMPE. Obtenido de Pasivos ambientales: <http://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones-snmpe/informes-quincenales.html>
- Torres, L. (2012). *Manual de producción de cacao fino de aroma a través de manejo ecológico*. (Tesis de ingeniería). Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador .