



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

Modelos de distribución de la broca *Hypothenemus hampei* (Ferrari)
(Coleoptera: Curculionidae) en diferentes usos de suelo, en el cantón de
Turrialba, Costa Rica

por

Karime Montes Escobar

Proyecto de tesis sometido a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de candidato a

Magister Scientiae en Agroforestería Tropical

Turrialba, Costa Rica, 2012

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA TROPICAL

FIRMANTES:



Fernando Casanoves, Ph.D.
Director de tesis



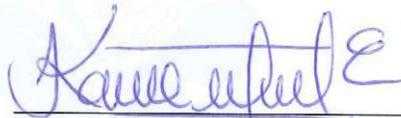
Jacques Avelino, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Elías de Melo Virginio, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Thomas Dormody, Ph.D. / Francisco Jiménez, Dr. Sc.
Decano / Vicedecano de la Escuela de Posgrado



Karime Montes Escobar
Candidata

DEDICATORIA

A DIOS, por la vida y por brindarme esta linda oportunidad de adquirir nuevo conocimiento, nuevas experiencias en este bello país y nuevos amigos.

Dedico esta tesis a mi madre por ser un gran apoyo desde la distancia, brindándome mucho amor, buena energía y por enseñarme a ser una persona fuerte, con carácter, y decidida a enfrentar los problemas de la vida, pensando siempre en salir victoriosa.

Dedico esta tesis a mi padre (Q.E.P.D.) que desde el cielo, me protege, me ilumina y me impulsa todos los días, a llevar a cabo todos mis sueños, mis expectativas de vida.

Dedico esta tesis a mis hermanos. Rafael, Lynda, Catalina y Andrea que siempre me han dado buenos consejos y han sido mi fortaleza para seguir adelante.

Dedico esta tesis a Daniel Ramos por ser alguien muy especial en mi vida, por demostrarme que en todo momento cuento con él, además por darme el apoyo incondicional que necesitaba y motivación para la culminación de mis estudios.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer sinceramente a aquellas personas que compartieron sus conocimientos conmigo para hacer posible la conclusión de la tesis. Especialmente agradezco a mi asesor el Dr. Fernando Casanoves por su asesoría siempre dispuesta aún en la distancia y por sus ideas y recomendaciones respecto a esta investigación. Gracias a los Dres. Jaques Avelino y Elias De Melo Virginio Filho; también al proyecto Omega3 del Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD) por el apoyo recibido. Agradezco a mis compañeros Carolina Polania, Sergio Vilches y Eduardo Corrales por su gran ayuda cuando me enfrentaba con ciertos problemas.

BIOGRAFÍA

La autora nació en Armero (Tolima) Colombia, el 17 de septiembre de 1984. Los estudios de secundaria los realizó en el colegio Exalumnas de la Presentación, graduándose como Bachiller académico. Se graduó de Profesional en Matemáticas con énfasis en Estadística en la Universidad del Tolima en el año 2010 en la Facultad de Ciencias. En el año de 2011 ingresa al CATIE, para realizar la Maestría en Agroforestería Tropical.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
BIOGRAFÍA.....	V
CONTENIDO	VI
RESUMEN	VIII
SUMMARY.....	IX
ÍNDICE DE CUADROS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	XIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 <i>Objetivos del estudio</i>	3
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Descripción del café o cafeto.....	5
2.1.1 <i>Fenología del café</i>	5
2.2 La broca del café: breve reseña histórica.....	6
2.2.1 <i>Clasificación taxonómica</i>	7
2.2.2 <i>Biología de la broca del café</i>	7
2.2.3 <i>Condiciones favorables para su desarrollo</i>	9
2.2.4 <i>Métodos de control de la broca</i>	11
2.2.4.1 Control con trampas de captura.....	11
2.2.4.2 Control químico.....	12
2.2.4.3 Control biológico.....	12
2.3 Dispersión	15
2.4 Modelos estadísticos	15
2.4.1 <i>Aspectos funcionales de un Modelo Estadístico</i>	15
2.5 Modelos lineales	16
2.5.1 <i>Modelos no lineales</i>	18
2.5.2 <i>Modelos lineales generales y mixtos</i>	18
2.5.3 <i>Modelos lineales generalizados y mixtos</i>	18
2.5.4 <i>Modelos de regresión por pasos</i>	19
	VI

2.5.5	<i>Modelo exponencial</i>	19
2.5.6	<i>Modelos Poisson</i>	20
2.6	<i>Ajuste de curvas</i>	20
2.7	<i>Regresión no lineal</i>	20
2.8	Correlación de Pearson	20
2.9	Valores predichos	21
3	MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1	Área de estudio	23
3.2	Metodología de campo.....	24
3.3	Análisis estadístico	30
4	RESULTADOS	37
4.1	Resultados generales basados en las medias del total de captura para los diferentes usos de suelo adyacentes al cafetal	37
4.1.1	<i>Análisis del uso de suelo Bosque por localidad</i>	37
4.1.2	<i>Análisis del uso de suelo Caña por localidad</i>	40
4.1.3	<i>Análisis del uso de suelo Pasto por localidad</i>	42
4.1.4	<i>Comparación de usos de suelo para las diferentes localidades</i>	44
4.2	Ajustes no- lineales para curvas de dispersión	47
4.3	Ajuste de Modelos Lineales Generales y Mixtos para dispersión de broca	48
4.4	Ajuste de Modelos Generalizados Mixtos para dispersión de broca	57
4.5	Ajuste de modelos de regresión por pasos (<i>broken stick</i>) para dispersión de broca.	60
4.6	Comparación de los modelos alternativos que mejor se ajustaron	60
4.7	Correlación de Pearson entre la variable respuesta conteo y los predichos de los modelos que mejor ajustaron los datos	61
5	DISCUSIÓN	63
5.1	Discusión estadística.....	63
5.2	Discusión biológica.....	65
6	CONCLUSIONES	69
6.1	Estadísticas.....	69
6.2	Biológicas	69
7	RECOMENDACIONES.....	71
8	BIBLIOGRAFÍA	73
	ANEXOS	79

RESUMEN

Para ajustar modelos que describan la dispersión de la broca (*Hypothenemus hampei*) en usos adyacentes a los cafetales (pasto, caña y bosque) se usaron los datos obtenidos por Amada Olivas en el 2010. Los muestreos se realizaron en transectos ubicados en fincas del cantón de Turrialba, ubicado dentro del Corredor Biológico Volcánica Central de Talamanca (CBVCT). En cada transecto se dispusieron trampas Brocap cada 10 m, registrándose la captura de broca durante seis meses.

Con la finalidad de estudiar la distancia a la que se dispersa el insecto en los distintos usos de suelo adyacentes, se usaron diferentes aproximaciones de modelación estadística basadas en 1) modelos no-lineales, 2) modelos lineales generales mixtos y 3) modelos lineales generalizados mixtos. Las distintas aproximaciones de modelación dentro de cada tipo de modelo fueron evaluadas con los criterios de información AIC y BIC. Para comparar las distintas aproximaciones de modelación, se usó como criterio el coeficiente de correlación de Pearson entre los valores predichos por cada modelo y los valores observados.

Los resultados sugieren que el mejor ajuste para describir la dispersión de la broca en los usos adyacentes fue el modelo lineal generalizado mixto. Según este modelo la distancia máxima aproximada de dispersión fue en el uso de suelo caña a los 30 m y la mínima distancia aproximada fue en el uso de suelo adyacente bosque a los 10 m. Estos resultados sugieren que el uso de suelo adyacente caña sirve como tránsito para que la broca se mueva entre los cafetales, en cambio el uso de suelo que mejor controla el movimiento de la broca es el bosque, ya que las cantidades y distancias de captura fueron comparativamente menores que los usos pasto y caña. Por lo tanto el bosque representa una barrera para el movimiento de la plaga entre parcelas de cafetales.

Palabras claves: servicios ecosistémicos, dispersión de insectos, abundancia de insectos.

SUMMARY

In order to adjust statistical models that describe the dispersion of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in adjacent land uses to coffee plantations (grass, sugar cane and forest), data from Amada Olivas (2010) was used. Sampling was conducted with a methodology of transects in farms located in the canton of Turrialba, within the Central Volcanic Corridor Talamanca (CBVCT) in Costa Rica. In each transect BrocapTM traps were placed every 10 m, capturing the berry borer for six months.

With the purpose to study the distance at which the insect is dispersed in different adjacent land uses, three statistical modeling approaches were used 1) non-linear models, 2) general linear mixed models and 3) generalized linear mixed models. These different modeling approaches within each model type were evaluated with the information criteria AIC and BIC. To compare these different modeling approaches, the Pearson correlation coefficient between the predicted values for each model and the observed values was used.

The results of this work, suggest that the best fit for the description of the insect dispersion was according to the generalized linear mixed model. Based on this model, the approximate maximum distance of dispersal occurred in the adjacent sugar cane land use at 30 m and the minimum distance was in the adjacent forest land use at 10 m. These results suggest that the use of adjacent sugar cane land use, serves as a path for the coffee berry borer to move among the coffee plants. In the other hand, the best land use that controls the movement of the berry borer is the forest, given that the quantity of insects captured were significantly lower than the other land uses, such as grass and sugar cane. This means that the forest represents a barrier for the movement of the plague between coffee plots.

Keywords: ecosystem services, insect dispersion, insect abundance

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Depredadores, parasitoides y patógenos que atacan a <i>H. hampei</i>	14
Cuadro 2. Componentes de un modelo estadístico	16
Cuadro 3. Clasificación de modelos estadísticos.....	16
Cuadro 4. Modelos no lineales utilizados en la estimación de la relación foco de dispersión y cada clase de distancia en la que fueron colocadas las trampas	31
Cuadro 5. Modelos Generalizados Lineales y Mixtos para comparar la estimación de la relación foco de dispersión y cada clase de distancia en la que fueron colocadas las trampas. .	34
Cuadro 6. Modelos Generales Mixtos para comparar la estimación de la relación foco de dispersión y la distancia en la que fueron colocadas las trampas	35
Cuadro 7. Modelos no-lineales a dos tramos para comparar la estimación de la relación foco de dispersión y cada clase de distancia en la que fueron colocadas las trampas.....	36
Cuadro 8. Promedios de dispersión para cada uno de los usos de suelo adyacentes el café	37
Cuadro 9. Medidas de la calidad del ajuste de los diferentes modelos no lineales evaluados para la dispersión de la broca en suelos con uso “Bosque” adyacentes al cafetal en distintas localidades del Cantón de Turrialba, Costa Rica.....	38
Cuadro 10. Medidas de la calidad del ajuste de los diferentes modelos no lineales evaluados para la dispersión de la broca en suelos con uso “Caña” adyacentes al cafetal en distintas localidades del Cantón de Turrialba, Costa Rica	41
Cuadro 11. Medidas de la calidad del ajuste de los diferentes modelos no lineales evaluados para la dispersión de la broca en suelos con uso “Pasto” adyacentes al cafetal en distintas localidades del Cantón de Turrialba, Costa Rica	43
Cuadro 12. Parámetros estimados para el modelo exponencial seleccionado, su error estandar y límites de confianza (95%)	45
Cuadro 13. Parámetros(α y β) para el modelo exponencial mejor ajustado, y sus límites de confianza (95%) según localidad, para ver la relación que hay entre usos de suelo ...	46
Cuadro 14. Modelos lineales generales y mixtos para comparar los criterios AIC y BIC y así contemplar cual fue el mejor modelo evaluado.....	49
Cuadro 15. Modelo lineal general y mixto. Tabla de Análisis de Varianza mostrando las pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III) con la variable conteo	49
Cuadro 16. Medias ajustadas y errores estándares obtenidas usando modelos lineales generales y mixtos.	50

Cuadro 17. Medias ajustadas y errores estándares para cada distancia evaluada usando modelos lineales generales y mixtos	50
Cuadro 18. Modelos lineales generales y mixtos para comparar los criterios AIC y BIC y así contemplar cual fue el mejor modelo evaluado con la variable conteo transformada a logaritmo natural.....	53
Cuadro 19. Tabla de Análisis de Varianza mostrando las pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III) con la variable conteo transformada a logaritmo natural	53
Cuadro 20. Modelo lineal general y mixto. Contrastes y sus pruebas de hipótesis entre usos de suelo por cada distancia evaluada con la variable conteo transformada a logaritmo natural	55
Cuadro 21. Criterios de ajuste para la selección del mejor Modelo Lineal Generalizado Mixto	58
Cuadro 22. Modelos lineales generalizados mixtos. Pruebas de hipótesis secuenciales para los efectos fijos teniendo en cuenta la variable conteo	58
Cuadro 23. Modelos lineales generalizados mixtos. Contrastes y sus pruebas de hipótesis entre usos de suelo por cada distancia evaluada con la variable conteo.....	59
Cuadro 24. Modelos que mejor se ajustaron para comparar la estimación de la relación foco de dispersión y cada distancia en la que fueron colocadas las trampas	61
Cuadro 25. Correlación de Pearson entre la variable respuesta conteo y los predichos de los modelos que mejor ajustaron los datos	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes estados fenológicos del café.	6
Figura 2. Ciclo de vida de <i>H. hampei</i>	9
Figura 3. Proceso de infestación.	11
Figura 4. Mapa de usos de suelo del Corredor biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica 2009.	23
Figura 5. Representación de las parcelas de café seleccionadas y los usos de suelo colindante, situado en el cantón de Turrialba, Costa Rica Olivas 2009.	24
Figura 6. Diagrama de dispersión de conteos totales por trampa vs. distancias con el correspondiente ajuste obtenido del mejor modelo para el tipo de uso Bosque, en las localidades CATIE, Colima y Tuis.	39
Figura 7. Diagrama de dispersión de conteos totales vs. distancias con el correspondiente ajuste obtenido del mejor modelo para el tipo de uso Caña, en las localidades CATIE, Cien Manzanas, La Fuente y Máquina vieja.	42
Figura 8. Diagrama de dispersión de conteos vs. distancias con el correspondiente ajuste obtenido del mejor modelo para el tipo de uso Pasto, en las localidades Cien manzanas Colima, La Fuente y Tuis.	44
Figura 9. Gráfico de barras para las medias de los conteos de broca por uso de suelo según localidad.	46
Figura 10. Valores predichos para la cantidad de broca capturada desde el borde del café hacia los usos de suelo adyacente vs las distancias, para el modelo exponencial.	48
Figura 11. Valores predichos para la cantidad de broca capturada desde el borde del café hacia los usos de suelo adyacente vs las distancias, para el modelo lineal general mixto.	51
Figura 12. Gráficos de diagnóstico obtenidos para la variable conteo Ajuste de Modelos Lineales Generales y Mixtos transformando la variable respuesta conteo a logaritmo natural para dispersión de broca.	52
Figura 13. Gráficos de diagnóstico obtenidos para la variable Ln conteo.	56
Figura 14. Valores predichos para la cantidad de broca capturada desde el borde del café hacia los usos de suelo adyacente vs las distancias, para el modelo lineal generalizado mixto con la variable respuesta transformada a logaritmo natural.	57
Figura 15. Valores predichos para la cantidad de broca capturada desde el borde del café hacia los usos de suelo adyacente vs las distancias, para el modelo lineal generalizado mixto.	60

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

ICAFFE: Instituto del Café de Costa Rica

CIRAD: *Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*

OIC: Organización Internacional de Café

1 INTRODUCCIÓN

Una de las bebidas más consumidas mundialmente es el café (*Coffea arabica*) por lo que el sector cafetalero es uno de los más importantes en los países productores de este cultivo, ubicados principalmente en América Latina y el Caribe (FAO 2004). Este cultivo tiene su origen en la forma nativa de la especie (*Coffea arabica*) la cual es originaria de Etiopia, donde se encuentra en los sotobosques por encima de los 1500 m (Guharay et ál. 2000).

A finales del siglo XX, el sector cafetalero atravesó una de las peores crisis de la historia. El exceso de la oferta del café en el mercado mundial fue la causa de los precios más bajos observados en los últimos cien años. Los productores reaccionaron a la disminución de los precios reduciendo la utilización de insumos agrícolas y reemplazando el cafetal por otros cultivos (FAO 2004). En Centroamérica la crisis se sintió fuertemente ya que el desempleo afectó a más de 1,5 millones de personas.

En Guatemala, la mitad de los trabajadores dedicados al cultivo de café, tuvieron que cambiar de trabajo o viajar a otras ciudades como desempleados de las haciendas de café y en algunos casos, emigrar hacia los Estados Unidos de Norte América (OIC 2003). A mediados de los años 90, en Centro América se dio una mejora en los precios del café que incentivó el crecimiento del cultivo y se implementaron los procesos de certificación, con el fin de mejorar las condiciones sociales y la calidad de vida de las familias productoras de café, para promover el mercado y el desarrollo del café sostenible (Quispe 2007).

Costa Rica fue el primer país centroamericano que estableció este cultivo a finales del siglo XVIII y ocupa el tercer lugar en consumo en América Latina después de Brasil y Colombia (FAO 2004). La producción de café en el país se inició en el Valle Central de donde se dispersó a las siete regiones productoras. Con el café y su exportación a Europa, llegaron a Costa Rica el ferrocarril, el correo, la imprenta, la primera universidad y la construcción del Teatro Nacional, entre otros (ICAFE s.f).

A nivel mundial, uno de los principales enemigos de este cultivo es la broca *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleóptera: Curculionidae). Este insecto originario de África ocasiona daños importantes en los granos de café asociados con la perforación y colonización

de los frutos, en donde realiza galerías y oviposita, permaneciendo en el interior mientras su progenie se desarrolla (Romero y Cortina 2007). Cuando los frutos son pequeños la broca puede provocar la caída prematura de los frutos lo que se refleja en una menor producción de granos maduros, afectando seriamente la productividad (Guharay et ál. 2000).

El mayor daño se debe a que la broca no solo perfora los frutos tiernos, sino también los granos maduros, produce daño fisiológico, pudrición de frutos y la caída de estos al suelo, provocando pérdidas directas en el peso y afectando la calidad de la bebida debido a la presencia de micotoxinas como las ochratoxinas producidas por *Aspergillus ochraceus* Wilh (Guharay et ál. 2000).

A pesar del gran impacto de esta plaga sobre los cultivos de *Coffea arabica*, existen evidencias que permiten pensar que el hospedero original de la broca fue la especie *Coffea canephora* la cual se desarrolla a alturas menores a 1500 msnm, donde se presentan las condiciones óptimas para el desarrollo de esta plaga (Guharay et ál. 2000). Actualmente la broca se encuentra en todas las regiones del mundo donde hay cultivos de café. Esta colonización se ha dado mediante el transporte de semillas infectadas en sacos, contenedores y barcos (Barrera et ál. 2005, Guharay et ál. 2000).

La dispersión también se da debido a otros factores como el traslado de granos infectados al acopio, el uso de instrumentos infectados, la migración de trabajadores que concurren en las labores de recolección de café, la adherencia de las brocas en la vestimenta de recolectores de café (corteros), los sacos o costales donde se traslada el fruto cortado y el uso de pulpa sin fermentar como abono en las fincas (Trejo 2004).

Los caficultores han implementado diversas prácticas con el fin de evitar la dispersión de la broca. Esto ha incrementado los costos de producción y se han implementado técnicas poco apropiadas, como los plaguicidas sintéticos que los caficultores utilizan de manera inadecuada tratando de controlar pérdidas cuantiosas por infestación y que en algunos casos traen como consecuencia la aparición de nuevas plagas secundarias, elevando nuevamente los costos y produciendo daños más graves (Guharay et ál. 2000).

Para el manejo de la presencia e impacto del ataque de las plagas, es importante reconocer no solo el efecto de la interacción del ambiente, el hospedero, la plaga, sino también aspectos biológicos y ecológicos de las plagas como sus mecanismos de reproducción y su habilidad para moverse a través del paisaje dependiendo de la estructura del mismo (Olivas 2010). En el caso de la broca, el mecanismo de dispersión es una limitante ya que el insecto para colonizar nuevas áreas en ocasiones debe volar largas distancias (Baker 1984). La dirección y la distancia de vuelo están relacionadas entre otros aspectos con las condiciones geográficas del sitio en donde esté ubicado el cafetal, los factores climáticos y la dirección de los vientos (Mathieu et ál. 1997, Damon 2000).

Ante la prohibición creciente del uso de endosulfan, el control biológico aparece como una gran alternativa y está relacionado principalmente con la caficultura orgánica (Gómez 1994). Dentro de los principales controladores están las avispas *Prorops natusa* (ectoparásito de adultos) y *Cephalomia stephanoderis* (endoparásito de adultos), y hongos entomopatógenos que han sido aplicados a plantaciones de café. Es importante tener en cuenta que estos enemigos naturales dependen de factores micro-climáticos que los favorezcan, así como de la disponibilidad de flores, la calidad de suelo y la variabilidad de hongos (Guharay et ál. 2000).

Conociendo la relación que hay entre el paisaje en el cantón de Turrialba, la forma en cómo se dispersa la broca, los efectos de suelo adyacentes sobre las poblaciones de *H. hampei* y la influencia de la heterogeneidad del paisaje en la dinámica y dispersión del insecto, a nivel agronómico se pueden proponer configuraciones de paisaje que actúen como barreras para la dispersión de la broca contribuyendo así a generar estrategias de control a la dispersión de la plaga y con esto reducir las pérdidas económicas a los cafeteros, derivados de la infestación de sus cultivos por este insecto (Olivas 2010).

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Determinar el patrón de dispersión de la broca (*Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae) hacia afuera de los cafetales con diferentes usos de suelo adyacentes bajo diferentes modelos predictivos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Construir curvas de dispersión y establecer qué familia de curvas dentro de los ajustes no-lineales se adapta mejor para diferentes usos de suelo asociados a los cafetales, en seis fincas del cantón de Turrialba.
- Evaluar análisis alternativos en el marco de los modelos lineales generales y mixtos y los modelos lineales generalizados mixtos que permitan ajustar curvas de dispersión de broca y compararlos con modelos no-lineales a través de los errores de predicción.
- Evaluar la similitud entre las diferentes curvas de dispersión obtenidas por finca y por uso usando el mejor modelo de predicción.

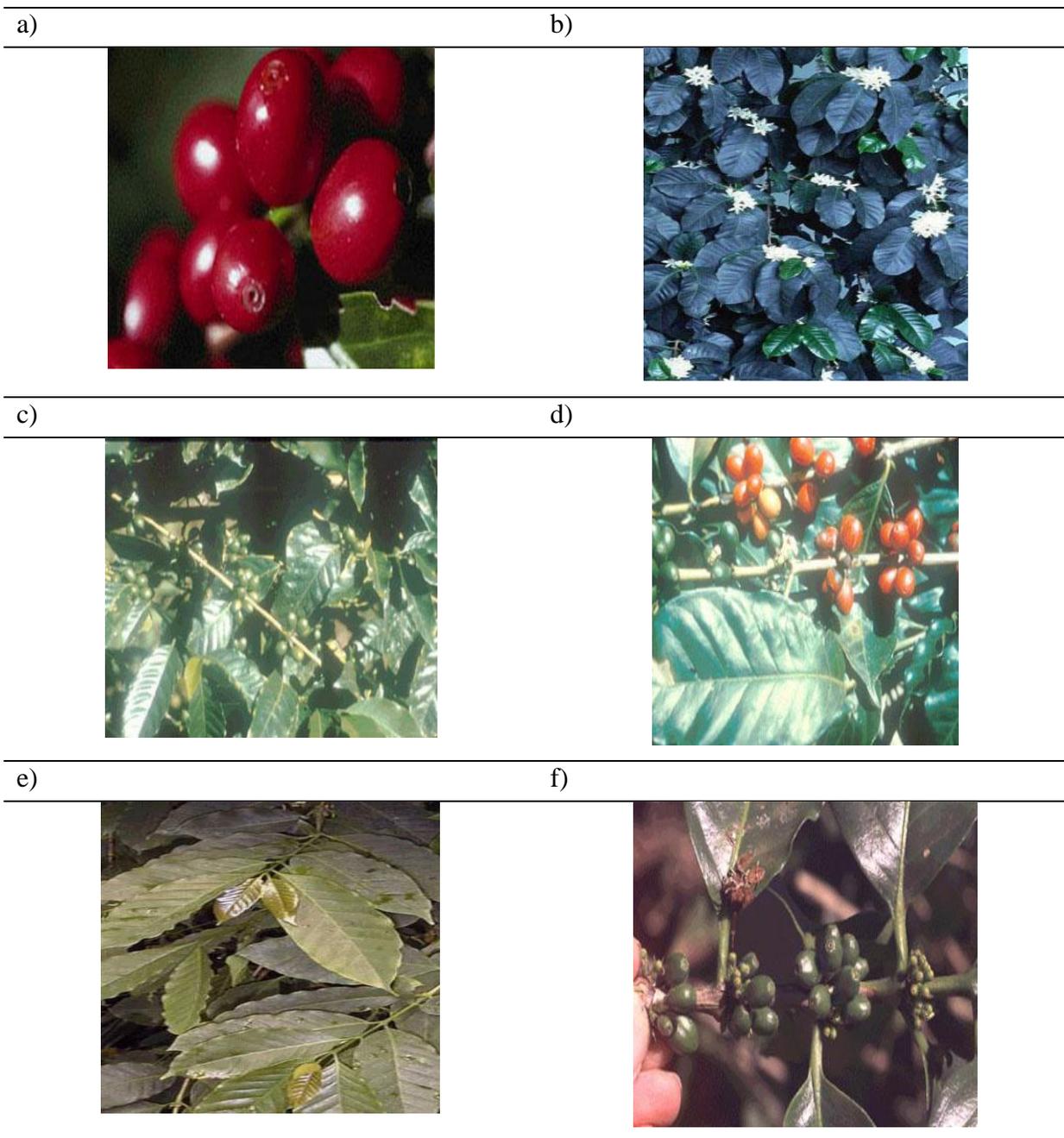
2 MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción del café o cafeto

Esta planta pertenece al grupo de las Fanerógamas, clase Angiosperma, sub-clase Dicotiledóneas, orden Rubiales, familia Rubiáceas, género *Coffea* del cual existen entre 25 y 40 especies entre Asia y África tropical. Las especies más comercializadas son *C. arabica* L. (Café arábico), *C. canephora* Pierre ex A. Froehner (Café robusta), *C. liberica* Hiern (Café liberiano) y *C. excelsa* A. Chev (Café excelso) (González 2007).

2.1.1 Fenología del café

Su fruto botánicamente es una drupa comúnmente conocida como cereza, mide de 10 a 17 mm de largo por 8 a 14 mm de ancho (Figura 1a.). Sus flores blancas se presentan en una inflorescencia compleja denominada cima, de entre 6 a 12 mm de largo y de 3 a 4 mm de ancho (Figura 1b.). El tallo y las ramas presentan 2 tipos de crecimiento: vertical y ortotrópico (ortótropo), caracterizado por tener un tallo central con pocas ramificaciones verticales (Figura 1c.). Sus hojas son opuestas, ovales, enteras, duras y su color es verde oscuro brillante en el haz (Figura 1d.). Las hojas presentan en su mayoría crecimiento lateral, miden de 7 a 17 cm de largo y de 3 a 8 cm de ancho (Figura 1e.). Es un arbusto que puede medir hasta 7 m de altura, su forma es cónica o irregular y en condiciones normales de crecimiento se desarrolla con un sólo eje (Figura 1f.). Con una fertilización equilibrada en nutrientes, se tienen plantas más vigorosas y sanas, aumentando considerablemente la producción. Posee una raíz principal o pivotante, que profundiza de 0,5 hasta 1 m en suelos profundos (González 2007).



Fuente de las imágenes: www.redesc.ilce.edu.mx

Figura 1. Diferentes estados fenológicos del café.

2.2 La broca del café: breve reseña histórica

La broca del café *Hypothenemus hampei* es un insecto originario del África Ecuatorial (Guinea, El Congo, Uganda y Kenia). Fue descubierta y clasificada en Francia en 1867 por Ferrari, quien la observó en granos importados de África; este ha sido el primer informe que se

ha tenido sobre el insecto y en 1901 en Gabón, África se obtuvo la primera referencia en campo (López 1994, Borbón 1995).

Este insecto se encuentra presente en África en todos los países en donde existe producción de café, especialmente en Uganda, Angola, Gabón y Tanganika. En 1910 esta plaga llega a Java e invade toda la isla. En Brasil aparece en 1913 y en 1924 ya es considerada como la más nociva en las plantaciones de café por lo que se han realizado gran cantidad estudios sobre los daños y biología de la broca en este país (Borbón 1995).

En la actualidad, la distribución e infestación de la broca se encuentra en las regiones tropicales de África, Asia, América y Oceanía en más de 60 países (Barrera et ál. 2000). La primera aparición de broca en la región de Centroamérica se registró en Guatemala en 1971 por la introducción aparente de semillas clandestinas de un agricultor desde Brasil y más adelante se propagó en los demás países del área: Honduras (1977), México (1978), El Salvador (1981) y Nicaragua en 1988. Reportándose también en Jamaica y Puerto Rico (López 1994). El 18 de diciembre de 2000 es detectada en Costa Rica, en Barreal de Heredia (Valle Central) y desde entonces ha aumentado de forma significativa su distribución en el país.

2.2.1 Clasificación taxonómica

La broca del café ha sido descrita con los sinónimos de *Cryphalus hampei* y *Stephanoderes hampei*, antes de 1960, después fue conocida como *Stephanoderes coffea*, *Xyleborus coffeicola* y *Xyloborus coffeivorus* y a partir de 1960 fue clasificada como *Hypothenemus hampei* por Le Pelley (López 1994). Este insecto pertenece a la clase Insecta, orden Coleoptera, familia Curculionidae, subfamilia Scolytinae, tribu Scolytini, género *Hypothenemus* y especie *hampei* (Bark 2006).

2.2.2 Biología de la broca del café

La broca es un insecto holometábolo, que se caracteriza por presentar un estado de huevo, varios estados larvarios, un estado de pupa, y luego pasa a adulto (Figura 2). Presenta dimorfismo sexual en características físicas como la longitud del cuerpo, donde los machos miden entre 1 a 1,25 mm de largo y 0,5 a 0,6 mm de ancho, siendo más pequeños que las

hembras (1,37 a 1,82 mm de largo, y 0,62 a 0,80 mm de ancho); los machos tienen las alas membranosas que no les permiten volar (Damon 2000, Oviedo 2006). El macho de la broca vive de 20 a 87 días y permanece en el fruto. Su función principal es fecundar a la hembra entre 3 y 5 días después de que ésta emerge (Mathieu et ál. 1997, Oviedo 2006). La hembra de la broca puede vivir hasta 157 días (Damon 2000).

Estudios en condiciones de laboratorio encontraron que la hembra de la broca puede volar libremente desde una hora y media y hasta más de tres horas en vuelos sucesivos. Puede alcanzar distancias hasta de 400 m sin ayuda del viento, volando hasta 22 minutos corridos sin descanso y hasta 100 minutos con pausas intermedias, aunque en general, el vuelo es lento y en forma vertical hasta que encuentra corrientes de aire que la arrastran hacia otros sitios (Baker 1984).

La broca abandona el fruto durante las horas de luz solar máxima, lo cual entre otros aspectos, puede estar relacionado con la insolación; se han registrado posibles regresos a granos infestados lo que permite encontrar hembras de diferentes estadios de madurez dentro de un fruto (Mathieu et ál. 1997, Damon 2000). Los abandonos se relacionan con eventos como el consumo de los tejidos de la semilla, la emergencia de las pupas y la sobrepoblación de hembras, entre otros (Mathieu et ál. 1997).

El ciclo de vida de la broca, comienza cuando la hembra fecundada perfora el área de la corona del grano construyendo un túnel hacia el interior para depositar sus huevos (entre 31 y 119 por fruto). El ritmo de postura es variable, dependiendo de la edad de la hembra (Damon et ál. 2000, Oviedo 2006), los huevos son puestos en grupos de 2 a 8, son ligeramente elípticos y miden aproximadamente 0,83 mm de largo y 0,45 mm de ancho. Luego de 4 días de la oviposición emergen las larvas que duran aproximadamente 15 días alimentándose de la semilla del fruto (Damon 2000).

Su tamaño oscila entre 1,17 a 2,3 mm de largo y 0,37 a 0,58 mm de ancho, las larvas son ápodas (no tienen patas), con mandíbulas fuertes y su cuerpo está cubierto por grandes setas. Las hembras pasan por tres estados larvarios y el macho por dos, siendo estos generalmente los que primero nacen y completan su desarrollo (Oviedo 2006).

Posteriormente las larvas se convierten en pupas que permanecen en reposo por un lapso de 7 días, antes de emerger los adultos (Damon 2000). Las pupas son parecidas a las larvas, pero se diferencian por su inmovilidad; la pupa de la hembra mide de 1,37 a 1,93 mm de largo y 0,51 a 0,82 mm de ancho; el macho es más pequeño y mide 1,3 mm de largo y 0,55 mm de ancho, las hembras pasan por dos procesos de muda y el macho por uno. Aunque una hembra puede salir fecundada a buscar nuevos frutos, en ocasiones se queda y puede llegar a poner entre 15 a 60 huevos, este comportamiento explica porque en un fruto se puedan encontrar hasta 82 adultos (Oviedo 2006).



Fuente de las imágenes: www.nbaii.res.in

Figura 2. Ciclo de vida de H. hampei.

2.2.3 Condiciones favorables para su desarrollo

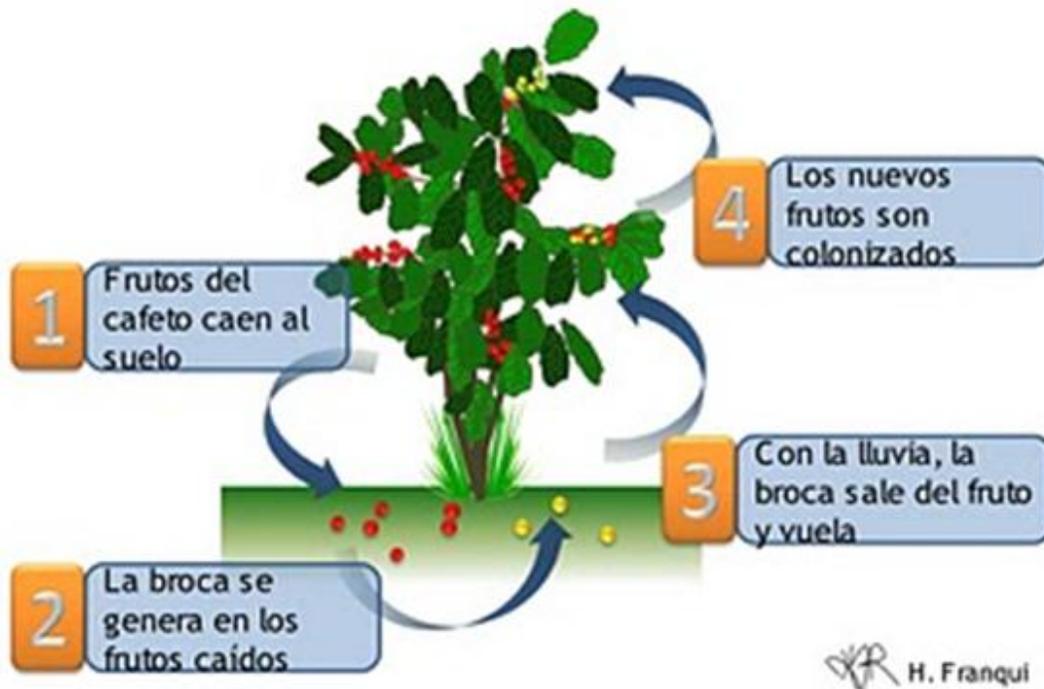
Se ha documentado una duración aproximada del ciclo de vida de la broca de entre 25 y 27 días, el cual puede variar dependiendo de condiciones climáticas, dentro de las que se

considera la temperatura como la más importante (Oviedo 2006), con un valor promedio óptimo de 23 °C a 27 °C, inactivándose por debajo de 15 °C (Dufour et ál. 1999). Adicionalmente, una alta humedad relativa asociada a abundantes precipitaciones, se relaciona con condiciones de mayor actividad en las hembras (Dufour et ál. 1999, Damon 2000, Oviedo 2006).

Otros factores como la altitud también inciden en la duración del ciclo. El rango óptimo para el desarrollo de la broca está entre los 800 y 1000 m, aunque algunos estudios han reportado infestaciones a menores y mayores alturas, lo cual puede estar evidenciando una posible adaptación de la especie (Sibaja y Jiménez 1989).

Baker (1994) estudió la mortalidad de la broca del café en condiciones controladas de laboratorio en Tapachula, México, encontrando la combinación de humedad relativa y temperatura como factores importantes, ya que entre el 84% y el 93,5% de humedad relativa y entre 20 °C y 25 °C se tuvo la mayor supervivencia (20 a 28 días) y como resultado, de acuerdo a lo anterior las hembras pueden sobrevivir sin alimento por más de 10 días (Mathieu et ál. 1997).

La proporción de hembras y de machos varía de acuerdo al estado de la infestación, sin embargo, predominan el número de hembras, con una relación aproximada de 10 a 1 (Oviedo 2006, Damon 2000). El proceso de infestación consta de cuatro etapas, la primera cuando el fruto del cafeto cae al suelo, la segunda cuando la broca emerge de los frutos caídos, la tercera con la lluvia, la broca sale del fruto y vuela y la cuarta cuando los nuevos frutos son colonizados.



Fuente: Franqui 2008

Figura 3. Proceso de infestación.

2.2.4 Métodos de control de la broca

Para la implementación de técnicas para el manejo y control de la broca y con el fin de evitar disminuir los efectos negativos que su presencia causa, es necesario tomar en cuenta el impacto de esta plaga en la productividad y la calidad del grano de café así como su forma de dispersión en las plantaciones de café (Oviedo 2006). Las prácticas de control integrado son muy importantes como métodos de control de la plaga, ya que incluyen un conjunto de estrategias para el manejo de la broca y ayudan a disminuir considerablemente el daño económico que la plaga pueda ocasionar.

2.2.4.1 Control con trampas de captura

Las trampas de captura cuentan con un alto grado de aceptación por parte de los agricultores, ya que son un método importante de control ampliamente difundido. Durante el transcurso del tiempo se han venido desarrollando modelos de trampas como las BROCAP® que es de tipo industrial producida en El Salvador por PROCAFE y CIRAD, la IAPAR de tipo

artesanal que se elabora con materiales de desecho y la FIESTA producida en Costa Rica por ICAFE (Schuller 2005).

Actualmente los trabajos de investigación en lo que respecta a este tipo de control, se enfoca en la búsqueda de nuevos atrayentes con mayor eficacia. Por lo tanto es necesario entender mejor los factores que establecen la migración de la plaga en la época de post cosecha y calcular la capacidad que tiene la trampa para ayudar en parte las deficiencias del control cultural, en cuanto a raspa y recolección de frutos, esto ocurre periódicamente en los años donde se presentan precios bajos (Schuller 2005).

2.2.4.2 Control químico

Este método no es recomendable en la caficultura, ya que involucra el uso de insecticidas, lo que puede llevar a perjudicar los insectos benéficos, la salud humana y el medio ambiente (Proyecto SICA/MAG 2004). A pesar de lo anterior, este tipo de control puede ser eficaz si se tiene el mayor cuidado posible y las siguientes condiciones para su uso (López 1994).

1. Realizar un muestreo y así determinar el umbral económico de la plaga en el cultivo.
2. Aplicarlo en focos o puntos calientes y no en forma generalizada en las fincas, debido al carácter gregario de la broca.
3. Aplicarlos cuando la broca esté penetrando al fruto o se encuentre en el canal de penetración.
4. Calibrar los equipos de aspersión y la concentración del producto en la mezcla, basado en la dosis.
5. El personal que realiza las aspersiones de insecticidas debe entrenarse previamente.

2.2.4.3 Control biológico

Dado que el ciclo de vida de la broca ocurre únicamente dentro del fruto, siendo este un hábitat que brinda protección a la plaga, el control de la misma es muy difícil, por lo que los organismos biológicos de control son muy deseados ya que pueden atacar a la plaga dentro

del fruto (Benavides et ál. 2003). El control biológico se basa en usar enemigos naturales los cuales son utilizados para la disminución del ataque y la reducción de la plaga (Campos 2001). La broca posee enemigos naturales, depredadores y patógenos que han sido reportados en todo el mundo tanto en condiciones de laboratorio como en la naturaleza (Cuadro 1)

De las especies listadas en el cuadro 1, ocho son parasitoides (P), dos son depredadores (D), cuatro son hongos entomopatógenos (H.E), una es una bacteria (B) y varias son especies de nematodos (N). Con excepción de una especie no identificada del género *Cephalonomia* y otra de la familia *Proctotrupoidea* reportadas en Brasil, todos los parasitoides fueron reportados y son originarios de África (Barrera et ál. 2000).

Los únicos enemigos naturales de la broca utilizados como técnica de control a nivel mundial han sido los parasitoides *Cephalonomia stephanoderis* Betrem, *Prorops nasuta* Waterson, *Heterospilus coffeicola* Schmideknecht, *Phymastichus coffea* LaSalle y el hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana*. Los parasitoides *Prorops nasuta* y *Heterospilus coffeicola* fueron los primeros en ser utilizados en los años treinta, mientras que, el interés en *Cephalonomia stephanoderis*, *Phymastichus coffea* y *Beauveria bassiana* ha sido mucho más reciente (Barrera et ál. 2000).

Es importante tener en cuenta que la broca no es específica del café, lo cual puede ser un factor significativo en las zonas productoras de café, donde la producción es estacional. La broca ha encontrado hospederos alternativos como vainas o semillas de *Crotalaria*, *Phaseolus* y *Tephrosia* (Fabaceae), *leucaena* (Mimosaceae), *Caesalpinia* (Caesalpinaceae), *Hibiscus* (Malvaceae), *Rubus* y *Oxyanthus* (Rubiaceae), *Vitis* (Vitaceae) y *Ligustrum* (Oleaceae) (Franqui y Medina 2003), lo que podría contribuir a la reducción de la infestación por broca, aunque no hay estudios sobre el potencial de estas plantas alternas para atraer a la broca lejos de la cosecha de café (Damon 2000).

Cuadro 1. Depredadores, parasitoides y patógenos que atacan a *H. hampei*

Familia	Especie	Distribución	Observaciones
Bethyridae (P)	<i>Cephalonomia stephanoderis</i>	Costa de Marfil, Togo, Camerún, Guatemala, México, Brasil, etc.	Ectoparasitoide de larvas de última fase, prepupas y pupas; el adulto depreda sobre todos los estadios.
	<i>Cephalonomia</i> sp.	Brasil	Especie no identificada
	<i>Prorops nasuta</i>	Camerún, Costa de Marfil, Togo, Colombia, Brasil, Ecuador, Nicaragua, etc.	Ectoparasitoide de larvas de última fase, prepupas y pupas; el adulto depreda sobre todos los estadios.
	<i>Sclerodermus cadavericus</i>	Uganda, Zaire, Kenia	Provoca dermatosis
Braconidae (D)	<i>Heterospilus coffeicola</i>	Camerún, Zaire, Kenia, Tanzania, Uganda.	La larva es depredadora; no específico.
Eulophidae (P)	<i>Phymastichus coffea</i>	Togo, Kenia, Colombia.	Parásito de adultos; no específico
Ceraphronidae (P)	<i>Aphanogmus dictyna</i>	Uganda	Hiperparasitoide; parasita aparentemente a <i>P. nasuta</i> .
Proctotrupeoidea (P)	Especie no identificada	Brasil	Parásito de adultos
Formicidae (D)	<i>Crematogaster curvispinosus</i>	Brasil	Depredador
Pyrrhocoridae (D)	<i>Dindymus rubignosus</i>	Indonesia	Depredador no específico.
Heterohabditidae (P)	<i>Heterohabditis</i> spp.	-	No específico; bioensayos de laboratorio, no reportado en la naturaleza.
Steinernematidae (N)	<i>Steinernema carpocapsea</i>		No específico; bioensayos de laboratorio, no reportado en la naturaleza.
Hypomycetes (H.E)	<i>Beauveria bassiana</i>	Cosmopolita	Muchas cepas.
	<i>Metarhizium anisopliae</i>	Brasil, Colombia, México.	Muchas cepas; bioensayos de laboratorio.
	<i>Nomuraea rileyi</i>		Rara sobre Coleóptera.
	<i>Paecilomyces (=Spicaria) jovanicus</i>	Indonesia	
Bacillaceae (B)	<i>Bacillus thuringiensis</i>	México	Bioensayos de laboratorio.

Fuente: (Barrera et ál. 2000).

2.3 Dispersión

La dispersión hace referencia al movimiento que tiene una población. Esta es una característica ecológica importante, ya que según la edad, estos organismos aprovechan diferencialmente los recursos dentro del ecosistema (Irwin et ál. 2000).

La dispersión permite a la población de la especie ocupar gran parte del hábitat disponible, de modo que maximiza los recursos a su favor. En la mayoría de casos las especies como las plantas y animales se han desarrollado y adaptado para dispersarse con factores como el viento. La dispersión de estos organismos es un proceso complejo para entender el aislamiento geográfico en la evolución y sus patrones de distribución geográficas actuales (Irwin et ál. 2000).

2.4 Modelos estadísticos

Los modelos estadísticos, se definen como un caso especial de modelos estocásticos cuyos parámetros son desconocidos, y se estiman a partir de datos empíricos. Estos modelos son utilizados generalmente para deducir la variabilidad de un fenómeno en particular, también permite evaluar el grado de significancia y los roles de sus respectivas variables para así encontrar la variabilidad del fenómeno descrito (McCullogh 2001).

2.4.1 Aspectos funcionales de un Modelo Estadístico

Los modelos estadísticos describen las propiedades de distribución de las variables respuesta incluidas en el estudio, descomponiendo su variabilidad en fuentes conocidas y desconocidas y representan un mecanismo para generar datos con las mismas propiedades estadísticas que los datos observados. Estos modelos se consideran correctos en sentido promedio. La calidad de un modelo no es función de su tamaño ni complejidad, sino que depende de su utilidad en un estudio o experimento construido para responder preguntas de interés (McCullogh 2001).

Cuadro 2. Componentes de un modelo estadístico

Modelo estadístico: $Y_i = f(X_0, X_1, \dots, X_k; \theta_0, \theta_1, \dots, \theta_p) + e_i$	
Respuesta	Resultado que se mide, cuenta o clasifica
Parámetro	Constante desconocida en la función media o en la distribución de las variables aleatorias.
Parte sistemática	Función media del modelo
Error	Diferencia entre observaciones y función media
Predicción	Evaluación de la función media para las estimaciones de los parámetros
Residuos	Diferencia entre valores observados y valores ajustados
Respuesta = Estructura + Error	
<i>Fuente: McCullogh (2001)</i>	

Cuadro 3. Clasificación de modelos estadísticos

-Lineales	-No linealidad se refiere a la Curvatura de la Función Media de las variables
-No Lineales	-Modelo No lineal: al menos una derivada de la función media los parámetros depende al menos de un parámetro del modelo
-Regresión	-Regresión: variables son variables continuas
-ANOVA	-ANOVA: variables son variables de clasificación
-ANCOVA	-ANCOVA: variables son mezcla de variables continuas y de clasificación.
-Univariada	-Univariada: análisis de una sola respuesta
-Multivariada	-Multivariada: análisis de varias respuestas simultáneamente. -Medidas de diferentes respuestas -Medidas de la misma respuesta en múltiples puntos del tiempo y/o espacio (medidas repetidas o longitudinales y datos espaciales)
-Efectos Fijos	La distinción entre efectos está relacionada con la naturaleza de los parámetros desconocidos del modelo:
-Efectos Aleatorios	-E. Fijos: todos los efectos son fijos (excepto el error)
-Efectos Mixtos	-E. Aleatorios: todos los efectos son aleatorios (excepto el intercepto) -E. Mixtos: algunos efectos son fijos y otros son aleatorios
<i>Fuente: McCullogh (2001)</i>	

2.5 Modelos lineales

Sea Y una variable aleatoria que fluctúa alrededor de un valor desconocido η , esto es

$$Y = \eta + \epsilon$$

donde ϵ es el error, de forma que η puede representar el valor verdadero e Y el valor observado. Supongamos que η toma valores distintos de acuerdo con diferentes situaciones experimentales según el modelo lineal:

$$\eta = \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m$$

donde β_i son parámetros desconocidos y x_i son valores conocidos, cada uno de los cuales ilustra situaciones experimentales diferentes.

En general se tienen n observaciones de la variable Y . Diremos que y_1, y_2, \dots, y_n observaciones independientes de Y siguen un modelo lineal si:

$$y_i = x_{i1}\beta_1 + \dots + x_{im}\beta_m + \epsilon_i, \text{ con } i = 1, \dots, n.$$

Estas observaciones de Y se pueden considerar variables aleatorias independientes y distribuidas como Y o también realizaciones concretas (valores numéricos) para los cálculos.

La expresión del modelo lineal en forma matricial es

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix}$$

O en forma resumida

$$Y = X\beta + \epsilon$$

Los elementos que constituyen el modelo lineal son:

1. El vector de observaciones $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)'$.
2. El vector de parámetros $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)'$.
3. La matriz del modelo

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix}$$

cuyos elementos son conocidos.

En problemas de regresión, X es la matriz de regresión. En los llamados diseños factoriales del Análisis de la Varianza, X recibe el nombre de matriz de diseño.

4. El vector de errores o desviaciones aleatorias $\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m)$, donde ϵ_i es la desviación aleatoria de y_i (Carmona 2003).

2.5.1 Modelos no lineales

Los modelos no lineales logran mejores aproximaciones, pero son de más difícil resolución (pueden ser exponenciales, potenciales, logarítmicos, etc.). Estos modelos son de gran importancia, ya que sirven para evaluar el perfil de respuesta de los tratamientos a lo largo del tiempo, estudiar interacciones de respuestas de las subpoblaciones o tratamientos con el tiempo, obtiene la varianza entre y dentro de individuos que es de gran interés general en los estudios de curvas de crecimiento; también permiten que los grupos de informaciones en series puedan ser condensados en un pequeño número de parámetros, para facilitar la interpretación y el entendimiento de los fenómenos (Malhado 2008).

2.5.2 Modelos lineales generales y mixtos

En términos generales, estos modelos permiten encontrar la respuesta de un estudio ya sea experimental u observacional como función de factores o covariables, cuyos efectos pueden considerarse tanto fijos como aleatorios, estos son útiles en el ámbito de la física, biología y sociales, cada modelo estadístico que contiene una media general μ , es un modelo mixto por definición, ya que también contiene un término de error aleatorio, y por tanto contiene ambos tipos de efectos (Gómez et ál. 2012).

2.5.3 Modelos lineales generalizados y mixtos

Los modelos lineales generalizados mixtos permiten en un ámbito estadístico, proporcionar el medio más amigable para responder a cuestionamientos en un estudio de diseño experimental medianamente complejo; estos modelos aprueban analizar varias características de la variable respuesta (proporciones, variables de escala, recuentos, etc.) modelando de forma simultánea el valor esperado del estudio y su variabilidad. Particularmente se usan para modelar datos provenientes de experimentos u estudios observacionales en presencia de datos correlacionados (Badiella 2011).

2.5.4 Modelos de regresión por pasos

El modelo de regresión por pasos (*broken stick model*), establece el punto de intersección de dos rectas estimadas por mínimos cuadrados. El punto de intersección representa la distancia en la cual la plaga ya no se dispersa o su dispersión es muy baja. Consiste en ajustar dos modelos de regresión, donde el primer modelo tiene en este caso una ordenada al origen positiva y una pendiente negativa. El segundo modelo se une al primero en un punto que es el estimador de la distancia de dispersión. Este segundo modelo a su vez puede contener una suave pendiente (cuando a partir de esa distancia la dispersión es baja pero continúa) o ser solo una constante, cuando a partir del punto de intersección la dispersión es nula.

2.5.5 Modelo exponencial

En términos generales el modelo exponencial permite modelizar la difusión de epidemias de un rasgo entre una población y el crecimiento de las poblaciones.

El modelo exponencial se describe de la siguiente manera:

Sea $P(t)$ el tamaño de la población al tiempo t , el modelo exponencial presupone que la tasa de aumento de la población es proporcional a la población en el instante:

$$\frac{dP}{dt} = kP(t) \quad (1)$$

donde k es una constante de proporcionalidad y P es el tamaño de la población en el instante t . La ecuación (1) puede resultar adecuada cuando el tamaño de la población es pequeño en relación a las dimensiones del ecosistema, y en ese caso k es la tasa de aumento de la población que iguala a la tasa de natalidad menos la tasa de mortalidad (Thomson 2005).

Si el tamaño de la población en un instante t_0 es P_0 , el modelo exponencial predice que en cualquier otro instante futuro ($t > t_0$) la población viene dada, por la solución de la ecuación diferencial (1):

$$P(t) = A e^{kt}$$

2.5.6 Modelos Poisson

Esta técnica es utilizada para describir los datos de recuento como una función de un conjunto de variables predictoras. Se usa para modelar datos de conteo (número de veces que ocurre cierto fenómeno aleatorio). A menudo se aplica al estudio de la ocurrencia en pequeños números de recuentos o eventos de una función de un conjunto de variables de predicción, en estudio experimental y observacional (Stefano 2006).

2.6 Ajuste de curvas

El ajuste de curvas consiste en encontrar una curva que contenga una serie de puntos y que generalmente cumpla una serie de restricciones adicionales desde un punto de vista estadístico (Castillo et ál. 2002).

2.7 Regresión no lineal

La regresión no lineal es un problema de inferencia para un modelo tipo:

$$y = f(x, \theta) + \varepsilon$$

Basado en datos multidimensionales x, y , donde f es alguna función no lineal respecto a algunos parámetros desconocidos θ . Como mínimo, se pretende obtener los valores de los parámetros asociados con la mejor curva de ajuste. Con el fin de determinar si el modelo es adecuado, puede ser necesario utilizar conceptos de inferencia estadística tales como intervalos de confianza para los parámetros así como pruebas de bondad de ajuste (Motulsky 1987).

2.8 Correlación de Pearson

Las correlaciones de Pearson son correlaciones producto-momento que no tienen en cuenta el carácter ordinal de los datos, y, por tanto, la matriz de correlaciones puede ser una matriz distorsionada (Rupp 2003, Koh y Zumbo 2003).

El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1, 1]$ su interpretación es:

- Si $r = 1$, existe correlación positiva perfecta
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva
- Si $r = 0$, no existe relación lineal
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta

2.9 Valores predichos

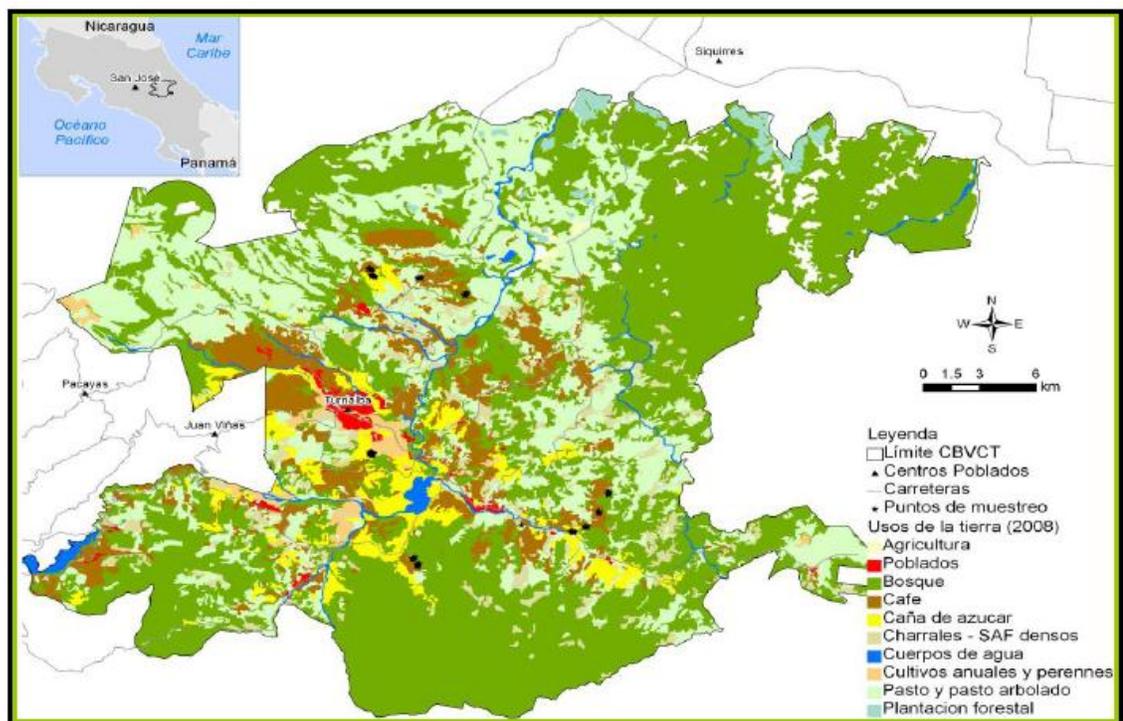
Los valores predichos son los valores de la variable dependiente que se obtienen usando el modelo ajustado. El modelo ajustado se construye con las estimaciones de los parámetros (Di Rienzo et ál. 2011).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

Los datos analizados fueron obtenidos del estudio de Olivas (2010) sobre el “Efecto del uso del suelo adyacente al cafetal sobre la dispersión y dinámica poblacional de la broca *Hypothenemus hampei* Ferrari y la abundancia de enemigos naturales en el Cantón de Turrialba, Costa Rica”, desarrollado en el Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca (CBVCT), en las coordenadas geográficas 9° 52' latitud Norte y 83° 38' longitud Oeste (Figura 4).

En la zona de estudio, la altitud varía desde los 600 hasta los 1400 m. La precipitación anual se distribuye en los doce meses del año y fluctúa entre 1000 y 3000 mm, con un promedio de 2600 mm. La humedad relativa tiene un promedio de 85% y la temperatura ambiente varía entre 24 °C y 29 °C (Olivas 2010).



Fuente: Olivas 2010

Figura 4. Mapa de usos de suelo del Corredor biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica 2009.

3.2 Metodología de campo

Se analizaron los datos obtenidos por Olivas (2010), en donde se establecieron trampas BROCAP® Dufour (2007) y atrayentes, con el fin de conocer la cantidad de broca que emigra del café hacia usos de suelo adyacentes y la forma en que esta se dispersa. Las fincas seleccionadas en el estudio fueron CATIE, Máquina Vieja, El Romeral, More, El Volcán y Colima (Figura 5). Estas fincas presentan diferentes usos de suelo a los alrededores de los cafetales. Los usos adyacentes evaluados fueron bosque, pasto y cañas, esto por ser los más predominantes (Olivas 2010).

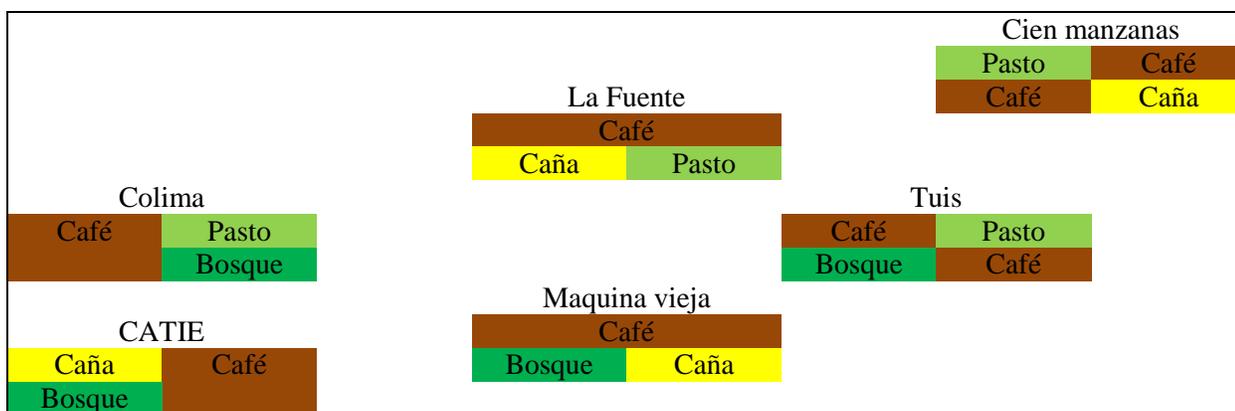


Figura 5. Representación de las parcelas de café seleccionadas y los usos de suelo colindante, situado en el cantón de Turrialba, Costa Rica Olivas 2009.

El establecimiento de las trampas se determinó de acuerdo a la cosecha de café (Barrera 2005), ya que la mayor dispersión de la broca se muestra en periodos de pos cosecha (Dufour 2007). Teniendo en cuenta que en algunas fincas la cosecha finalizó en diciembre, las trampas se situaron en los meses enero y febrero de 2009 y la toma de datos en los meses de febrero y marzo del mismo año (Olivas 2010).

Se ubicaron tres transectos de 180 m de largo en cada una de las combinaciones de usos (café-caña, café-bosque y café pasto). Entre cada transecto la distancia varió entre 30 y 40 m. Estas distancias entre transectos garantizan la independencia entre las observaciones, ya que los difusores o atrayentes tienen un radio de acción de 12,5 m (Dufour y Frérot 2008).

Se instalaron 18 trampas por transecto, cada una a 10 m de distancia a una altura aproximada de 1,2 m entre el difusor y el suelo, ubicando 4 trampas en las áreas de café, hasta

30 m del cafetal. Las 14 restantes, se dispusieron a lo largo del transecto en los usos adyacentes (caña, pasto o bosque). Se situaron 54 trampas por combinación y 108 por finca, para un total de 648 en las 6 fincas (Olivas 2010). Cada mes se hicieron 3 colecciones, con un total de 12 a 15 muestreos por finca durante 6 meses. Los conteos de la broca se hicieron de forma manual, teniendo en cuenta que ninguna trampa capturo más de 1000 individuos (Olivas 2010).

Las trampas ubicadas dentro del cafetal según los datos de la tesis de Olivas (2010) se encuentran a distancias de (-30 m, -20 m, -10 m y 0 m). La que está a menos -30 m captura más broca, básicamente porque solo compite con una trampa (la que está a -20 m). Las trampas que están a -20 m y -10 m capturan cantidades intermedias porque están compitiendo con 2 trampas. La trampa que está en 0, captura menos, compite con la trampa que está en -10 m por un lado y porque solo tiene la mitad del área con café (está en el borde del cafetal).

Las características de las fincas y parcelas seleccionadas son las siguientes según (Olivas 2010):

a) La finca Maquina Vieja se encuentra ubicada a 770 msnm en el poblado de Atirro. Se seleccionaron dos lotes de café con uso de bosque en su borde y caña para el otro. El lote de café adyacente a bosque tiene un área de 6,6 ha con una densidad de 5.000 plantas/ha (2×1 m). La variedad de café es Caturra (*Coffea arabica*). La plantación tiene 8 años. Las plantas de café ubicadas sobre el borde (adyacente al bosque) tienen menor producción de frutos (Olivas 2010).

El lote de café adyacente a caña, tiene un área de 3,5 ha, con la misma densidad y distancia de plantación que el lote anterior pero difieren en edad. Predomina la variedad Caturra (*C. arabica*), aunque es común encontrar plantas dispersas de la variedad Catuaí amarillo (*C. arabica*). Las plantas presentan buen desarrollo desde el borde (adyacente a caña) hasta el centro de la parcela (Olivas 2010).

Los lotes de café están en asocio con musáceas plátano (*Musa paradisiaca*), con una densidad de 1500 plantas/ha, sembrado a $3,3 \times 2$ m con una planta por sitio. En el lote de café-

bosque la sombra varió entre el 10 y 13%, en cambio en lote café-caña su distribución estuvo entre el 9 y 12% (Olivas 2010).

El porcentaje de infestación de broca lo identifican en el beneficio, entre los meses de junio y julio. El método de control de la plaga es el químico con Endosulfan (Thiodan) realizado a finales de marzo. No se realiza el control manual para el manejo de las poblaciones de broca (repela, graniteo y pepena), tampoco se utiliza el trapeo (Olivas 2010). El paisaje está dominado por café asociado con plátano (*M. paradisiaca*); aunque se encuentran parches de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y fragmentos de bosque secundarios (Olivas 2010).

b) La finca del CATIE se encuentra ubicada a 630 msnm en la localidad de Turrialba. Se seleccionaron dos lotes de café que tenían adyacente los usos bosque y caña. El lote de café vecino al bosque tiene un área de 1,54 ha. En tanto el lote de café vecino al uso caña tiene un área de 2,42 ha. Los lotes tienen una población de 5.000 plantas/ha (2×1 m), la variedad cultivada es Caturra (*C. arabica*) y tiene una edad de plantación de 25 años. En los lotes, las plantas de café presentan buen desarrollo (Olivas 2010).

La especie de sombra que predomina es el poró (*Erythrina poeppigiana*) sembrado a 6×6 m; aunque también se encuentran algunos árboles dispersos de macadamia (*Macadamia ternifolia*). El porcentaje de sombra del lote de café adyacente a bosque es bastante homogéneo (entre 15 y 18%). El lote de café adyacente a caña tiene sombra más heterogénea, y su porcentaje de sombra varía entre 4 - 16% (Olivas 2010).

Las evaluaciones del nivel de infestación se realizan únicamente en el beneficio. Los porcentajes de infestación de *H. hampei* han sido variables. Para el año 2007 se reportó un 8,5% de infestación y para el año 2008 bajo a 4,5%. Para su manejo, se hicieron aplicaciones químicas de Endosulfan (Thiodan) en el mes de marzo del 2010. A partir del mes de mayo 2009, se establecieron 20 trampas fiesta por ha. No se realizan prácticas manuales (pepena, repela, graniteo) para reducir las poblaciones de broca, tampoco aplican *B. bassiana*, ni liberación de parasitoides (Olivas 2010).

La floración principal se presentó en el mes de enero del 2009 y se contabilizaron diez floraciones secundarias entre diciembre 2008 y mayo 2009. La cosecha del ciclo 2008-2009, inició en junio del 2008 y finalizó en la última semana de diciembre del mismo año (Olivas 2010).

El paisaje está dominado por sistemas agroforestales de café, cultivos de caña, algunas áreas de pasto y un fragmento de bosque secundario. La caña tiene un área de 2,10 ha, fue cortada y quemada el 17 de marzo de 2010. El área de bosque secundario es de 27,9 ha. El dosel se encuentra dominado por especies que van desde los 2 hasta los 20 m de altura; los claros son variables, desde 11,1 - 24.3% de apertura (Olivas 2010).

c) La finca Colima ubicada en la localidad de Santa Teresita, tiene un área de 104 ha de café, a una altitud de 880 msnm. En esta finca se seleccionaron dos lotes de café colindante con bosque y pasto. El lote de café vecino a bosque tiene un área de 11,5 ha, mientras que el lote adyacente al uso pasto tiene 8,2 ha. La edad de las plantaciones era de 20 y 25 años, respectivamente. Ambos cuentan con una densidad de 4.000 plantas/ha ($2 \times 1,25$ m), la variedad predominante es Caturra (*C. arabica*) (Olivas 2010).

La especie utilizada para sombra en el lote de café-bosque es el poró (*E. poeppigiana*) a una densidad de 25 árboles/ha, y el porcentaje de sombra varía entre 27 y 35%. La especie de sombra utilizada en el lote de café-pasto es la guayaba (*Psidium guajava*); con porcentaje de sombra entre 7 y 11% (Olivas 2010).

Para el año 2007 en ambos lotes se reportó 7,9% de infestación y 4,2% para el año 2008, está información fue obtenida en las evaluaciones en el beneficio. Para el manejo, aplicaron Endosulfan (Thiodan), entre los meses de mayo y junio. No aplican trampeo, aunque si realizan el graniteo sanitario. En el año 2007 se realizaron aplicaciones de *B. bassiana*, en ambos lotes. No reportan aplicaciones de parasitoides (Olivas 2010).

La floración principal se presenta en marzo, pero también hubo cuatro floraciones secundarias. La cosecha del ciclo 2008-2009, se inició en julio del 2008 y finalizó el 19 de enero del 2009 (Olivas 2010).

En ésta localidad la matriz del paisaje está dominada por sistemas agroforestales de café, fragmentos aislados de bosque, cultivo de caña y pequeñas áreas de pasto. El área de bosque es de 10 ha. No se encontraron plantas de café en el bosque (Olivas 2010).

El lote de pasto tiene un área de 1 ha, en su parte este colindan pequeñas áreas de café y pasto, y en la parte oeste y norte prevalecen áreas de pasto. En el área de pasto existen árboles dispersos de guayaba (*Psidium guajava*) (Olivas 2010).

d) La finca El volcán se encuentra ubicada a 1057 msnm en la localidad de La Fuente jurisdicción de Santa Teresita y tiene 50 ha de café. Se seleccionaron dos lotes de café colindante a los usos caña y pasto. El lote de café colindante a pasto tiene un área de 2 ha; la edad de la plantación de café es de 7 años y la variedad predominante es Catuaí (*C. arabica*).

El lote adyacente a caña tiene 15 años de siembra y un área de 4 ha. En este lote hay plantas de la variedad Caturra y Costa Rica 95 (*C. arabica*). Ambos lotes tienen una población de 4.900 plantas por ha (2×1 m). Las plantas de café tienen buen desarrollo y producción. La sombra es proporcionada por el poró (*E. poeppigiana*). Los porcentajes de sombra en ambos lotes de café varía entre el 8 y 12% (Olivas 2010).

La floración principal se presentó en el mes de mayo y se contabilizaron cuatro floraciones secundarias. La cosecha del período 2008-2009 inició en el mes de agosto del 2008 y finalizó en el mes de marzo del 2009 (Olivas 2010).

La matriz del paisaje es dominada por actividades agropecuarias de caña, café y pasto. El área de pasto seleccionada es de 1 ha, a 150 m en dirección sur, este y oeste están ubicadas otras áreas de café. El área de caña es de 10 ha aproximadamente. Esta fue cortada y quemada el 20 de abril (Olivas 2010).

e) La finca More Costa Rica está ubicada a 1.161 msnm en la localidad de Cien Manzanas y tiene 105,39 ha de café. Se seleccionaron dos lotes de café que colindaban con los usos caña y pasto. El lote de café colindante con pasto tiene un área de 10,5 ha y el lote adyacente a caña tiene un área de 15,4 ha. Ambos lotes tienen una densidad poblacional de 4900 plantas de café por ha (2×1 m). La variedad que prevalece es Caturra (*C. arabica*) y la edad de las plantaciones es de 16 años (Olivas 2010).

La sombra se compone de dos especies, el poró (*E. poeppigiana*) y el laurel (*Cordia alliodora*), siendo más predominante poró. Existen 42 árboles por ha. En la mezcla de las dos especies, la distribución de la sombra es homogénea (entre 23 y 26%). En ambos lotes las plantas de café presentan buen desarrollo (Olivas 2010).

No existen registros de infestación de broca. El manejo se basa en aplicaciones químicas de Endosulfan (Thiodan). No hay manejo de las poblaciones, ni aplican trampeo. Durante el año 2008 se realizaron aplicaciones de *B. bassiana* en los dos lotes. No se reportan aplicaciones de parasitoides (Olivas 2010).

La floración principal sucedió en el mes de marzo y se presentaron cinco floraciones secundarias. La cosecha del período 2008-2009 inició en el mes de julio del 2008 y finalizó en la segunda semana de febrero (Olivas 2010).

El paisaje es dominado por actividades agrícolas de caña, café, pasto y algunos parches de bosque ripario. El área de pasto seleccionada es de 2 ha. El área de caña es de 4 ha aproximadamente (Olivas 2010).

f) La finca El Romeral está ubicada a una altitud de 924 msnm en la localidad de Tuis. Se seleccionaron dos lotes de café adyacente a los usos bosque y pasto. El lote de café colindante con bosque tiene un área de 12 ha con una densidad de 3.600 plantas/ha ($2,2 \times 1,25$ m). La plantación tiene más de 35 años. El lote adyacente a pasto tiene un área de 7 ha con una densidad de café de 3.900 ($2 \times 1,25$ m), y una edad de 24 años. En ambos lotes se cultiva la variedad Caturra (*C. arabica*). La especie que utilizan para sombra es el poró (*E. poeppigiana*), está plantado a una distancia de 8×8 m. El porcentaje de sombra tanto en el lote café-bosque como el lote café-pasto es bastante homogéneo, varía entre 11-12% y 8-9% respectivamente (Olivas 2010).

En ambos lotes el nivel de infestación en el año 2007 fue de 8% y en el año 2008 se redujo a 5%. Su manejo está basado en aplicación química de Endosulfan (Thiodan); la cual se realizó en el mes julio. No aplican prácticas manuales (pepena, repela y graniteo), ni trampeo. Durante el ciclo 2007-2008 realizaron aplicación de *B. bassiana* en toda la finca. No reportan la liberación de parasitoides (Olivas 2010).

La floración principal se presentó en mayo y se contabilizaron seis floraciones secundarias. La cosecha del período 2008-2009 inició en el mes de julio del 2008 y finalizó en la segunda semana de enero (Olivas 2010).

El paisaje se encuentra dominado por actividades agropecuarias de caña, café, pasto y bosque. El área del uso de suelo pasto seleccionado es de 2,5 ha, este posee algunos árboles dispersos de guayaba. El área del uso de suelo bosque es de 2 ha, el cual se encuentra en un proceso acelerado de intervención con predominancia de especies heliófitas. El dosel está formado por especies con alturas de 2 - 20 m (Olivas 2010).

3.3 Análisis estadístico

Con el fin de definir el mecanismo de dispersión de la broca a lo largo del paisaje, el total de la captura de broca que se obtuvo del borde del cafetal hacia los usos de suelo adyacentes en el periodo de estudio de Olivas (2010) fue usado como variable respuesta. Los conteos fueron relacionados con las distancias mediante gráficos de dispersión.

Estas gráficas permitieron encontrar la función estadística aproximada que se ajusta mejor a los datos de la dispersión de la broca bajo las condiciones del estudio. Se usaron diferentes aproximaciones para encontrar la distancia de la dispersión de la broca dentro de los diferentes tipos de uso: 1) modelos no-lineales, 2) modelos lineales generalizados mixtos, 3) modelos lineales generales mixtos, 4) modelos de regresión por pasos (*broken stick*, vara quebrada).

Para evaluar el movimiento de la broca del cafetal a los distintos usos de suelo, se ajustaron cinco modelos no lineales que según Kot et ál. (1996) son los más recomendados para ajustar curvas de dispersión y sirven para hacer pronósticos sobre el movimiento de los fenómenos, en este caso, la dispersión de la broca. Estos modelos se ajustaron para cada uso de suelo y en cada finca (Cuadro 4).

Para la selección del mejor modelo se realizaron regresiones no lineales teniendo en cuenta el número total de brocas capturadas en función de las distancias a las que se encuentran fuera del café y dentro de los diferentes usos de suelo. Se usaron los criterios de información de Akaike (AIC) y de información Bayesiana (BIC), que sirven para seleccionar

el modelo más parsimonioso (la preferencia por la explicación más simple entre varias alternativas).

Posteriormente, se analizaron las estimaciones de los parámetros de los modelos seleccionados, su error estándar y sus límites de confianza del (95%). Con esto se determinó el mejor modelo de ajuste que fue usado con el fin de encontrar las similitudes entre cada uso de suelo.

Para los diferentes usos de suelo, teniendo en cuenta los efectos de finca, se calcularon las distancias de dispersión de la broca. Para esto, luego de seleccionar el modelo que mejor ajustó, se igualó el modelo a cero (indicando que ya la broca no se dispersa) antes de despejar la distancia.

Cuadro 4. Modelos no lineales utilizados en la estimación de la relación foco de dispersión y cada clase de distancia en la que fueron colocadas las trampas

Modelos	Función	Familia
1	$e^{(a-bx^2)}$	Exponencial
2	$a - b \ln x$	Logarítmico
3	$a - b \ln x + \frac{c}{x}$	Logarítmico
4	$e^{(a-b\sqrt{x})}$	Exponencial
5	$e^{(a-bx)}$	Exponencial

Otra aproximación considerada para encontrar la distancia a la que la broca no se dispersa en cada uso de suelo consistió en el uso de modelos lineales generales y mixtos (Cuadro 5). Estos permitieron modelar la dispersión de broca que se encuentra en el borde del cafetal hacia los diferentes usos de suelo en función a las distancias que se encuentran dentro de las parcelas en estudio, cuyos efectos pueden considerarse tanto fijos como aleatorios.

Al analizar los datos, primero se ajustaron modelos con distintas estructuras de covarianza, combinando estructuras de correlación residual (diferentes estructuras de correlación de los errores), heteroscedasticidad residual (permite seleccionar distintos modelos para la función de varianza) y efectos aleatorios. Teniendo en cuenta los criterios de información de Akaike (AIC) y el criterio de información Bayesiana (BIC), se eligió el modelo que mejor describió los datos, y con ese modelo se hicieron inferencias acerca de las medias.

Para encontrar el mejor modelo primero se comenzó por uno sencillo con pocos parámetros a estimar, y después se fueron adicionando parámetros hasta llegar a un modelo que contemplara las estructuras de los datos sin que deje de ser parsimonioso. En todos los casos se usó el mismo modelo de medias, ya que los factores de interés no cambiaron.

Para el primer modelo solo se declaran como efectos fijos a tipo de uso, distancia y la interacción tipo de uso \times distancia. El segundo modelo tiene la misma estructura que el primero, sin embargo se adiciona a sujeto como efecto aleatorio.

El tercer modelo tiene la misma estructura del primer modelo, en este caso no se declara sujeto como efecto aleatorio, pero se declara como función de correlación de los errores a corExp (Correlación espacial exponencial) con coordenada X a distancia y como criterio de agrupamiento a sujeto. En el cuarto modelo se declara nuevamente a sujeto como efecto aleatorio, con función de correlación corExp, con coordenada X a distancia y como criterio de agrupamiento a sujeto. El quinto modelo tiene la misma estructura del cuarto modelo, sin embargo la función de correlación de los errores es cambiada por corGaus (correlación espacial Gaussiana).

El sexto modelo tiene la misma estructura que el cuarto modelo, sin embargo la función de correlación de los errores es cambiada por corLin (correlación espacial Lineal). El séptimo modelo tiene la misma estructura del cuarto modelo, sin embargo la función de correlación de los errores es cambiada por corSpher (correlación espacial esférica).

En el octavo modelo no se declara efecto aleatorio ni función de correlación de los errores, sin embargo se declara varianzas distintas (varIdent) usando como criterio de agrupamiento a una variable que representa las varianzas de los datos en dos grupos en función de la distancia (0 representa la distancia cero y 1 representa al resto de las distancias). Esta variable sirve para declarar el hecho de que las varianzas son mucho mayores en el borde del cafetal (cerca de la distancia cero), ya que los conteos son mayores, y caen drásticamente en el resto de las distancias. El agregado de este tipo de variables indicadoras se usa para contemplar heterogeneidad de varianzas usando un modelo más parsimonioso.

El modelo nueve tiene la misma estructura que el octavo modelo, sin embargo las varianzas heterogéneas (varIdent) cambian según las distancias. El modelo diez tiene la misma estructura que el octavo modelo, sin embargo la varianzas heterogéneas (varIdent) es cambiada por varExp (función de varianza exponencial).

El modelo once tiene la misma estructura del modelo cuatro, sin embargo, se declara las varianzas heterogéneas (varIdent) según las distancia. El modelo doce tiene la misma estructura del modelo once, sin embargo se reemplaza la varianza heterogénea (varIdent) usando como criterio de agrupamiento a una variable que representa las varianzas de los datos en tres grupos en función de la distancia (0 representa la distancia cero, 10 representa a la distancia 10 y 20 al resto de las distancias).

El modelo trece tiene la misma estructura que el modelo once, sin embargo se reemplaza la varianza heterogénea (varIdent) usando como criterio de agrupamiento a Tipo de uso×distancia. El modelo catorce tiene la misma estructura que el modelo once, sin embargo se reemplaza la varianza heterogénea (varIdent) usando como criterio de agrupamiento a var3×tipo de uso. El modelo quince tiene la misma estructura que el modelo catorce, sin embargo no se declara efectos aleatorios. El modelo dieciséis tiene la misma estructura del modelo catorce, sin embargo se declara la Covariable P_café dentro de los efectos fijos.

Posteriormente, se realizaron nuevos análisis estadísticos con modelos lineales generales y mixtos, transformando la variable respuesta conteo a logaritmo natural. Esto permitió modelar la cantidad de broca que se encuentra en el borde del cafetal hacia los diferentes usos de suelo en función a las distancias que se encuentran dentro de las parcelas en estudio, cuyos efectos pueden considerarse tanto fijos como aleatorios. Los modelos tienen la misma estructura que los modelos mencionados anteriormente (Figura 6), sin embargo cambia la variable respuesta conteo por una transformación de ésta a logaritmo natural.

Por otra parte, para poder ver la relación del tipo de cultivo y las distancias sin el sesgo dado por el efecto de finca dentro de cada localidad, se utilizaron modelos lineales generalizados mixtos (Cuadro 6); estos no solo permiten descontar el efecto de finca dentro de cada localidad sino también permiten contemplar diferentes distribuciones para el término de error. Estos modelos permiten ajustar directamente la variable número de insectos con una

distribución Poisson, asumiendo entre otras cosas, que se incrementa la varianza al aumentar la media. Para este modelo se utilizó la función de enlace Log.

Cuadro 5. Modelos Generalizados Lineales y Mixtos para comparar la estimación de la relación foco de dispersión y cada clase de distancia en la que fueron colocadas las trampas

Modelo	Cov	E.A	Corr	coor X	Crit.Agrup	Heter	Crit.Agrup
1	-	-	-	-	-	-	-
2	-	Sujeto	-	-	-	-	-
3	-	-	corExp	distancia	sujeto	-	-
4	-	Sujeto	corExp	distancia	sujeto	-	-
5	-	Sujeto	corGaus	distancia	sujeto	-	-
6	-	Sujeto	corLin	distancia	sujeto	-	-
7	-	Sujeto	corSpher	distancia	sujeto	-	-
8	-	-	-	-	-	VarIdent	Var
9	-	-	-	-	-	VarIdent	distancia
10	-	-	-	-	-	VarExp	-
11	-	Sujeto	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	distancia
12	-	Sujeto	corExp	distancia	sujeto	varIdent	Var3
13	-	Sujeto	corExp	distancia	sujeto	varIdent	Tipo de uso*distancia
14	-	Sujeto	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	var3*tipo de uso
15	-	-	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	var3*tipo de uso
16	P_cafe	Sujeto	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	var3*tipo de uso

Estos modelos fueron analizados con diferentes estructuras, el primero tiene como variable independiente el conteo, como criterios de clasificación al tipo de uso y la distancia, declarando en los efectos fijos al tipo de uso, la distancia y la interacción tipo de uso×distancia. El segundo modelo presenta la misma estructura que el primero, pero se adiciona dentro de los criterios de clasificación y como efecto fijo la covariable cantidad de broca que se encuentra dentro del café en las parcelas adyacentes a cada tipo de uso considerado (P_café).

El tercer modelo tiene la misma estructura del segundo sin declarar a la covariable P_café como efecto fijo, pero se declara como efecto aleatorio a los transectos dentro de cada finca, y uso (comunmente llamado factor “sujeto”, que indica el conjunto de unidades muestrales correlacionadas). Esta última variable fue declarada así, para tener en cuenta la estructura correlacionada asociada a las distancias dentro de un transecto.

El cuarto modelo, tiene la misma estructura que el primer modelo, agregándole como efecto fijo a P_café y como efecto aleatorio a sujeto. Estos modelos también fueron analizados con los criterios de información AIC y BIC.

Cuadro 6. Modelos Generales Mixtos para comparar la estimación de la relación foco de dispersión y la distancia en la que fueron colocadas las trampas

Modelos	Efecto fijo		Efecto aleatorio
	Factor	Covariable	
1	Tipo de uso+Distancia+Tipo de uso*Distancia	-	-
2	Tipo de uso+Distancia+Tipo de uso*Distancia	P_café	-
3	Tipo de uso+Distancia+Tipo de uso*Distancia	-	Sujeto
4	Tipo de uso+Distancia+Tipo de uso*Distancia	P_café	Sujeto

Finalmente, se realizaron análisis con modelos de regresión por pasos (*broken stick*, vara quebrada) con diferentes alternativas de expresión de las rectas (Cuadro 7). La intersección de las dos rectas muestra la distancia desde el borde de café hacia los usos de suelo a la cual la broca no se dispersa.

El modelo uno tiene como estructura la ordenada del origen (α), la pendiente antes del punto de intersección de las dos rectas (β_1), la pendiente después del punto de corte (β_2), y gamma es el punto de la intersección (γ), en este caso la distancia. El modelo dos tiene la misma estructura del primero, lo que difiere es que se sustrae (β_2) en la ecuación, ya que en este caso solo interesa la pendiente (β_1) y su intersección con la segunda recta para encontrar el punto en la cual la broca no se dispersa.

Finalmente se hicieron correlaciones de Pearson entre la variable respuesta con los predichos de los modelos que mejor ajustaron los datos. Esto con el fin de encontrar el mejor modelo entre los propuestos.

Cuadro 7. Modelos no-lineales a dos tramos para comparar la estimación de la relación foco de dispersión y cada clase de distancia en la que fueron colocadas las trampas

Modelos	
1	$\alpha + (\beta_1 * Dist) * (Dist < \gamma) + (\beta_1 * \gamma + \beta_2 * (Dist - \gamma)) * (Dist \geq \gamma)$
2	$\alpha + (\beta_1 * Dist) * (Dist < \gamma) + (\beta_1 * \gamma * (Dist - \gamma)) * (Dist \geq \gamma)$ (se elimina β_2)

Dados los tipos de distribución espacial y las formas presentadas por las funciones empíricas conocidas se trabajaron con las distribuciones: exponencial y logarítmica. Se aplicaron técnicas de estadística clásica: a) análisis de regresión no lineal b) ajustes de distribuciones de los modelos propuestos c) comparación de las distribuciones de frecuencias empíricas con las distribuciones teórica propuestas. Para lo anterior se utilizó el software estadístico InfoStat versión 2011 (Di Rienzo et ál. 2011).

4 RESULTADOS

4.1 Resultados generales basados en las medias del total de captura para los diferentes usos de suelo adyacentes al cafetal

Las medias del total de brocas capturadas en los usos de suelo adyacentes al cafetal, muestran que para la localidad de CATIE y Máquina vieja hay menor abundancia de broca en el uso de suelo caña que en bosque. Para la localidad de Cien manzanas hay mayor abundancia de broca en el uso de suelo pasto que en caña, por el contrario en la localidad La Fuente existe mayor abundancia de broca en el uso de suelo caña que en pasto. En la localidad de Colima y Tuis se encontró mayor abundancia de broca en el uso de suelo adyacente pasto que en bosque (Cuadro 8).

Cuadro 8. Promedios de dispersión para cada uno de los usos de suelo adyacentes el café

Localidad	Tipo de uso	Media	CV	Mín	Máx	Mediana
CATIE	Caña	5,45	94,06	0	21	4,50
CATIE	MBosque	6,15	102,87	0	21	4,00
Cien_Manzanas	Caña	2,98	75,86	0	11	3,00
Cien_Manzanas	Pasto	5,69	80,53	0	23	5,00
Colima	MBosque	2,86	609,54	0	113	0,00
Colima	Pasto	3,64	180,75	0	35	2,00
La_Fuente	Caña	1,98	104,54	0	7	1,00
La_Fuente	Pasto	0,76	135,38	0	4	0,00
Máquina Vieja	Caña	10,02	192,94	2	100	6,00
Máquina Vieja	MBosque	0,93	160,25	0	7	0,50
Tuis	MBosque	1,71	225,85	0	22	0,00
Tuis	Pasto	5,29	133,21	0	40	3,00

4.1.1 Análisis del uso de suelo Bosque por localidad

El uso de suelo “bosque” estaba presente en las localidades CATIE, Colima, Máquina Vieja y Tuis. Para este uso de suelo en la localidad Colima, los modelos uno, cuatro y cinco, provenientes de la familia exponencial, presentaron un buen ajuste, debido a los bajos valores de los criterios AIC y BIC y a los p-valores significativos para sus parámetros. En los

modelos uno, dos, tres y cinco de las restantes localidades, los p-valores no fueron significativos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Medidas de la calidad del ajuste de los diferentes modelos no lineales evaluados para la dispersión de la broca en suelos con uso “Bosque” adyacentes al cafetal en distintas localidades del Cantón de Turrialba, Costa Rica

Uso de suelo Bosque					
Modelo	Localidad	CME	AIC	BIC	Valor p
1	CATIE	20,13	95,50	99,12	0,0923
2	CATIE	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	CATIE	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	CATIE	14,55	80,18	83,75	0,0209
5	CATIE	20,12	95,49	99,10	0,0830
1	Colima	2,28	-2,46	1,16	<0,0001
2	Colima	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	Colima	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	Colima	2,42	0,20	3,81	<0,0001
5	Colima	2,28	-2,46	1,16	<0,0001
1	Máquina vieja	58,15	143,24	146,85	>0,9999
2	Máquina vieja	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	Máquina vieja	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	Máquina vieja	16,00	85,17	88,78	0,4602
5	Máquina vieja	58,15	143,24	146,85	>0,9999
1	Tuis	40,02	126,43	130,04	>0,9999
2	Tuis	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	Tuis	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	Tuis	4,51	28,23	31,84	0,0032
5	Tuis	40,02	126,43	130,04	>0,9999

CME = Cuadrado Medio del Error, AIC = Criterio de Información de Akaike, BIC = Criterio de Información Bayesiana.

Se seleccionó el modelo cuatro como el mejor para Colima porque presentó los valores de AIC y BIC más bajos. Para la localidad de Máquina vieja no hay un buen ajuste para ninguno de los modelos ya que su p-valor es igual a 0,4602. Sin embargo, a pesar de no presentar significancia para sus parámetros, los criterios AIC y BIC indican que este modelo

es mejor que los demás. El Modelo cuatro resultó así ser el mejor para este tipo de uso en todas las localidades.

Al evaluar la distancia que alcanza a recorrer la broca fuera del cafetal y dentro del bosque se encontró que en la localidad de Colima alcanzó hasta 10,76 m mientras que en el sitio CATIE presenta una distancia de 6,76 m y en Tuis alcanza los 5,16 m. En el caso de la finca CATIE se eliminó un dato que se encontraba en la distancia de 80 m, ya que posiblemente había plantas de café que podrían servir como hospederos dentro del bosque y por esto se obtuvieron capturas de broca a esta distancia. Para la localidad de Máquina vieja no se muestra el gráfico de la curva ya que esta no presentó un buen ajuste debido a que el p-valor del modelo no fue significativo.

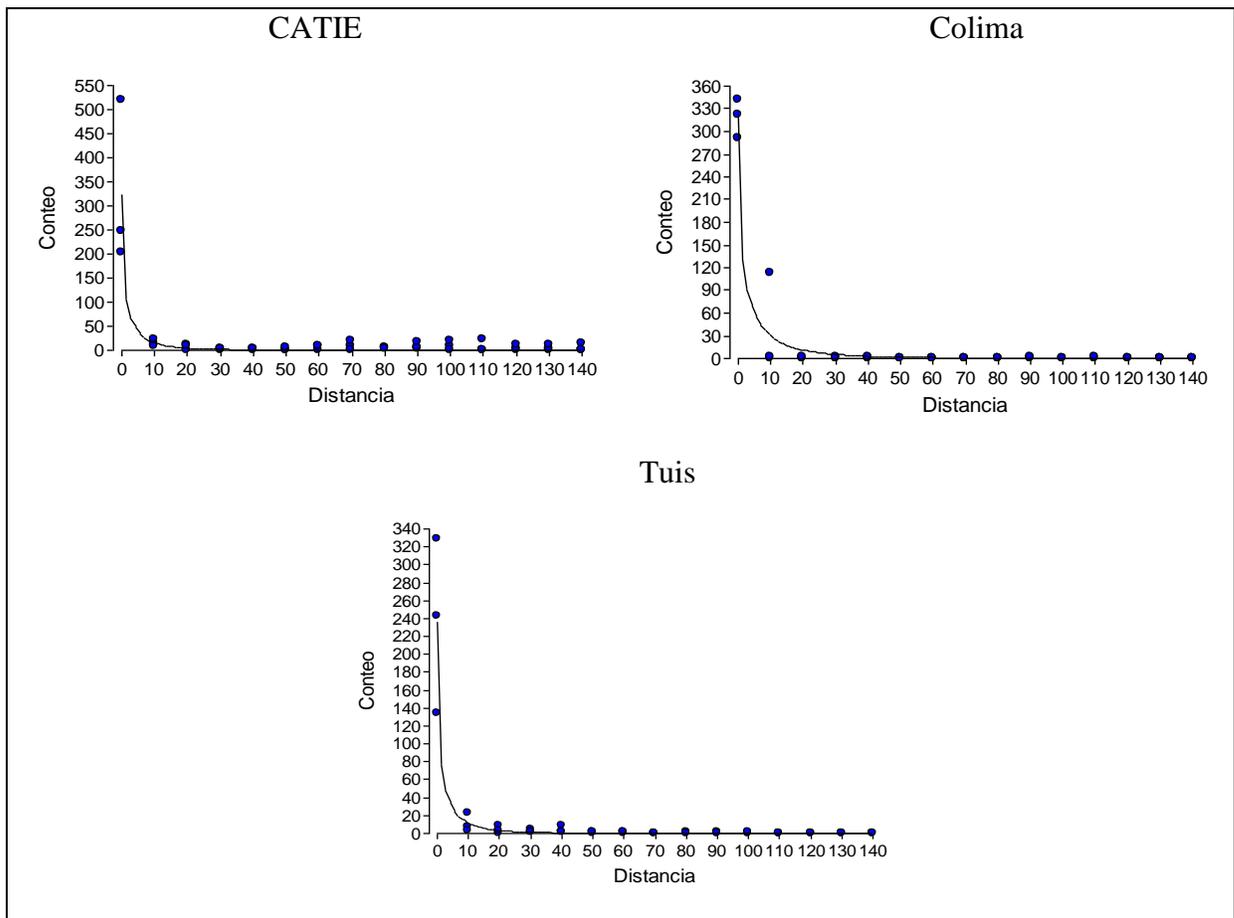


Figura 6. Diagrama de dispersión de conteos totales por trampa vs. distancias con el correspondiente ajuste obtenido del mejor modelo para el tipo de uso Bosque, en las localidades CATIE, Colima y Tuis.

4.1.2 Análisis del uso de suelo Caña por localidad

El uso de suelo “Caña” estuvo presente en CATIE y en las localidades Colima, La Fuente y Máquina vieja. Para este uso de suelo en CATIE los modelos 1, 4 y 5, provenientes de la familia exponencial presentaron un buen ajuste debido a los bajos valores de los criterios AIC y BIC y a su p-valor significativo (Cuadro 10).

Para la localidad Colima se presentó también un buen ajuste en los modelos 4 y 5. Para las localidades de La Fuente y Máquina vieja no hay un buen ajuste para ninguno de los modelos, sin embargo los valores de probabilidad de sus modelos número cuatro fueron cercanos a 0,05 ($p=0,0581$ y $p=0,0741$ respectivamente).

Aunque los modelos no presentaron significancia, se seleccionó el modelo cuatro como el mejor, ya que presentó los valores más bajos de los criterios AIC y BIC. El Modelo cuatro resultó ser el mejor para este tipo de uso en todas las localidades.

Cuadro 10. Medidas de la calidad del ajuste de los diferentes modelos no lineales evaluados para la dispersión de la broca en suelos con uso “Caña” adyacentes al cafetal en distintas localidades del Cantón de Turrialba, Costa Rica

Uso de suelo Caña					
Modelo	Localidad	CME	AIC	BIC	Valor p
1	CATIE	2,12	-5,83	-2,22	<0,0001
2	CATIE	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	CATIE	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	CATIE	2,00	-8,49	-4,87	<0,0001
5	CATIE	2,10	-6,26	-2,65	<0,0001
1	Colima	0,10	-142,46	-138,85	>0,9999
2	Colima	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	Colima	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	Colima	0,06	-168,19	-164,58	<0,0001
5	Colima	0,08	-155,09	-151,47	0,0002
1	La Fuente	6,15	42,16	45,78	>0,9999
2	La Fuente	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	La Fuente	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	La Fuente	3,08	11,01	14,63	0,0581
5	La Fuente	3,08	11,07	14,69	0,1103
1	Máquina vieja	1469,39	288,57	292,19	>0,9999
2	Máquina vieja	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	Máquina vieja	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	Máquina vieja	390,98	228,99	232,61	0,0741
5	Máquina vieja	1469,39	288,57	292,19	>0,9999

CME = Cuadrado Medio del Error, AIC= Criterio de Información de Akaike, BIC = Criterio de Información Bayesiana.

Al analizar las curvas de dispersión para definir la distancia a la cual se desplaza la broca fuera del cafetal y hacia la caña, se observa que en la localidad de Cien Manzanas es posible encontrar broca a más de 31,2 m. En CATIE la broca se dispersa hasta los 8,21 m desde el borde del cafetal, en la localidad de La Fuente hasta los 0,30 cm de distancia y en Máquina vieja hasta los 16,6 m (Figura 7).

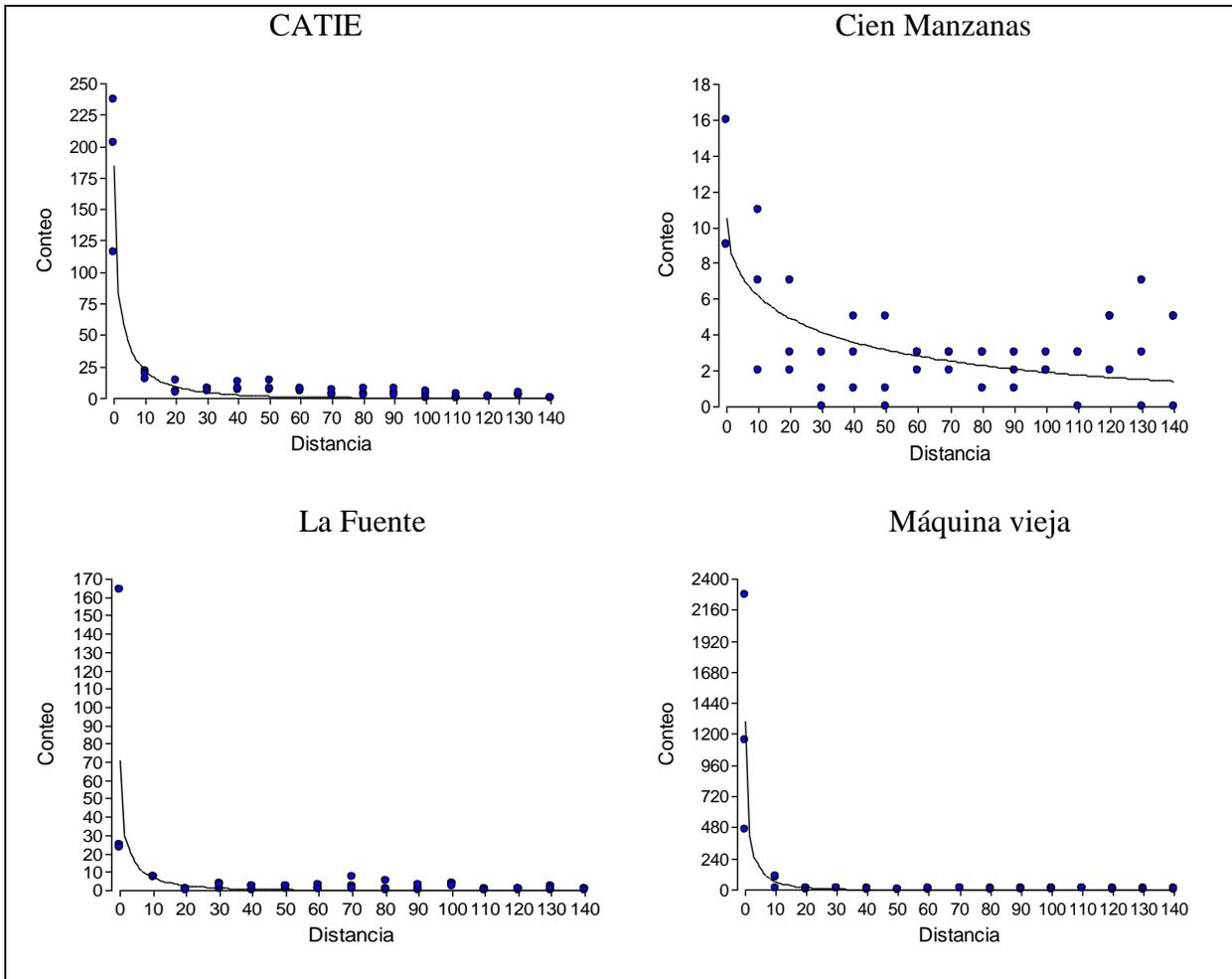


Figura 7. Diagrama de dispersión de conteos totales vs. distancias con el correspondiente ajuste obtenido del mejor modelo para el tipo de uso Caña, en las localidades CATIE, Cien Manzanas, La Fuente y Máquina vieja.

4.1.3 Análisis del uso de suelo Pasto por localidad

El uso de suelo “Pasto” estaba presente en las localidades Cien manzanas, Colima, La Fuente y Tuis. Para este uso de suelo las localidades Cien manzanas, Colima y La Fuente presentaron un buen ajuste en los modelos uno, cuatro y cinco provenientes de la familia exponencial, debido a los bajos valores de los criterios AIC y BIC con un p-valor significativo (Cuadro 11). Para la localidad de Tuis se presenta un buen ajuste sólo para el Modelo 4, los criterios AIC y BIC indican que este modelo resultó ser el mejor para este tipo de uso en todas las localidades.

Cuadro 11. Medidas de la calidad del ajuste de los diferentes modelos no lineales evaluados para la dispersión de la broca en suelos con uso “Pasto” adyacentes al cafetal en distintas localidades del Cantón de Turrialba, Costa Rica

Uso de suelo Pasto					
Modelo	Localidad	CME	AIC	BIC	Valor p
1	Cien manzanas	0,35	-86,26	-82,65	0,0002
2	Cien manzanas	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	Cien manzanas	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	Cien manzanas	0,15	-125,39	-121,77	<0,0001
5	Cien manzanas	0,26	-100,06	-96,44	<0,0001
1	Colima	1,53	-20,49	-16,88	0,0068
2	Colima	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	Colima	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	Colima	1,41	-24,19	-20,58	<0,0001
5	Colima	1,49	-21,55	-17,93	0,0008
1	La Fuente	0,02	-217,57	-213,96	0,0017
2	La Fuente	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	La Fuente	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	La Fuente	0,02	-220,16	-216,55	<0,0001
5	La Fuente	0,02	-218,32	-214,71	<0,0001
1	Tuis	59,35	144,16	147,77	>0,9999
2	Tuis	1E40	4105,06	4108,67	>0,9999
3	Tuis	1E40	4107,06	4112,48	>0,9999
4	Tuis	23,60	102,66	106,27	0,0214
5	Tuis	59,35	144,16	147,77	>0,9999

CME = Cuadrado Medio del Error, AIC= Criterio de Información de Akaike, BIC = Criterio de Información Bayesiana.

Al analizar las curvas de dispersión de la broca en relación al uso de suelo pasto, se observó que en las localidades de Cien Manzanas, la máxima dispersión se encuentra hasta los 19,75 m, en La Fuente es posible encontrar broca hasta a los 4,73 m. En el caso de la localidad de Colima se estima presencia de brocas hasta los 4,07 m de distancia, mientras que en la localidad de Tuis se presenta dispersión hasta los 9,08 m (Figura 8).

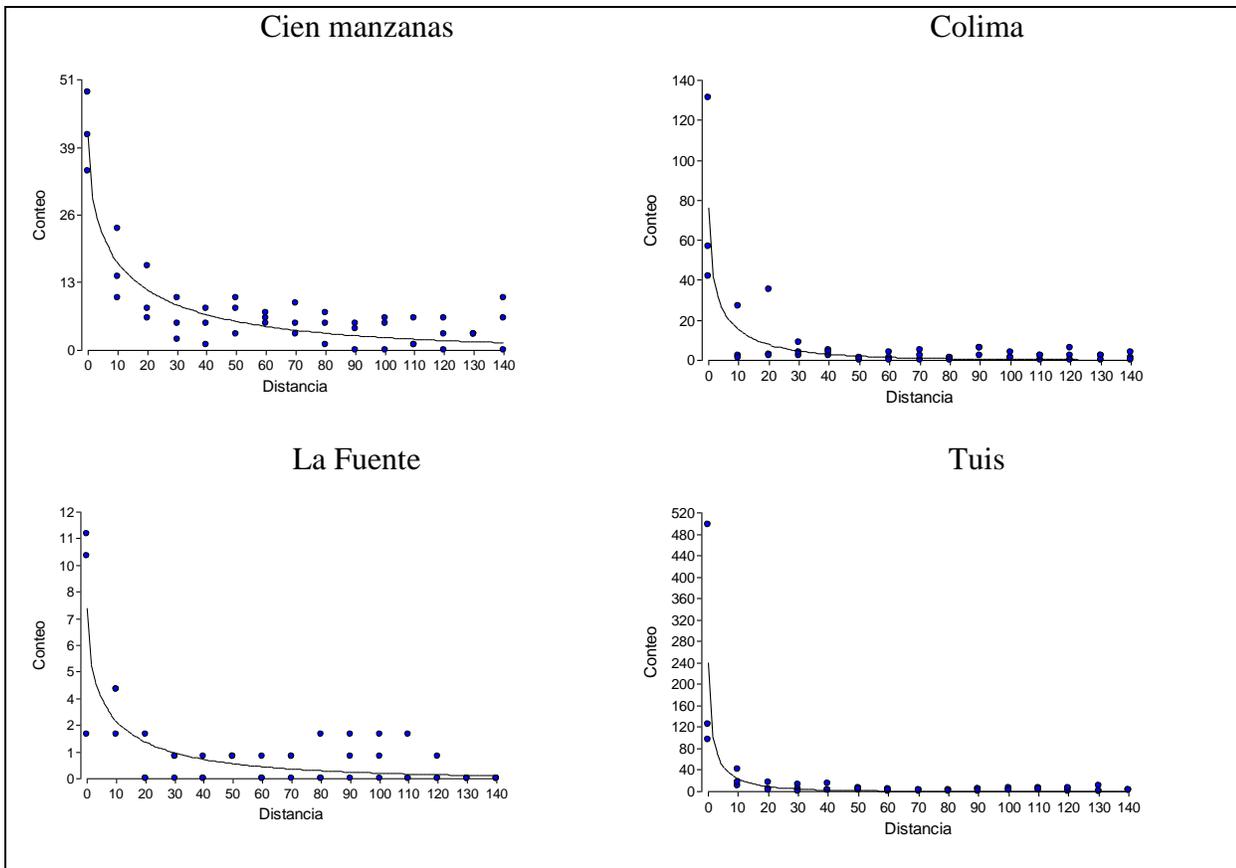


Figura 8. Diagrama de dispersión de conteos vs. distancias con el correspondiente ajuste obtenido del mejor modelo para el tipo de uso Pasto, en las localidades Cien manzanas Colima, La Fuente y Tuis.

4.1.4 Comparación de usos de suelo para las diferentes localidades

A partir del mejor modelo seleccionado para cada uso del suelo dentro de las localidades; teniendo en cuenta las estimaciones de los parámetros α y β y sus intervalos de confianza (Cuadro 12): Se observó que para el uso de suelo bosque no hay diferencias entre localidad, mientras que para el uso de suelo caña y pasto si hay diferencias.

Cuadro 12. Parámetros estimados para el modelo exponencial seleccionado, su error estandar y límites de confianza (95%)

Uso de suelo Bosque						
Localidad	Parámetros	Estimación	EE	LI	LS	Valor p
CATIE	α	3,47	0,07	3,31	3,63	<0,0001
Colima	α	3,46	0,03	3,4	3,52	<0,0001
Máquina vieja	α	3,24	0,09	3,06	3,42	<0,0001
Tuis	α	3,16	0,05	3,06	3,26	<0,0001
CATIE	β	0,95	0,40	0,06	1,82	0,0417
Colima	β	0,75	0,08	0,59	0,91	<0,0001
Máquina vieja	β	1,31	1,76	-2,14	4,76	0,4602
Tuis	β	0,95	0,31	0,34	1,56	0,0032
Uso de suelo Caña						
CATIE	α	2,92	0,04	2,84	3	<0,0001
Cien Manzanas	α	0,05	0,12	-0,19	0,29	0,6961
La Fuente	α	1,95	0,14	1,68	2,22	<0,0001
Máquina vieja	α	4,86	0,09	4,68	5,04	<0,0001
CATIE	β	0,67	0,09	0,49	0,85	<0,0001
Cien Manzanas	β	0,17	0,03	0,11	0,23	<0,0001
La Fuente	β	1,73	0,37	1,00	2,46	0,581
Máquina vieja	β	0,96	0,52	-0,06	1,98	0,0741
Uso de suelo Pasto						
Cien Manzanas	α	1,4	0,05	1,30	1,50	<0,0001
Colima	α	2,03	0,09	1,85	2,21	<0,0001
La Fuente	α	0,26	0,1	0,06	0,46	0,0112
Tuis	α	3,17	0,12	2,93	3,41	<0,0001
Cien Manzanas	β	0,28	0,02	0,24	0,32	<0,0001
Colima	β	0,51	0,1	0,31	0,71	<0,0001
La Fuente	β	0,34	0,05	0,24	0,44	<0,0001
Tuis	β	0,72	0,3	0,13	1,31	0,0214

Además, teniendo en cuenta las estimaciones de los parámetros α y β así como sus intervalos de confianza (Cuadro 13): En la localidad de Tuis no hay diferencias entre bosque y pasto y Máquina vieja no presenta diferencias en los usos de suelo bosque y caña. Para las localidades de CATIE, Colima, La fuente y Cien Manzanas, si se encontraron diferencias entre los usos de suelo.

Cuadro 13. Parámetros(α y β) para el modelo exponencial mejor ajustado, y sus límites de confianza (95%) según localidad, para ver la relación que hay entre usos de suelo

Localidad	Uso	α			β		
		LI	LS		LI	LS	
CATIE	Bosque	3,31	3,63	A	3,31	3,63	A
	Caña	2,84	3,00	B	0,49	0,85	B
Máquina vieja	Bosque	3,06	3,42	A	0,06	1,82	A
	Caña	4,68	5,04	B	-0,06	1,98	A
Colima	Bosque	3,40	3,52	A	0,59	0,91	A
	Pasto	1,85	2,21	B	0,31	0,71	A
Tuis	Bosque	3,06	3,26	A	0,34	1,56	A
	Pasto	2,93	3,41	A	0,13	1,31	A
La Fuente	Caña	0,06	0,46	A	0,24	0,44	A
	Pasto	1,68	2,22	B	1,00	2,46	B
Cien manzanas	Caña	1,30	1,50	A	0,24	0,32	A
	Pasto	-0,19	0,29	B	0,11	0,23	B

Letras iguales indican que no hay diferencias entre los parámetros estimados ($p < 0.05$).

En la localidad de CATIE se registró una mayor abundancia de broca en bosque que en caña, en cambio en Máquina vieja no hubo diferencias entre usos. Para la localidad de Colima y Tuis no se encontraron diferencias entre los usos de suelos bosque y pasto. En la localidad de Cien manzanas hay mayor dispersión en el uso de suelo pasto que en caña, en cambio para la localidad La Fuente se observó mayor abundancia de broca en el uso de suelo caña que en pasto (Figura 9).

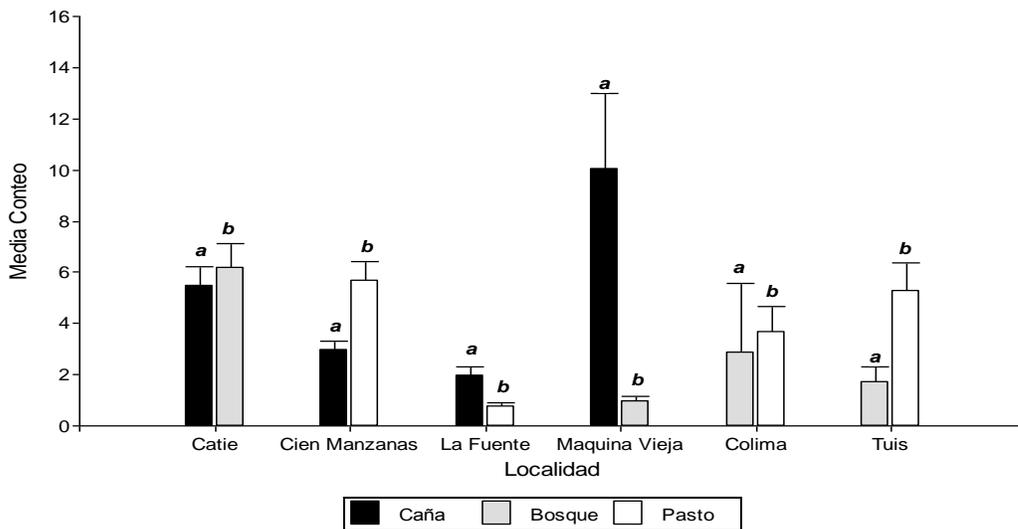


Figura 9. Gráfico de barras para las medias de los conteos de broca por uso de suelo según localidad.

4.2 Ajustes no- lineales para curvas de dispersión

Para cada uso de suelo, en cada una de las localidades, se calculó la distancia de dispersión de la broca. Para esto se despejó la distancia del modelo que mejor ajustó (Modelo 4) y luego se estimó ésta igualando a cero la variable cantidad de broca. Debido a que el mejor modelo en todos los casos fue el cuatro (Cuadro 4), para calcular la distancia se usó la función:

$$X = \left(\frac{\alpha - \ln(Y)}{b} \right)^2.$$

donde X = distancia desde el borde del café

α y β = parámetros estimados de la función

Y = cantidad de broca (número de capturas por punto de muestreo)

Para calcular la distancia a la cual la cantidad de broca es cero, y por ende ya no se dispersa, se iguala Y a cero. Como el $\ln(Y)$ cuando $Y = 0$ es 1, entonces la distancia a la que se dispersa la broca se calcula como:

$$X = \left(\frac{(\alpha - 1)}{b} \right)^2$$

Seguidamente los valores predichos por el modelo exponencial que mejor ajustó los datos versus las distancias se analizaron con todas las localidades. Para la distancia de 10 m se observó una clara diferencia entre los usos caña y pasto con bosque; en la distancia 20 m el bosque ya presenta una dispersión inferior a caña y pasto. A los 30 m pasto es la que más dispersión presenta, continuando el orden pasto>caña>bosque hasta pasados los 80 m, donde las diferencias entre los tres usos se diluyen (Figura 10).

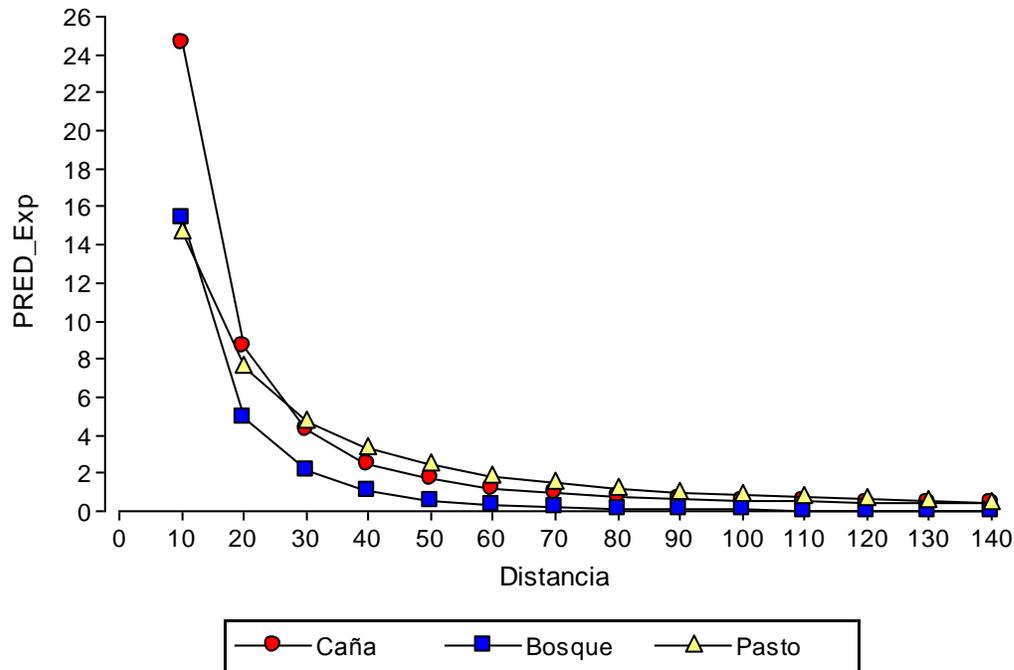


Figura 10. Valores predichos para la cantidad de broca capturada desde el borde del café hacia los usos de suelo adyacente vs las distancias, para el modelo exponencial.

4.3 Ajuste de Modelos Lineales Generales y Mixtos para dispersión de broca

Al comparar los valores de AIC y BIC para las estructuras que se han ajustado, se encontró que el menor valor se obtiene con el Modelo 13 (AIC=2989,50; BIC=3376,13) (Cuadro 14). Este modelo tiene como efecto fijo a tipo de uso, distancia y la interacción Tipo de uso×distancia, como efecto aleatorio a sujeto, con función de correlación corExp, con coordenada X a distancia y como criterio de agrupamiento a sujeto, se declara heteroscedasticidad varIdent con criterio de agrupamiento Tipo de uso×distancia.

Cuadro 14. Modelos lineales generales y mixtos para comparar los criterios AIC y BIC y así contemplar cual fue el mejor modelo evaluado

Modelo	Cov	E.A	Corr	coor X	Crit.Agrup	Heter	Crit.Agrup	AIC	BIC
1								6200,77	6394,09
2		Sujeto						6202,67	6400,18
3			corExp	distancia	sujeto			6200,85	6398,37
4		Sujeto	corExp	distancia	sujeto			6202,84	6404,56
5		Sujeto	corGaus	distancia	sujeto			6202,92	6404,65
6		Sujeto	corLin	distancia	sujeto			6202,93	6404,65
7		Sujeto	corSpher	distancia	sujeto			6202,93	6404,65
8						VarIdent	Var	3931,00	4128,52
9						VarIdent	distancia	3282,90	3535,05
10						VarExp		3828,99	4026,51
11		Sujeto	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	distancia	3082,17	3342,73
12		Sujeto	corExp	distancia	sujeto	varComb	Var3	3178,83	3388,95
13		Sujeto	corExp	distancia	sujeto	varIdent	Tipo de uso*distancia	2989,50	3376,13
14		Sujeto	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	var3*tipo de uso	3107,43	3342,78
15			corExp	distancia	sujeto	VarIdent	var3*tipo de uso	3129,46	3360,6
16	P_cafe	Sujeto	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	var3*tipo de uso	3122,42	3361,85

Según los resultados de las pruebas de hipótesis, la interacción Tipo de uso×distancia no resultó significativa, por lo que se realizaron pruebas de efectos de tipo de uso y localidad por separado (Cuadro 15).

El *range* del mejor modelo tiene un valor estimado de 12.65. Este parametro debe interpretarse con cuidado (Di Rienzo et ál. 2011). En el caso de la correlacion espacial exponencial el range es asintotico, y se calcula como tres veces el valor estimado, en este caso $12,65 \times 3 = 37,95$ es la distancia a la que las observaciones pueden ser consideradas independientes.

Cuadro 15. Modelo lineal general y mixto. Tabla de Análisis de Varianza mostrando las pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III) con la variable conteo

Fuente de Variación	gl	CM	F	Valor p
(Intercepto)	1	461	17,97	<0,0001
Tipo de uso	2	33	4,42	0,0199
Distancia	14	461	2,12	0,0101
Tipo de uso×Dist	28	461	1,17	0,2496

En la comparación de medias por tipo de uso, se observó que entre caña y bosque no hay diferencias en cuanto a la abundancia de broca. Sin embargo para pasto con relación a

caña y bosque si existen diferencias, es decir, hay menor abundancia de broca en el uso de suelo pasto (Cuadro 16).

Cuadro 16. Medias ajustadas y errores estándares obtenidas usando modelos lineales generales y mixtos.

Tipo.de.uso	Medias	E.E.	
Caña	30,82	13,99	A
Bosque	21,56	3,05	AB
Pasto	9,67	3,02	B

Las medias de las capturas de broca según las distancias (Cuadro 17) y las pruebas de comparación de medias LSD de Fisher sugieren una diferencia significativa en la distancias 0 m, 10 m y 20 m (mayores abundancias). Sin embargo, en las demás distancias no se observan cambios significativos, la abundancia de broca disminuye llegando casi a cero en la distancia 140 m.

Cuadro 17.. Medias ajustadas y errores estándares para cada distancia evaluada usando modelos lineales generales y mixtos

Dist	Medias	E.E.					
0	254,92	70,59	A				
10	18,08	5,17		B			
20	5,31	1,05			C		
30	3,42	0,62			C	D	
40	3,36	0,72			C	D	E
70	3,00	0,71				D	E
90	3,00	0,55				D	E
100	2,86	0,55				D	E
50	2,83	0,56				D	E
110	2,61	0,65				D	E
60	2,56	0,48				D	E
80	2,22	0,58				D	E
120	2,11	0,54					E
130	2,08	0,50					E
140	1,86	0,56					F

Seguidamente los valores predichos por el modelo general lineal que mejor ajustó los datos versus las distancias para cada uno de los tipos de uso. Para la distancia de 10 m se observó una clara diferencia entre los usos (dispersión en caña>pasto>bosque), mientras que para 20 m la dispersión en pasto>caña>bosque. A partir de los 30 m el bosque presenta la

menor dispersión y la caña la mayor, pero también las diferencias se diluyen cerca de los 90 m (Figura 15).

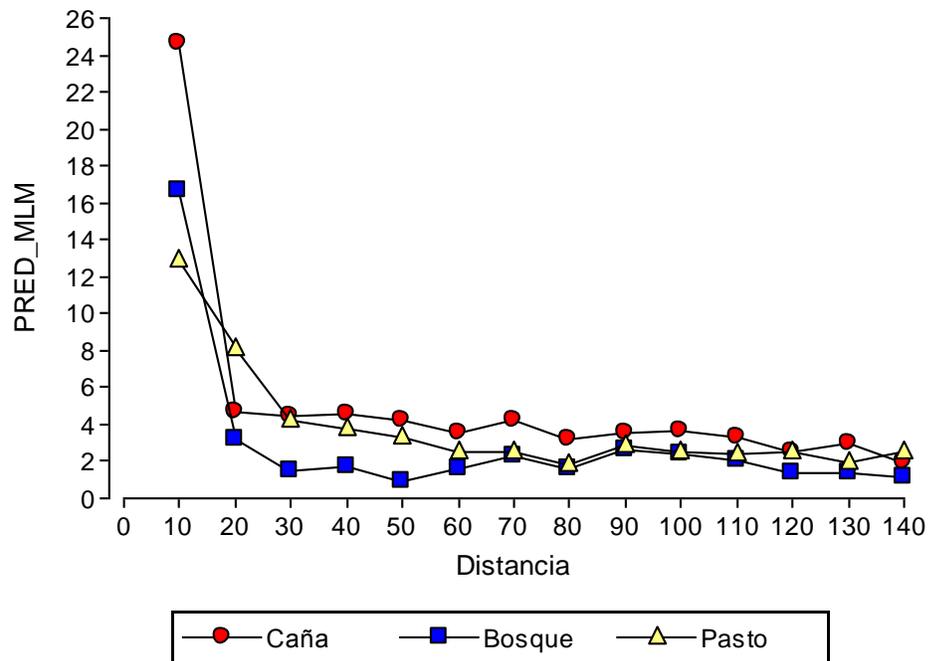


Figura 11. Valores predichos para la cantidad de broca capturada desde el borde del café hacia los usos de suelo adyacente vs las distancias, para el modelo lineal general mixto.

Después de lo anterior con el mejor modelo propuesto (Modelo 13), se hizo el gráfico de diagnóstico (Figura 12).

El Q-Q-plot muestra que la distribución de los residuos es aproximadamente normal, estos residuos son condicionales a los efectos aleatorios (es decir, aproximan los errores). El gráfico de residuos condicionales estandarizados de Pearson vs. valores ajustados, muestran varianzas residuales heterogéneas para la variable Conteo. Esto sugiere que los datos requieren una transformación logarítmica.

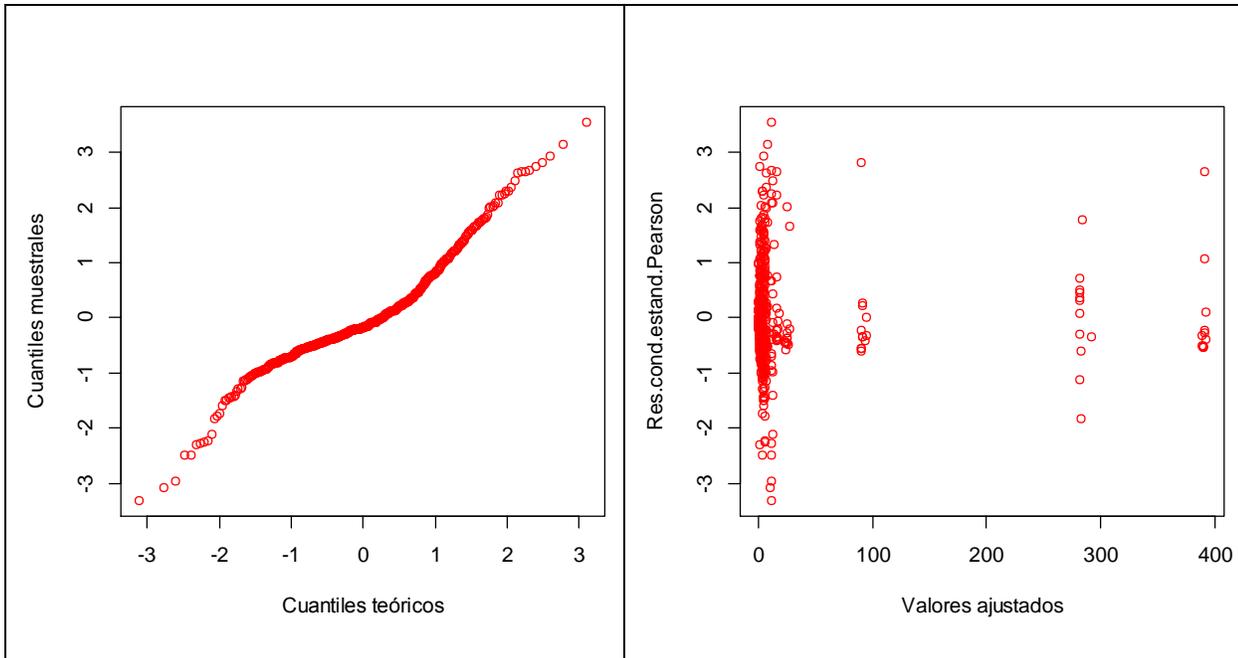


Figura 12. Gráficos de diagnóstico obtenidos para la variable conteo Ajuste de Modelos Lineales Generales y Mixtos transformando la variable respuesta conteo a logaritmo natural para dispersión de broca

Estos modelos se hicieron teniendo en cuenta la transformación a logaritmo natural de la variable respuesta conteo (Cuadro 14), encontrando al Modelo 14 como el mejor, ya que poseen los valores más bajos para los criterios de información AIC y BIC entre los modelos propuestos (Cuadro 18).

Cuadro 18. Modelos lineales generales y mixtos para comparar los criterios AIC y BIC y así contemplar cual fue el mejor modelo evaluado con la variable conteo transformada a logaritmo natural

Modelo	Cov	E.A	Corr	coor X	Crit.Agrup	Heter	Crit.Agrup	AIC	BIC
1								1459,10	1652,42
2		Sujeto						1311,44	1508,96
3			corExp	distancia	sujeto			1304,32	1501,84
4		Sujeto	corExp	distancia	sujeto			1275,80	1477,52
5		Sujeto	corGaus	distancia	sujeto			1282,03	1483,75
6		Sujeto	corLin	distancia	sujeto			1282,44	1484,16
7		Sujeto	corSpher	distancia	sujeto			1282,44	1484,16
8						VarIdent	Var	1438,72	1636,24
9						VarIdent	distancia	1449,45	1701,61
10						VarExp		1459,10	1652,42
11		Sujeto	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	distancia	1249,82	1510,37
12		Sujeto	corExp	distancia	sujeto	varComb	Var3	1233,80	1443,93
13		Sujeto	corExp	distancia	sujeto	varIdent	Tipo de uso*distancia	1253,01	1639,64
14		Sujeto	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	var3*tipo de uso	1227,29	1462,63
15			corExp	distancia	sujeto	VarIdent	var3*tipo de uso	1258,27	1489,41
16	P_cafe	Sujeto	corExp	distancia	sujeto	VarIdent	var3*tipo de uso	1244,35	1483,78

La interacción de las pruebas de hipótesis indica que la interacción Tipo de uso×distancia es significativa ($p<0.0045$) (Cuadro 19). Mostrando que los factores estudiados no actúan de forma independiente.

Cuadro 19. Tabla de Análisis de Varianza mostrando las pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III) con la variable conteo transformada a logaritmo natural

Fuente de variación	gl	CM	F	Valor p
(Intercept)	1	461	214,68	<0,0001
Tipo.de.uso	2	33	3,73	0,0347
Distancia	14	461	24,97	<0,0001
Tipo.de.uso:distancia	28	461	1,89	0,0045

Las comparaciones de medias, según los resultados de las pruebas secuenciales, se hicieron a partir de las medias de las combinaciones de niveles de factores que interactúan significativamente (medias de interacción tipo de uso×distancia). En la distancia 0 el uso de suelo bosque difiere significativamente de los usos caña y pasto encontrando en los contrastes mayor abundancia de broca en el uso de suelo bosque, sin embargo para las distancias de 20, 30, 40, 50 60, 70,100, 120, 130, 140 m, el uso de suelo bosque difiere de los usos caña y pasto ($p<0,05$), encontrándose menor abundancia de broca en el uso de suelo bosque (Cuadro 20).

Para las distancias de 10, 80 y 90 m, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) para los usos de suelo bosque vs caña y pasto. Para los usos de suelo adyacentes caña y pasto tampoco se encontraron diferencias para ninguna de las distancias evaluadas.

Para las medias ajustadas y errores estándares para tipo de uso×distancia (Anexo 2), se pudo observar que la mayor distancia recorrida de broca encontrada fuera del cafetal y dentro de los usos de suelo adyacentes a este, se encuentran en la distancia de 10 m. Entre los 20 y 50 m después del borde, la broca presenta menores capturas. A partir de la distancia de 60 m, los resultados son parecidos para los tres usos de suelo y las capturas son relativamente bajas, muy cercanas a cero.

Cuadro 20. Modelo lineal general y mixto. Contrastes y sus pruebas de hipótesis entre usos de suelo por cada distancia evaluada con la variable conteo transformada a logaritmo natural

Distancia	Tipo.de.uso*distancia	Contraste	E.E.	F	Valor p
0	BvCP	1,30	0,42	9,59	0,0021
0	CvP	0,83	0,61	1,84	0,1753
10	BvCP	-0,45	0,47	0,91	0,3397
10	CvP	0,46	0,37	1,57	0,2102
20	BvCP	-0,59	0,31	3,58	0,0589
20	CvP	-0,18	0,35	0,29	0,5931
30	BvCP	-0,67	0,28	5,75	0,0169
30	CvP	0,19	0,34	0,31	0,5801
40	BvCP	-0,65	0,30	4,65	0,0317
40	CvP	0,26	0,35	0,54	0,4648
50	BvCP	-0,86	0,24	12,34	0,0005
50	CvP	0,22	0,33	0,42	0,5165
60	BvCP	-0,58	0,26	4,85	0,0282
60	CvP	0,47	0,32	2,09	0,1491
70	BvCP	-0,73	0,34	4,68	0,0310
70	CvP	0,54	0,33	2,62	0,1060
80	BvCP	-0,40	0,28	2,01	0,1572
80	CvP	0,49	0,31	2,50	0,1148
90	BvCP	-0,35	0,27	1,69	0,1940
90	CvP	0,20	0,33	0,36	0,5471
100	BvCP	-0,71	0,31	5,05	0,0250
100	CvP	0,35	0,32	1,17	0,2807
110	BvCP	-0,51	0,28	3,24	0,0725
110	CvP	0,01	0,40	3,00E-04	0,9861
120	BvCP	-0,55	0,26	4,60	0,0325
120	CvP	0,16	0,38	0,17	0,6765
130	BvCP	-0,57	0,24	5,48	0,0196
130	CvP	0,45	0,33	1,88	0,1715
140	BvCP	-0,56	0,28	4,05	0,0446
140	CvP	-0,13	0,38	0,12	0,7341

Tipo de uso: B=Bosque, C=Caña y P=Pasto

Finalmente se hicieron validaciones simples de las suposiciones de los modelos. Se puede ver que el Q-Q-plot muestra que la distribución de los residuos es aproximadamente normal, el gráfico de residuos condicionales estandarizados de Pearson vs. valores ajustados, muestran varianzas residual homogénea para la variable *Ln_Conteo* (Figura 13).

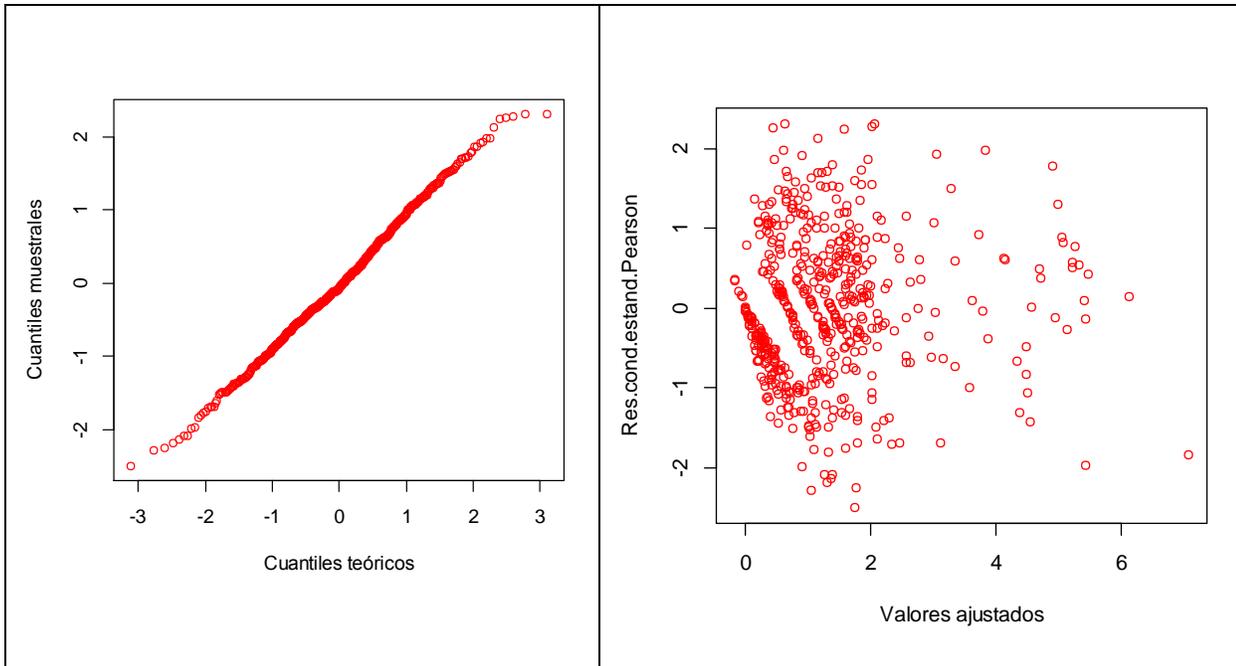


Figura 13. Gráficos de diagnóstico obtenidos para la variable Ln conteo.

Seguidamente los valores predichos por el modelo con la variable respuesta transformada a Ln que mejor ajustó los datos versus las distancias en los distintos tipos de uso. A pesar de haber interacción presente entre distancia y tipo de uso, esta se debe principalmente a la inclusión de la distancia 0. Al no mostrarse esta distancia en el gráfico de predichos versus distancias no se ve una fuerte interacción. La tendencia general indica que el uso de suelo bosque es el que menos dispersión presenta (Figura 14). Sin embargo, a partir de la información de los contrastes (Cuadro 20) se puede inferir que el uso de suelo bosque presenta menos dispersión que el promedio entre caña y pasto desde los 20 m de distancia, pero no hay diferencias significativas ($p > 0.05$) entre caña y pasto.

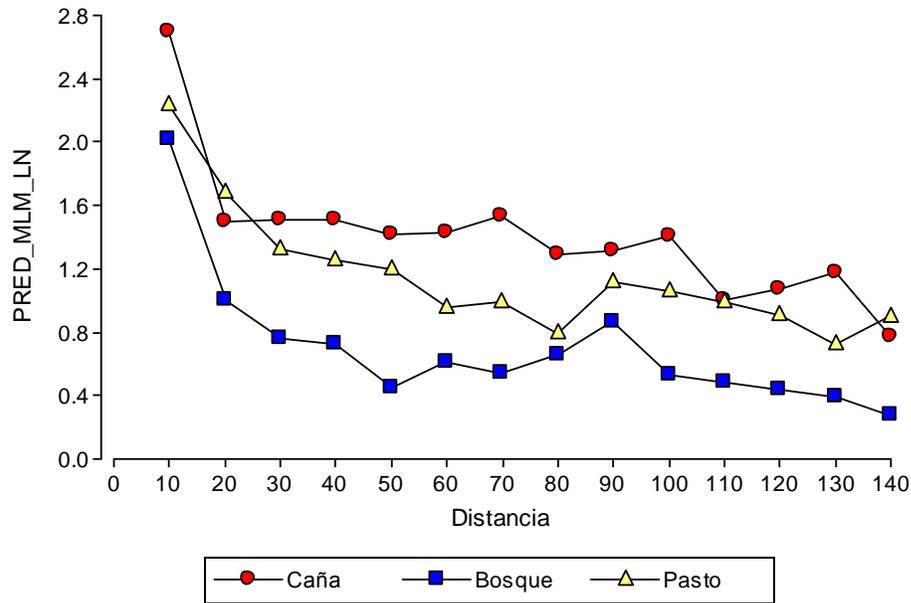


Figura 14. Valores predichos para la cantidad de broca capturada desde el borde del café hacia los usos de suelo adyacente vs las distancias, para el modelo lineal generalizado mixto con la variable respuesta transformada a logaritmo natural.

4.4 Ajuste de Modelos Generalizados Mixtos para dispersión de broca

Comparando los criterios AIC y BIC, se observó que el tercer modelo ajustado es el mejor, por lo tanto la interpretación de las pruebas de hipótesis debe basarse en este último (Cuadro 21). Este modelo tiene como estructura de covariable a P_café, como efectos fijos a tipo de uso, distancia y la interacción tipo de uso×distancia y como efecto aleatorio a sujeto.

Al hacer los análisis para la prueba de hipótesis, se encontró una interacción significativa ($p < 0,0001$) (Cuadro 22), lo que indica que los factores estudiados no actúan de forma independiente. Se plantearon contrastes abriendo el término de interacción, es decir, estudiando el factor tipo de uso dentro de los niveles del factor distancia para así encontrar si existen o no diferencias entre los usos de suelo adyacentes y la variación de las abundancias de broca entre estos.

Las comparaciones de medias, según los resultados de las pruebas secuenciales, se hicieron a partir de las medias de las combinaciones de niveles de factores que interactúan significativamente (medias de interacción tipo de uso: distancia) (Cuadro 23).

Cuadro 21. Criterios de ajuste para la selección del mejor Modelo Lineal Generalizado Mixto

Modelos	Efecto fijo		Efecto aleatorio	AIC	BIC	Desviance
	Factor	Covariable				
1	Tipo de uso + Distancia +Tipo de uso*Distancia			15124,30	15317,30	13698,70
2	Tipo de uso+Distancia+Tipo de uso*Distancia	P_cafe		12319,40	12516,70	10891,79
3	Tipo de uso+Distancia+Tipo de uso*Distancia	P_cafe	Sujeto	3498,13	3699,75	3404,13
4	Tipo de uso+Distancia+Tipo de uso*Distancia		Sujeto	4716,82	4914,15	4624,82

Con respecto a las diferencias entre usos a cada una de las distancias consideradas, para la distancia 0 entre los usos de suelo bosque vs caña y pasto no hubo diferencias ($p=0,7311$), mientras que para los usos caña y pasto si se encontraron diferencias ($p<0,0001$) registrando que en el uso de suelo caña mayor abundancia de broca.

Cuadro 22. Modelos lineales generalizados mixtos. Pruebas de hipótesis secuenciales para los efectos fijos teniendo en cuenta la variable conteo

Fuente de variación	Chi-cuadrado	gl	Valor p
Tipo de uso	6,90	2	0,0318
Distancia	40719,23	14	<0,0001
P_cafe	114,93	1	<0,0001
Tipo de uso ×Distancia	558,91	28	<0,0001

En la distancia 10 m, el uso de suelo bosque difiere de los usos caña y pasto ($p=0,0190$), encontrando menor abundancia de broca en el uso bosque, mientras para caña y pasto no se encontraron diferencias ($p=0,1584$). Para la distancia 20 m se observaron diferencias para los usos de suelo bosque vs caña y pasto, encontrando menor cantidad de broca en el uso de suelo bosque ($p<0,0001$); para el contraste caña vs pasto hubo diferencias entre los conteos ($p<0,0001$), encontrando menor abundancia de broca en el uso de suelo caña.

A los 30 m se observaron diferencias significativas entre el uso de suelo bosque vs caña y pasto ($p<0,0001$), encontrando menor abundancia en bosque, mientras, para los usos de suelo caña vs pasto no se encontraron diferencias ($p=0,2629$). A partir de la distancia de 40 m los usos de suelo adyacentes caña vs pasto no difieren mientras que para los usos de suelo

bosque vs caña y pasto si existen diferencias para estas mismas distancias, encontrándose una menor dispersión en el uso de suelo bosque (Cuadro 23).

Cuadro 23. Modelos lineales generalizados mixtos. Contrastes y sus pruebas de hipótesis entre usos de suelo por cada distancia evaluada con la variable conteo

Distancia	Tipo de uso	E.E.	Chi-Cuadrado	Valor p
0	BvCP	0,16	0,12	0,7311
0	CvP	0,18	35,41	<0,0001
10	BvCP	0,18	5,51	0,0190
10	CvP	0,21	1,99	0,1584
20	BvCP	0,24	17,74	<0,0001
20	CvP	0,25	13,41	0,0002
30	BvCP	0,30	22,51	<0,0001
30	CvP	0,27	1,25	0,2629
40	BvCP	0,29	17,89	<0,0001
40	CvP	0,27	0,33	0,5677
50	BvCP	0,36	24,53	<0,0001
50	CvP	0,28	0,16	0,6865
60	BvCP	0,30	10,68	0,0011
60	CvP	0,30	2,7E-04	0,9869
70	BvCP	0,27	6,20	0,0128
70	CvP	0,29	0,28	0,5951
80	BvCP	0,32	7,47	0,0063
80	CvP	0,32	0,35	0,5529
90	BvCP	0,26	3,87	0,0492
90	CvP	0,29	0,24	0,6234
100	BvCP	0,27	4,55	0,0330
100	CvP	0,30	0,01	0,9254
110	BvCP	0,28	5,49	0,0192
110	CvP	0,30	0,01	0,9119
120	BvCP	0,32	9,25	0,0024
120	CvP	0,31	1,27	0,2592
130	BvCP	0,32	8,38	0,0038
130	CvP	0,32	0,08	0,7728
140	BvCP	0,34	8,34	0,0039
140	CvP	0,33	3,53	0,0602

Tipo de uso: B=Bosque, C=Caña y P=Pasto

Los valores predichos por el modelo lineal generalizado mixto que mejor ajustó los datos versus las distancias usando el promedio sobre todas las repeticiones (una vez descontados los efectos de finca) se usaron para analizar la interacción entre distancia y tipo

de uso (Figura 15). Este modelo presentó igual comportamiento promedio que el MLM presentado en la Figura 11.

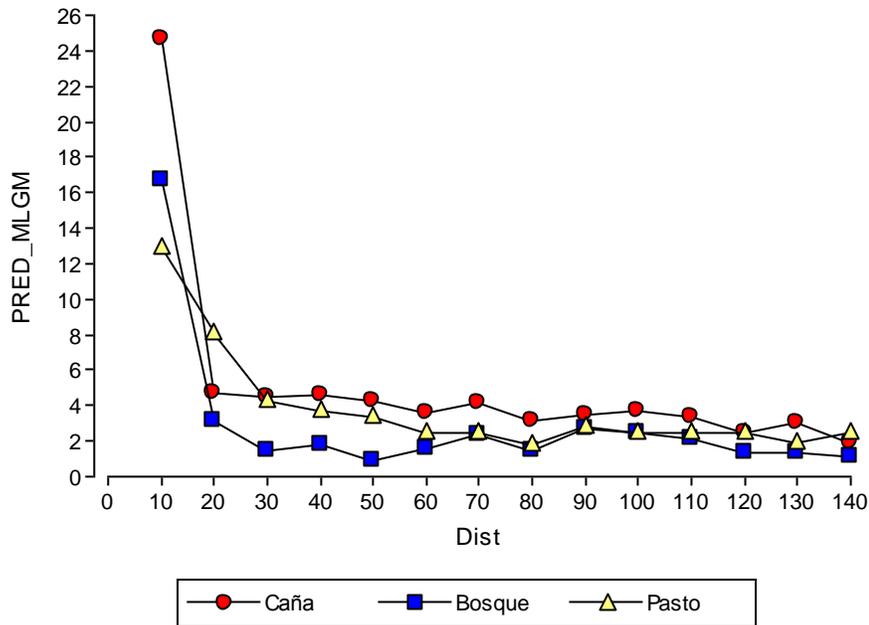


Figura 15. Valores predichos para la cantidad de broca capturada desde el borde del café hacia los usos de suelo adyacente vs las distancias, para el modelo lineal generalizado mixto.

4.5 Ajuste de modelos de regresión por pasos (*broken stick*) para dispersión de broca

Estos modelos fueron analizados con diferentes estructuras para llegar al mejor ajuste. Sin embargo se encontró que no existe un buen ajuste para estos, ya que los errores son muy grandes para cada uno de los parámetros y las estimaciones en su mayoría son negativas teniendo en cuenta cada uso de suelo y cada finca.

4.6 Comparación de los modelos alternativos que mejor se ajustaron

En este caso los criterios AIC y BIC no se tienen en cuenta para la comparación de los modelos evaluados, ya que estos tienen diferente variable respuesta. Es importante mencionar que así como se encontraron diferencias en los modelos evaluados, también se encontraron similitudes. Para los mejores modelos analizados dentro de cada familia de modelos (Cuadro 24), las distancias máximas de dispersión encontradas fueron en el uso de suelo caña, seguida por pasto y por último bosque.

Para los cuatro modelos las distancias de dispersión máximas se encontraron en el uso de suelo caña y las mínimas en el uso de suelo bosque. Siempre se encontraron diferencias entre el bosque vs caña y pasto; en cambio, para la comparación de medias de los usos de suelo adyacentes caña y pasto no hubieron diferencias significativas entre estos usos, encontrando así en el uso de suelo bosque una mínima abundancia de broca y en caña y pasto una mayor abundancia del insecto.

Cuadro 24. Modelos que mejor se ajustaron para comparar la estimación de la relación foco de dispersión y cada distancia en la que fueron colocadas las trampas

Modelo	Familia exponencial
4	$Y = e^{(a-b\sqrt{x})}$
Modelo	Modelos alternativos
3	MLGM
13	MLM
14	MLM (variable respuesta transformada a Ln)

4.7 Correlación de Pearson entre la variable respuesta conteo y los predichos de los modelos que mejor ajustaron los datos

Como resultado se encontró que el mejor modelo fue el modelo lineal generalizado mixto, ya que el índice de correlación de Pearson entre la variable respuesta conteo y los predichos de este es casi igual a uno ($r=0,99$). Esto quiere decir que existe una correlación positiva mayor en comparación con los otros modelos.

Cuadro 25. Correlación de Pearson entre la variable respuesta conteo y los predichos de los modelos que mejor ajustaron los datos

Modelo	Variable	r de Pearson	Valor p
4	PRED_Exp	0,87	<0,0001
13	PRED_MLM	0,58	<0,0001
14	PRED_MLM_LN	0,78	<0,0001
3	PRED_MLGM	0,99	<0,0001

5 DISCUSIÓN

5.1 Discusión estadística

En este estudio se probaron cinco modelos no-lineales propuestos por Kot et ál. (1996) para evaluar la dispersión de organismos, los cuales permitieron explicar el movimiento de la broca del cafetal en los diferentes usos de suelo. El modelo que mejor se ajustó a los datos fue el de la familia exponencial negativa con raíz cuadrada de la distancia, el cual permite hallar diferencias entre los usos de suelo adyacente a los parches de café, así como también encontrar la distancia máxima aproximada en la que se puede dispersar el insecto.

Los resultados concuerdan con el estudio hecho por Wallace (1966), encontrando el mismo ajuste de curvas con el modelo exponencial negativo; no obstante, se observó diferencias con el estudio de Dobzhansky y Wright (1943), sobre genética de poblaciones naturales en *Drosophila pseudoobscura*, quienes afirman que la varianza de la dispersión incrementa linealmente con el tiempo.

Debido a la dificultad que presentan los modelos no lineales clásicos para encontrar una solución cuando el modelo es muy complejo, se optó por hacer un modelo para cada situación. Esto se traduce en una desventaja a la hora de generalizar los resultados.

Seguidamente se compararon tres modelos alternativos para poder ver la relación del tipo de cultivo y las distancias sin el sesgo dado por el efecto de finca dentro de cada localidad. Si bien la utilización de los modelos considerados permitió contemplar los factores asociados al muestreo de los datos, la potencia de cada uno fue diferente. Dentro de cada uno de los modelos usados, MLG, MLGM y MLG con variable transformada, distintas aproximaciones fueron evaluadas con los criterios de comparación de Akaike (1974) y de Schwartz (1978). Estos criterios permitieron seleccionar la mejor estrategia de análisis para cada tipo de modelo.

Se encontró que para el modelo lineal general y mixto con la variable respuesta conteo y el modelo lineal general mixto con la variable conteo transformada a Ln , no hizo falta la inclusión de la covariable, esto se debe a que no fue significativa y por ende no contribuye al ajuste de los datos. En este la cantidad de insectos en el café no estaba relacionada con los

conteos dentro de los otros usos de suelo. Sin embargo, para los modelos lineales generalizados y mixtos se incluyó la covariable en el modelo siendo esta significativa. Esto quiere decir que la covariable si tiene una relación lineal con el conteo de insectos en los distintos usos cuando se usa esta aproximación.

En los modelos lineales generalizados mixtos se encontró una mayor abundancia de broca en la distancia 0 en el uso de suelo caña, por el contrario de los modelos lineales generales mixtos con la variable respuesta transformada a logaritmo natural se vio que en el uso de suelo bosque para la distancia 0 hay mayor abundancia de esta, esto se debe por la transformación, lo que significa que la media de la variable original no es igual a la media de los $Ln(Y)$.

Por otra parte al realizar los gráficos de los predichos de la cantidad de broca que se encuentra en el cafetal hacia los usos de suelo adyacentes vs las distancias, se encontró que para los cuatro modelos que mejor ajustaron los datos (uno dentro de cada gama de modelos), el patrón de dispersión de la broca es similar.

Cuando se quieren comparar diferentes modelos de una misma familia, estos deben ser para la misma variable respuesta (Mangeaud 2005). Dado que en este estudio se utilizaron transformaciones logarítmicas de la variable para incorporarla a los modelos generales lineales mixtos, resultaría inapropiado utilizar los métodos mencionados anteriormente.

Por esto, y también para comparar las otras dos familias de modelos (exp y MLGM) la comparación se realizó usando el coeficiente de correlación de Pearson entre la captura observada y la captura predicha por cada uno de los modelos, siendo el mejor aquel con un coeficiente mayor. En este caso fue el modelo lineal generalizado mixto, que permite ajustar directamente la variable número de insectos con una distribución Poisson, asumiendo entre otras cosas, que se incrementa la varianza al aumentar la media. Este modelo concuerda con el usado por Mangeaud (2005) en su estudio de preferencia de alimentación en insectos, sugiriendo que para las variables de tipo conteo (con distribución Poisson) este modelo es más potente

La ventaja de este modelo es que se utiliza para modelar recuentos que posean una distribución Poisson, en este caso con una función de enlace logarítmica. Bajo esta distribución podemos asegurarnos que los valores predichos serán positivos; una característica de esta distribución es que la varianza es igual a la media, haciendo que las varianzas aumenten cuando aumenta el conteo de insectos. La desventaja de este MLGM usando distribución Poisson con efectos aleatorios no siempre mantiene la relación media varianza, ya que la variabilidad añadida por los efectos aleatorios presentes pueden dar lugar a una sobredispersión.

Excepto por el MLG, en todos los otros se encontró interacción entre distancia y uso de suelo. Sin embargo, esta interacción no se vio presente si consideramos desde la distancia 10 en adelante. Además, independientemente del tipo de uso, los conteos en el borde fueron muy superiores a los de las siguientes distancias. Por estos motivos los gráficos de dispersión de la broca por tipo de uso no incluyeron la distancia 0.

5.2 Discusión biológica

Bajo este contexto, dentro del manejo agronómico del cultivo y específicamente bajo poscosecha, se vio afectada la disponibilidad de recursos así como de hábitat para la broca, por ende la dispersión en este periodo se vio aumentada. Esto confirma el planteamiento de Dufour (2002) y se refleja en la migración masiva de la broca, que abandona los cultivos debido a la mínima oferta de frutos durante la finalización de la cosecha.

El patrón de dispersión, de *H. hampei* en el campo y la influencia del paisaje es un tema poco estudiado (Benavides et ál. 2003). Seguir los movimientos de los insectos bajo condiciones naturales es esencial para comprender su comportamiento (Hagler y Jackson 2001). Este tipo de estudios tienen una gran importancia debido a que la forma en que se dispersa una plaga en el agroecosistema es un indicativo, entre otros aspectos, de la capacidad de búsqueda de la plaga, de su capacidad para invadir nuevas áreas (Schunter et ál. 1974) y del éxito reproductivo de las hembras (Weisser y Volk 1997), características que pueden ayudar a definir estrategias para el control del insecto.

Con el modelo mejor ajustado, se encontró que la distancia máxima aproximada de dispersión alcanzada por la plaga, fue en el uso de suelo caña 31,2 m, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Castaño et ál. (2005), quien encontró que la broca emergente del suelo después del zoqueo (poda) infestó frutos presentes en ramas distanciadas hasta 30 m. Sin embargo, es importante aclarar que para esta investigación no hubo zoqueos ni renovación generalizada en los cafetales estudiados.

El encontrar abundante número de individuos de la broca en el borde de los cafetales refleja las características de esta especie en identificar el huésped a través de sus compuestos volátiles principalmente alcoholes (Mathieu et ál. 1997, Cardenas 2000). Se ha sugerido sin embargo, que algunas especies de la misma familia (Scolytinae) vuelan de manera aleatoria sin ser atraídos por ningún tipo de estímulo (Raffa y Berriman 1983), lo cual puede manifestarse en la escasa presencia de individuos a distancias mayores, aún con demostrada gran capacidad de vuelo para esta especie (90 minutos de vuelo continuo y 180 minutos de vuelo intermitente) (Bustillo y Villalba 2004).

Las capturas de broca realizadas en las áreas de caña, bosque y pasto adyacentes al cafetal, son comparativamente bajas con las capturas en las áreas de café, lo cual refleja el comportamiento monófago de la broca cuya orientación del vuelo es hacia los compuestos volátiles generados por los frutos del café; sin embargo, Johanneson y Mansigh (1984) y Damon (2000) reportan una lista de 23 especies de 11 familias botánicas hospederas. Esto podría explicar el encontrar individuos en las áreas adyacentes al cafetal, especialmente en bosque, aunque esto no concuerda con Mathieu et ál. (1999), quienes no encontraron capturas en las trampas ubicadas en un rango de 20 m de distancia al cafetal.

Las condiciones en las cuales se realizó la investigación fueron óptimas para la plaga, caracterizándose por tener áreas de café con maduración temprana, influenciada por el clima de la vertiente del Atlántico y del Valle Central Oriental. Debido a la distribución de la precipitación, el estrés hídrico no es muy marcado y se generan múltiples floraciones, por lo tanto existe producción durante casi todo el año y a la vez condiciones óptimas para la reproducción y alimentación de *H. hampei*, por lo que se asume que la proporción de hembras que se capturó fuera de los lotes de café se debe a la dispersión natural de la broca. Esto se debe a que estas tienen los suficientes recursos. Por otra parte si el estudio se hubiera hecho

en otras áreas con estaciones seca se hubiera obtenido diferencias más marcadas.

Las bajas capturas en áreas de bosque adyacentes a los cafetales encontrados en este estudio permiten inferir que las áreas de bosque sirven como barrera para que la broca no se desplace, esto puede deberse a que el viento se lleva a la broca por encima del bosque, siendo este olfativamente repelente y por esto la broca no se acerca, en este caso las trampas con los difusores no actúan eficazmente ya que estas compiten con muchos olores. Sin embargo, para los usos de suelo caña y pasto se encontró una mayor capacidad del insecto para moverse. Una de las justificaciones a favor de esto es que los usos de suelo caña y pasto facilitan la dispersión al haber más corrientes de viento (Baker 1984, Bustillo et ál. 2007).

6 CONCLUSIONES

6.1 Estadísticas

Los modelos lineales generalizados mixtos presentaron un mejor ajuste para la variable respuesta del presente estudio y fueron más potentes estadísticamente que los restantes modelos considerados.

Los modelos lineales mixtos fueron los más apropiados en el análisis de variables que posean distribución normal (ln conteo), mientras que los modelos lineales generalizados mixtos son los más convenientes para aquellas con distribución Poisson (conteos).

Los resultados obtenidos refuerzan la importancia de probar diferentes modelos para estimar la dispersión de insectos y lograr mejores ajustes, con la consiguiente disminución de los errores.

Con el modelo lineal generalizado mixto, se puede estimar las distancias máximas de dispersión de la plaga.

6.2 Biológicas

Con el modelo antes mencionado, se encontró que la distancia máxima aproximada de dispersión fue en el uso de suelo caña, esto indica que este uso de suelo adyacente sirve como tránsito para que la broca se mueva entre los cafetales.

De acuerdo a las curvas de dispersión obtenidas con el modelo ajustado, el uso de suelo que mejor controla el movimiento de la broca es el bosque, ya que las cantidades y distancias de captura fueron comparativamente menores que los usos pasto y caña. Por lo tanto el bosque representa una barrera para el movimiento de la plaga entre los usos de suelo en donde hay parches de café, consecuentemente su implementación y/o protección se recomienda para disminuir la dispersión de broca.

Dados los resultados obtenidos en esta investigación se recalca la importancia de las configuraciones de paisaje para mitigar la dispersión de la broca.

7 RECOMENDACIONES

Continuar investigando el efecto de los usos de suelos adyacentes sobre la capacidad de dispersión de la broca, incluyendo nuevas variables como factores climáticos (humedad relativa, temperatura y precipitación) que determinan la emergencia y dispersión de la plaga.

Probar efectos de cercas vivas, barreras rompevientos con árboles (diferentes composiciones y arquitectura) o de cultivos de especies que sirvan como repelentes para la broca.

De acuerdo a los resultados encontrados en el estudio considerar las dimensiones para las cercas vivas.

Estudiar otras configuraciones del paisaje y de uso de suelo adyacente a los parches de café, para conocer las fricciones producidas por otros cultivos.

Para nuevas investigaciones tener en cuenta la dirección del viento, ya que este es un factor importante para la dispersión de la broca.

Para nuevas investigaciones, a nivel espacial tener en cuenta mayores distancias para cada trampa por transecto, ya que para este estudio no existía independencia entre estas debido al radio de acción del difusor, por lo tanto es recomendable colocar estas a mayor distancia, para que exista independencia.

De acuerdo a los resultados encontrados en esta investigación, definir nuevas alternativas de manejo integral relacionadas con diferentes configuraciones del paisaje incorporando y/o manteniendo bosques alrededor de cultivos de café dado su papel como barrera para la dispersión de broca.

Debido a que el *range* empírico mostró una distancia cercana a los cuarenta metros se recomienda poner los transectos y las trampas dentro de los transectos a distancias de cuarenta metros, para que sean consideradas como independientes.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 19(6):716-723.
- Baker, P. 1984. Some aspects of the behavior of the coffee berry borer in relation to its control in southern Mexico (Coleoptera, scolytidae). *Folio Entomológica Mexicana* no. 61:9-24.
- Barrera, J. 2000. Fundamentos y perspectivas de control biológico. In Mohammad, H; Badii, A; Flores, E; Galán LJ. Eds. Nuevo León, MX, Universidad Autónoma de Nuevo León. p.211-227.
- Barrera, J; Herrera, F; Valle, J. 2005. Efecto de la altura de la trampa en la captura de la broca del café: implicaciones en dispersión y muestreo. *Entomología Mexicana* 4: 542-546.
- Bark and Wood Boring Beetles of the World. 2006. *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (en línea). EE.UU. Consultado 7 dic. 2011. Disponible en <http://www.barkbeetles.org/browse/subject.cfm?SUB=5004>
- Benavides, P. 2003. Classical biological control of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) in Colombia with African parasitoids. In *International Symposium on Biological Control of Arthropods* (1, 2003, Indiana, USA) s.l. p. 430-434.
- Borbón, O. 1995. Uso del control biológico de la broca del fruto del cafeto *Hypothenemus hampei* Ferrari 1867. In: Seminario/Taller regional sobre control biológico de la broca del fruto del cafeto (1994, San Pedro Sula, HN.) HN. s.p.
- Borbón, O. 2005. Experiencias sobre manejo de la broca del café en Costa Rica. In Barrera, J (ed). *Simposio Situación Actual y Perspectivas de la Investigación y Manejo de la Broca del café en Costa Rica, Cuba, Guatemala y México*. 1era edición, Chiapas, MX. 79 p.
- Bueno, A; Bruno, R; Pimentel, T; Sanaiotti, M; Magnusson, W. 2012. The width of riparian habitats for understory birds in an Amazonian forest. *Ecological Applications* 22(2):722-734.
- Bustillo, A; Villalba, D. 2007. Efecto del clima y condiciones del cultivo en la biología y comportamiento de la broca del café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) Coleoptera: Curculionidae, scolytinae, p 37-50. In *Manejo Da Broca-Do-Café: Workshop Internacional*. Paraná, BR. 282 p.
- Campos, E. 2001. Programa de prevención y control de broca del café (en línea). *Boletín Informativo del ICAFE* 1(4). Consultado 29 de jun. 2006. Disponible en <http://www.icafe.go.cr/icafe/Boletines/PZ4.pdf>.
- Cárdenas, R M. 2000. Trampas y atrayentes para monitoreo de poblaciones de broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Col., Scolytidae). p. 369- 379. En: *Memorias XIX Simposio Latinoamericano de Caficultura*. San José.
- Castaño, S; Benavides, M; Baker, P. 2005. Dispersión de *Hypothenemus hampei* en cafetales zoqueados. *CENICAFE* 56(2):142-150.

- Castillo, E; Conejo, A; Pedregal, P; García, R; Alguacil, N. 2002. Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática. Consultado 7 de Marzo.2012 Disponible en http://www.investigacion-operaciones.com/ARCHIVOS_LIBRO/LibroCompleto.pdf.
- Carmona, F. 2003. Modelos Lineales. ES, Universidad de Barcelona. 262 p. Consultado 5 de Dic. 2012. Disponible en <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r72120.PDF>.
- Damon, A. 2000. A review of the biology and control of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). Bulletin of Entomological Research 90:453-465.
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, CW. InfoStat versión 2011 (en línea). AR, Universidad Nacional de Córdoba. Disponible en <http://www.InfoStat.com.ar>.
- Dobzhansky, T; Wright, S. 1942. Genetics of natural populations, X. Dispersion rates in *Drosophila pseudoobscura*. Genetics 28: 304-340.
- Dufour, B; Barrera, JF; Decazy, B. 1999. La broca de los frutos del cafeto ¿la lucha biológica como solución? In Bertrand, B; Rapidel, B. eds. Desafíos de la caficultura en Centroamérica. San José, CR, IICA. p. 293-327.
- Dufour, B. 2007. Condiciones de uso de las trampas en el control de la broca del café. In Manejo Da Broca-Do-Café Workshop Internacional (Paraná, BR 28 de noviembre a 2 de diciembre de 2004). BR. 282 p.
- Dufour, B; Gonzalez, M; Chavez, M; Ramirez, R. 2005. In International Conference on Coffee Science (20, 11-15 October 2004, Bangalore, IN). Paris, FR, ASIC. p. 1243-1247.
- Dufour, B; Frérot, B. 2008. Optimization of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* Ferrari (Col., Scolytidae), mass trapping with an attractant mixture. Journal of Applied Entomology 132: 591-600.
- Dufour, B; Barrera, J; Decazy, B. 1999. La broca de los frutos del cafeto. ¿La lucha biológica como solución? P 293-325. In Bertrand, B; Rapidel, B. eds. Desafíos de la caficultura en Centroamérica. San José C. R. Editorial AGROAMERICA. 496 p.
- Efron, B; Tibshirani, R. 1993. An Introduction to the Bootstrap, Chapman and Hall, London. Consultado 19 de marzo. Disponible en <http://www-stat.stanford.edu/~ckirby/brad/papers/2002Prevalidation.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT) 2004. Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas. Proyecciones al año 2010 (en línea) IT. 95 p. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/y5143s/y5143s00.pdf>
- Funes, H. 2004. Métodos estadísticos en problemas espaciales. Máster Tesis. AR, Universidad Nacional de Salta. 162 p.

- Gallardo, A. 2006. Geoestadística. Ecosistemas: Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente 15(3): 48-58. Consultado el 12 de Marzo de 2012. Disponible en <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=431>.
- Gómez, R. 1994. Biología y propagación en laboratorio de la broca del café *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Scolytidae) y su parasitoide *Cephalonomia stephanoderis* Betrem (Hymenoptera: Bethyridae). Tesis Lic. Universidad Nacional Autónoma de México. 79 p.
- Gonzales, C. 2007. Producción de café en Honduras: modelado de las relaciones Cafeto-Arbolado. Tesis Lic. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid. 232 p.
- Gurharay, F; Monterrey, J; Monterroso, D; Staver, C. 2000. Manejo integrado de plagas en el cultivo de café. CR, CATIE. 272 p. (Serie Técnica, Manual Técnico no. 44).
- Gurharay, F. 2001. Manual Manejo de la Broca en los Cafetos. Turrialba, CR, CATIE. 27 p.
- Hagler, J; Jackson, G. 2001. Methods for marking insects: current techniques and future prospects. Annual Review of Entomology 46: 511-543.
- ICAFFE (Instituto del Café de Costa Rica). s.f. Región cafetalera valle central (en línea) Consultado 16 Oct 2011 Disponible en http://www.icafe.go.cr/nuestro_cafe/regiones_cafetaleras/valle_central.html.
- Irwini, A; Paladio, T. 2000. Evolución de la dispersión en una población de la Caminar-Piedra con las generaciones traslapadas. Biología teórica de la población 58: 321-328.
- Johannesson, N; Mansingh, A. 1984. Host pest relationship of the genus *Hypothenemus* (Scolytidae: Coleoptera) with special reference to the coffee berry borer (*H. hampei*). J. Coffee Res 14(2): 43-56.
- Kot, M; Mark, A; Lewis, P. 1996. Dispersal Data and the Spread of Invading Organisms. Ecology 77: 2027-2042.
- López, L. 1994. Uso de entomopatógenos y parasitoides como control biológico de plagas y enfermedades en el cultivo de café. CR, MAG. 96 p.
- Llorenc, B. 2011. Modelos lineales generalizados mixtos algunos casos prácticos. X Congreso Galego de Estatística e Investigación de Operacións. Universidad Autónoma de Barcelona. Consultado el 3 de Sep. 2012. Disponible <http://xsgapeio.uvigo.es/resumenes/Badiella.pdf>.
- MacArthur, R H; MacArthur, J W. 1961. En la diversidad de especies de aves. Ecología 42: 594-598.
- MacArthur, R H. 1972. Geographical Ecology: Patterns in the distribution of species. Harper and Row. New York, NY. 269 p.
- Malhado, CHM; Ramos, AA; Carneiro, P L S; Souza, JC; Wechsler, FS; Eler, JP; Azevêdo, D.M.M.R; Sereno, J.R.B. 2008. Modelos no Lineales para describir el crecimiento de Bufalinos de la raza Murrah. Archivos de Zootecnia 57(220): 497-503.
- Mangeaud, A; Videla, M. 2005. En busca de la independencia perdida: la utilización de Modelos Lineales Generalizados Miztos en pruebas de preferencia.

- McCulloch, C; Searle, S. 2001. Generalized, Linear, and Mixed Model (en línea). Consultado el 15 Dic. 2011. Disponible en http://webdelprofesor.ula.ve/economia/jramoni/MODELOS%20LINEALES%202/Clases/Tema1_1/TEMA1.1a.pdf.
- Mathieu, F; Brun, L; Frérot, B. 1997a. Factor related to native host abandonment by the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Ferr.) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology* 121:175-180.
- Mathieu, F.; L.O. Brun; C. Marchillaud; B. Frérot. 1997b. Trapping of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* Ferr. (Col., Scolytidae) within a mesh-enclosed environment: Interaction of olfactory and visual stimuli. *Journal Applied Entomology* 121(3): 181-186.
- Mathieu, F; Brun, O; Frerot, B; Suckling, D; Frampton, C. 1999. Progression in field infestation is linked with tramping of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Col.; Scolytidae). *Journal Applied Entomology* 123: 535-540.
- Motulsky, H.J; Ransnas, L.A. 1987. Fitting curves to data using nonlinear regression. *FASEB J* 1: 365-374.
- OIC (Organización Internacional de Café). 2003. Conceptos y Variables de datos que se utilizan en las estadísticas de la organización (en línea). Consultado 23 mar. 2009. Disponible en <http://www.ico.org>.
- Olivas, A. 2010. Efecto del uso del suelo adyacente al cafetal sobre la dispersión y dinámica poblacional de la broca *Hypothenemus hampei* Ferrari y la abundancia de enemigos naturales en el cantón de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 140 p.
- Oviedo, A. 2006. Evaluación de la incorporación de diferentes fungicidas y dosis en dietas artificiales para la reproducción de la broca del café con miras a la multiplicación masiva de sus parasitoides bajo condiciones controladas. Informe de trabajo final de graduación para optar por el título de Ingeniero en Biotecnología con el grado académico de Bachiller Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 89 p.
- Proyecto SICA/MAG; ECU. 2004. La Broca del Café (en línea). EC, Servicio de Información Agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Consultado 20 oct. 2011. Disponible en <http://www.sica.gov.ec/cadenas/cafe/docs/broca.htm>.
- Quispe, J. 2007. Caracterización del impacto ambiental y productivo de las diferentes normas de certificación de café en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 149 p.
- Raffa, KF; Berryman, AA. 1983. The role of host plant resistance in the colonization behaviour and ecology of bark beetles (Coleoptera: Scolytidae). *Ecological Monographs* 53: 27-49.
- Romero, J; Cortina, H. 2007. Tablas de vida de *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) sobre tres introducciones de café. *Revista Colombiana de Entomología* 33(1): 10-16.
- Rupp, A; Koh, K; Zumbo, B.D. 2003. What is the impact on exploratory factor analysis results of a polychoric correlation matrix from LISREL/PRELIS and EQS when some respondents are not able to follow the rating scale. Paper presented at the annual

- meeting of the American Educational Research Association (AERA) in Chicago, Illinois.
- Sibaja, G; Jiménez, M. 1989. La broca del café. San José, CR, MAG. 16 p.
- Stefano, P; Ezio, B. 2006. Poisson regression model in Epidemiology - an Introduction. Annali della Facolta di Medicina del studi Veterina. Di Parma 26: 25-44.
- Schuller, S. 2005. Boletín electrónico informativo: Informe sobre el Workshop Internacional “Manejo da Broca-do-Café”, en Londrina, Brasil. Red Peruana de Broca del Café no. 1. 7 p.
- Schuster, M; Boling, J; Marony, J. 1974. Biological control of Rhodes grass scale by airplane releases of an introduce parasite of limited dispersing ability. p. 227-250.
- Schwartz, G. 1978. Estimating the dimension of a model. Ann. Statistic 6(2): 461-464.
- Thomson, G. 2005. Blueprint to a Billion: 7 Essentials to Achieve Exponential Growth, Wiley 1: 142-152.
- Trejo, A; Fúnez, R. 2004. Manejo integrado de la broca del café: manual técnico (en línea). HN, Instituto Hondureño del Café. 44 p. Consultado 20 de Dic 2011. Disponible en http://econegociosagricolas.com/ena/files/Manejo_Integrado_de_la_Broca_del_Cafe.pdf.
- Tukey, JW. 1958. Bias and confidence in not-quite large simple (Abstract). Annals of Mathematical Statistics 1: 29-614. Consultado 19 de Mar. de 2012. Disponible en <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2122595>.
- Wallace, B. 1996. On the dispersal of Drosophila. American Naturalist. 100: 551-563.
- Weisser, W; Volk, W. (1974). Dispersal in the aphid parasitoid Lysiphlebus cardui (Marshall) (Hym; Aphidiidae). Journal of Applied Entomology 121:23-28.

ANEXOS

Anexo 1: Modelos generalizados y mixtos, Efectos fijos para los diferentes usos de suelo en estudio

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	5.54	0.14	39.81	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque	-0.5	0.18	-2.81	0.0049
Tipo.de.usoPasto	-1.1	0.18	-5.95	<0.0001
Dist10	-2.76	0.06	-46.26	<0.0001
Dist20	-4.43	0.13	-33.05	<0.0001
Dist30	-4.46	0.14	-32.73	<0.0001
Dist40	-4.45	0.14	-32.89	<0.0001
Dist50	-4.52	0.14	-32.23	<0.0001
Dist60	-4.69	0.15	-30.73	<0.0001
Dist70	-4.54	0.14	-32.05	<0.0001
Dist80	-4.82	0.16	-29.67	<0.0001
Dist90	-4.72	0.15	-30.53	<0.0001
Dist100	-4.67	0.15	-30.93	<0.0001
Dist110	-4.76	0.16	-30.11	<0.0001
Dist120	-5.05	0.18	-27.68	<0.0001
Dist130	-4.87	0.17	-29.21	<0.0001
Dist140	-5.32	0.21	-25.53	<0.0001
P_cafe	3.20E-04	9.30E-05	3.44	0.0006
Tipo.de.usoMBosque:Dist10	-0.07	0.09	-0.73	0.4651
Tipo.de.usoPasto:Dist10	0.81	0.1	7.77	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist20	-0.06	0.21	-0.31	0.76
Tipo.de.usoPasto:Dist20	2	0.17	11.77	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist30	-0.78	0.27	-2.84	0.0045
Tipo.de.usoPasto:Dist30	1.4	0.2	7.09	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist40	-0.64	0.26	-2.48	0.013
Tipo.de.usoPasto:Dist40	1.25	0.2	6.19	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist50	-1.21	0.33	-3.63	0.0003
Tipo.de.usoPasto:Dist50	1.21	0.21	5.7	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist60	-0.49	0.28	-1.79	0.0742
Tipo.de.usoPasto:Dist60	1.1	0.24	4.58	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist70	-0.26	0.24	-1.08	0.2791
Tipo.de.usoPasto:Dist70	0.94	0.23	4.07	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist80	-0.49	0.3	-1.63	0.104
Tipo.de.usoPasto:Dist80	0.91	0.27	3.38	0.0007
Tipo.de.usoMBosque:Dist90	0.05	0.24	0.22	0.8277
Tipo.de.usoPasto:Dist90	1.24	0.23	5.36	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist100..	-0.09	0.24	-0.39	0.6965
Tipo.de.usoPasto:Dist100	1.07	0.24	4.51	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist110..	-0.15	0.26	-0.57	0.5662
Tipo.de.usoPasto:Dist110	1.13	0.24	4.63	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist120..	-0.31	0.31	-0.98	0.3251
Tipo.de.usoPasto:Dist120	1.46	0.26	5.62	<0.0001
Tipo.de.usoMBosque:Dist130..	-0.49	0.3	-1.62	0.1056
Tipo.de.usoPasto:Dist130	1.01	0.27	3.76	0.0002
Tipo.de.usoMBosque:Dist140..	-0.17	0.34	-0.51	0.61
Tipo.de.usoPasto:Dist140	1.72	0.28	6.19	<0.0001

Anexo 2: Modelos generalizados mixtos para las Medias ajustadas y errores estándares de la interacción Tipo.de.uso×Dist

<u>Tipo.de.uso</u>	<u>Dist</u>	<u>PredLin</u>	<u>E.E.</u>	<u>Media</u>	<u>E.E.</u>
Caña	0	5.71	0.13	302.26	37.83
MBosque	0	5.22	0.13	184.1	23.32
Pasto	0	4.61	0.13	100.59	13.4
Caña	10	2.95	0.14	19.08	2.62
Pasto	10	2.66	0.15	14.25	2.17
MBosque	10	2.38	0.14	10.85	1.56
Pasto	20	2.19	0.16	8.92	1.47
Caña	20	1.28	0.18	3.61	0.66
MBosque	20	0.72	0.21	2.06	0.42
Pasto	30	1.55	0.19	4.69	0.89
Caña	30	1.25	0.18	3.48	0.64
MBosque	30	-0.02	0.27	0.98	0.26
Pasto	40	1.42	0.2	4.14	0.81
Caña	40	1.27	0.18	3.55	0.65
MBosque	40	0.13	0.25	1.14	0.29
Pasto	50	1.3	0.2	3.68	0.75
Caña	50	1.19	0.19	3.29	0.61
MBosque	50	-0.52	0.33	0.6	0.2
Caña	60	1.02	0.2	2.77	0.54
Pasto	60	1.01	0.22	2.76	0.62
MBosque	60	0.03	0.26	1.03	0.27
Caña	70	1.17	0.19	3.22	0.61
Pasto	70	1.01	0.22	2.76	0.62
MBosque	70	0.42	0.23	1.52	0.34
Caña	80	0.9	0.2	2.45	0.5
Pasto	80	0.7	0.25	2.02	0.5
MBosque	80	-0.09	0.28	0.92	0.26
Pasto	90	1.14	0.21	3.13	0.67
Caña	90	1	0.2	2.71	0.54
MBosque	90	0.55	0.22	1.74	0.38
Caña	100	1.04	0.19	2.84	0.55
Pasto	100	1.01	0.22	2.76	0.62
MBosque	100	0.45	0.22	1.57	0.35
Caña	110	0.95	0.2	2.58	0.52
Pasto	110	0.98	0.23	2.67	0.6
MBosque	110	0.3	0.24	1.36	0.32
Caña	120	0.66	0.22	1.93	0.43
Pasto	120	1.01	0.22	2.76	0.62
MBosque	120	-0.14	0.28	0.87	0.24
Caña	130	0.84	0.21	2.32	0.48
Pasto	130	0.75	0.24	2.11	0.52
MBosque	130	-0.14	0.28	0.87	0.24
Pasto	140	1.01	0.22	2.76	0.62
Caña	140	0.39	0.24	1.48	0.36
MBosque	140	-0.28	0.3	0.76	0.22

Anexo 3: Modelos generales mixtos. Medias ajustadas y errores estándares para Tipo de uso×distancia teniendo en cuenta la transformación de la variable conteo a ln

Tipo.de.uso	distancia	Medias	E.E.																		
MBosque	0	5.51	0.25	A																	
Caña	0	4.62	0.25		B																
Pasto	0	3.79	0.25			C															
Caña	10	2.7	0.25				D														
Pasto	10	2.23	0.25					D													
MBosque	10	2.02	0.25						D	E											
Pasto	20	1.68	0.25							E	F										
Caña	70	1.53	0.25							E	F	G									
Caña	30	1.51	0.25							E	F	G									
Caña	40	1.51	0.25							E	F	G									
Caña	20	1.5	0.25							E	F	G									
Caña	60	1.43	0.25							E	F	G	H								
Caña	50	1.42	0.25							E	F	G	H								
Caña	100	1.4	0.25							E	F	G	H								
Pasto	30	1.33	0.25							E	F	G	H	I							
Caña	90	1.32	0.25							E	F	G	H	I							
Caña	80	1.29	0.25								F	G	H	I	J						
Pasto	40	1.26	0.25								F	G	H	I	J						
Pasto	50	1.2	0.25								F	G	H	I	J	K					
Caña	130	1.18	0.25								F	G	H	I	J	K	L				
Pasto	90	1.12	0.25								F	G	H	I	J	K	L	M			
Caña	120	1.07	0.25								F	G	H	I	J	K	L	M	N		
Pasto	100	1.06	0.25								F	G	H	I	J	K	L	M	N		
MBosque	20	1	0.25								F	G	H	I	J	K	L	M	N		
Caña	110	1	0.25								F	G	H	I	J	K	L	M	N		
Pasto	70	1	0.25									G	H	I	J	K	L	M	N		
Pasto	110	0.99	0.25									G	H	I	J	K	L	M	N		
Pasto	60	0.96	0.25									G	H	I	J	K	L	M	N	O	
Pasto	120	0.91	0.25									G	H	I	J	K	L	M	N	O	
Pasto	140	0.9	0.25									G	H	I	J	K	L	M	N	O	
MBosque	90	0.87	0.25									G	H	I	J	K	L	M	N	O	
Pasto	80	0.79	0.25										H	I	J	K	L	M	N	O	
Caña	140	0.77	0.25										H	I	J	K	L	M	N	O	
MBosque	30	0.76	0.25										H	I	J	K	L	M	N	O	
MBosque	40	0.73	0.25										H	I	J	K	L	M	N	O	
Pasto	130	0.73	0.25										H	I	J	K	L	M	N	O	
MBosque	80	0.66	0.26											I	J	K	L	M	N	O	
MBosque	60	0.61	0.25												J	K	L	M	N	O	
MBosque	70	0.54	0.25													K	L	M	N	O	
MBosque	100	0.52	0.25													K	L	M	N	O	
MBosque	110	0.49	0.25														L	M	N	O	
MBosque	50	0.45	0.25															M	N	O	
MBosque	120	0.44	0.25																M	N	O
MBosque	130	0.39	0.25																	N	O
MBosque	140	0.28	0.25																		O