



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

“EFECTO DE LA PERTURBACION CRONICA SOBRE LA
INTEGRIDAD BIOLOGICA DE LAS COMUNIDADES
VEGETALES DE CONCEPCION BUENAVISTA. OAXACA”.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

B I O L O G O

P R E S E N T A :

GILBERTO MARTINEZ PEREZ



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM

DR. CARLOS MARTORELL DELGADO

2004



FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DRA. MARÍA DE LOURDES ESTEVA PERALTA
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a Usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"EFECTO DE LA PERTURBACION CRONICA SOBRE LA INTEGRIDAD BIOLOGICA DE LAS
COMUNIDADES VEGETALES DE CONCEPCION BUENAVISTA. OAXACA".

realizado por MARTINEZ PEREZ GILBERTO

con número de cuenta 9330351-6

quién cubrió los créditos de la carrera de BIOLOGIA

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

DR. MARTORELL DELGADO CARLOS.

Propietario

BIOL. AVILA AKERBERG VICTOR DANIEL

Propietario

DR. MEAVE DEL CASTILLO JORGE ARTURO

Suplente

DRA. BONFIL SANDERS M. CONSUELO

Suplente

BIOL. VEGA PEÑA ERNESTO VICENTE

[Handwritten signatures of Víctor Avila, Jorge Meave del Castillo, and Ernesto Vega Peña]

Consejo Departamental de Biología

[Handwritten signature of Juan Manuel Rodríguez Chávez]
M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chávez

FACULTAD DE CIENCIAS



UNIDAD DE ENSEÑANZA
DE BIOLOGIA

Sufre al subir a los cielos,
Bajo el amargo sabor del azufre
La tibia leche que alimenta a la luz fugaz que rompe en estrellas el firmamento.
Herida de fuerte navaja templada,
En el ombligo de la tierra
Herida que sangra.

ÍNDICE

I.- Resumen

II.- Agradecimientos

1.-Introducción

2.- Descripción de la zona de estudio

3.- Metodología

4.- Resultados

5.- Discusión y Conclusiones

6.- Referencias

Apéndices

I *Imágenes del gradiente de intensidad de perturbación en Concepción Buenavista*

II *Tablas de resultados del análisis de ajuste con GLIM*

III *Estandarización del IBI*

I. RESUMEN

Efecto de la perturbación crónica sobre la integridad biológica de las comunidades vegetales de Concepción Buenavista, Oaxaca

En la actualidad el disturbio antropogénico es el factor más importante de la modificación y deterioro de los ecosistemas del mundo. La aplicación de metodologías para conocer el estado de perturbación ocasionado por las actividades del hombre sobre la naturaleza, a impulsado los esfuerzos por cuantificar y hacer más comprensibles los resultados a los ciudadanos comunes y mantener la atención pública en los sistemas vivos. El término “integridad biológica” se aplica a la condición de un lugar que no ha sido perturbado, en contraste con uno que está expuesto a la influencia humana. El índice de integridad biológica (IBI), mide en base a la combinación de dos o más indicadores biológicos (atributos ecológicos medibles que pueden ser afectados de una u otra manera por las actividades humanas), la salud o grado de perturbación en los ecosistemas. La Mixteca Alta es una regiones con más deterioro ambiental ocasionado por las actividades del hombre. El resultado de la aplicación de este IBI, muestra la relación, entre el nivel de actividades humanas y la integridad de las diversas comunidades vegetales del municipio de Concepción Buenavista. Es evidente la intensa perturbación de los sistemas biológicos en la zona originada por las actividades humanas. Estas actividades son las causantes del acelerado avance de la degradación ambiental, que además se encuentra favorecida por la naturaleza deleznable del sustrato geológico, algunas características del clima (lluvias torrenciales y sequías intensas), y el tipo de vegetación reinante (especies longevas y de crecimiento lento. La pausada regeneración hace que el efecto de los disturbios sea observable durante períodos más largos.

La modificación del desarrollo metodológico del IBI, ayuda a conocer de manera más robusta y sensible los cambios en la integridad biológica de los ecosistemas.

Es importante hacer notar que la aplicación del IBI, puede sentar las bases para desarrollar planes y programas para mitigar los daños ocasionados por las actividades humanas, con el fin de evitar el deterioro de la vegetación remanente y de las comunidades humanas originarias de la región.

II. AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que me acompañaron en este duro trajinar, a los compañeros que disfrutaron de los hermosos paisajes de la Mixteca y de los sabrosos mezcales, un fuerte abrazo.

Principalmente ésta en mi memoria el Dr. Carlos Martorell, por su valiosa contribución a la realización de este trabajo, sus comentarios, ayuda y regaños me alentaron para concluir esta ardua labor de varios años. ¡Salud, Carlos!

Agradezco los comentarios tan atinados, su conocimiento y tiempo dedicado por cada uno de los sinodales a la revisión de mi trabajo: Los doctores Jorge Meave y Consuelo Bonfil, a los biólogos Ernesto Vega y Víctor Ávila. Todo mi agradecimiento

A las innumerables personas que dedicaron su tiempo y esfuerzo para la culminación del trabajo de campo.

Itzel, Vero, Pavka, Charly, Mario Jaime, los geógrafos, Andrea Martínez y demás exiliados y errantes acompañantes del Dr. Martorell. ¿Qué hubiera hecho sin uds?. Sin su valiosa ayuda no se hubiese logrado terminar tan titánico trabajo. Gracias.

La M. en C Susana Valencia por su ayuda en la identificación de los ejemplares de *Quercus*, su conocimiento nos ayudó a descubrir el fabuloso mundo de los encinos y lo complicado de su identificación. Gracias.

Un agradecimiento especial a la comunidad y autoridades del Municipio de Concepción Buenavista, Oaxaca, por dejarnos trabajar en sus tierras, brindarnos su valiosa amistad, por su esfuerzo y ayuda en el montaje de las mini reservas y su sospechosas risitas cuando nos ven echados de panza en los pastizales. Mil gracias.

A Simona y Nico, muchas gracias por su hospitalidad, su riquísima comida y sus valiosos conocimientos del monte. Sin su colaboración no se hubiese logrado este sueño. Gracias por los momentos tan gratos que nos hizo pasar con sus cuentos, anécdotas e historias. Gracias, los llevo en mi memoria. ¡Salud, Simona y Nico!

Mi gratitud para:

Mi familia, mis padres (Natalia y Gilberto), por su valioso apoyo, comprensión, amor y cariño. A Che, Eduardo, Isabel y mi adorada Samy por sus preocupaciones constantes, su interés y su cariño. Mil gracias.

A mamá Ita , por dejarme refugiar del mundo tan áspero, por tu comprensión, amor, paciencia, y dedicación, un abrazo muy fuerte. Angel , Joel y Andy no me olvido de su interés y cariño. Gracias.

A Carlos Martínez Ibarra, por las grandes cosas que me enseñaste y que nadie jamás me enseñara, por tus ganas de luchar contra corriente, tu gran amistad, cariño y tu terquedad para realizar todo en la vida. Gracias (hermano). ¡Salud! (En Catalán).

A todos los demás integrantes de mi familia, que sin saberlo han contribuido con un grano de arena para la construcción de este esfuerzo. Gracias.

Estoy en deuda con :

Marito (Hermano blanco) y demás tripulantes del barco fantasma en el que navegas, recuerda el Sherpa (hermano negro), espera poder navegar en esas aguas profundas y oscuras, para compartir aventuras.

Vero, por tu valiosa amistad y ayuda. Ya titúlate.

Itzia y Sra. Isaura por su interés y preocupación.

Muy especialmente para Itzel Baca. No existen palabras de agradecimiento para expresarte cuanta ayuda me aportas todos los días de mi vida. Por tu amor tan inmenso que me empujo a culminar mi tesis, por el cariño y dedicación que empeñaste en mi. Gracias mil gracias.

“Our ability to protect biological resources depends on our ability to identify and predict the effects of human actions on biological systems, especially our ability to distinguish between natural and human-induced variability in biological condition.” (Karr y Chu 1999).

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El disturbio

En la actualidad existen pocas zonas en el mundo que no han sido afectadas de manera directa o indirecta por las actividades del hombre. Las poblaciones humanas están irradiadas por toda la Tierra, haciendo imposible separar físicamente los ecosistemas naturales de la influencia humana. El tamaño de la población humana se incremento de manera significativa en el siglo pasado y este aumento es considerado como la causa principal de la crisis ambiental (Begon *et al.*, 1987; Singh, 1998). Las actividades humanas modifican y destruyen gran parte del paisaje que observamos a nuestro alrededor. Se llama disturbio a un acontecimiento que es externo al sistema y que lo modifica dependiendo del grado e intensidad con el que presenta (Freedman,1995). Cuando se habla en general sobre al disturbio nos referimos a un evento discreto en el tiempo y relacionado con la disrupción de la estructura de los ecosistemas, comunidades o poblaciones; así como con los cambios en la disponibilidad de los recursos y los cambios en el ambiente físico (Pickett y White, 1985).

1.2. Disturbio natural

Existen dos tipos principales de disturbio. El primero se observa de manera natural en los ecosistemas y comunidades bióticas del mundo, y es causada por factores ambientales y biológicos como los huracanes, las inundaciones, las sequías, las plagas y los incendios. Por la periodicidad con la que se presentan estos eventos en la naturaleza, la mayoría de las especies presentan adaptaciones a las perturbaciones naturales (Harper, 1977), lo que les permite subsistir a través del tiempo. El disturbio es un agente discreto que desplaza, daña o mata uno o más individuos creando, una oportunidad directa o indirecta para que otros organismos puedan establecerse en estos sitios (Souza, 1984). El efecto de los disturbios en los ecosistemas muy complejos es un cambio en la

diversidad y estructura de la comunidad, al igual que la reducción de la competencia por los recursos (Pickett y White, 1985; Challenger, 1998; Begon *et al.*, 1987). El efecto del disturbio natural consiste en devolver a la comunidad a un estado anterior de la sucesión (Pickett y White, 1985). Se ha sugerido que los disturbios naturales mantienen la alta diversidad de las especies en los ecosistemas en estados intermedios de intensidad (hipótesis del disturbio intermedio, Connell, 1989), creando un estado sin equilibrio que disminuye los efectos de las interacciones entre los competidores, permitiendo el establecimiento de nuevas especies y el aumento en la heterogeneidad ambiental. Estos disturbios naturales son necesarios para mantener la diversidad biológica y sus efectos pueden ser revertidos por el mismo ecosistema (Connell, 1978; Souza, 1984).

1.3. Disturbio antropogénico

La acumulación del impacto antropogénico en la biosfera está en función de dos factores principalmente: (1) el crecimiento poblacional y las demandas de recursos para satisfacer sus necesidades, y (2) el impacto por persona en el ambiente, el cual varía entre los países, dependiendo de la naturaleza y el grado de industrialización (Freedman, 1995). Los disturbios antropogénicos son relativamente recientes en la historia evolutiva de los ecosistemas terrestres, por lo que no existen adaptaciones en los organismos para ellos. El incremento en su frecuencia y magnitud, relacionado con la evolución cultural y tecnológica de las poblaciones humanas, ha causado la extinción de muchas especies, acelerando las tasas de extinción mundiales a un 100% y degradación ambiental en todo el mundo (Challenger, 1998; Sarukhan com. pers). En la actualidad el disturbio antropogénico es el factor más importante de la modificación y deterioro de los ecosistemas del mundo (Karr *et al.*, 1986; Begon *et al.*, 1987; Singh, 1998; Parker, 1999; Rapport, 1999).

Dentro del disturbio antropogénico existen dos tipos principales, conocidos como crónico y agudo, dependiendo de la intensidad y periodicidad con la que se presentan los eventos (Singh, 1998). El disturbio antropogénico agudo se observa cuando se modifican totalmente los ecosistemas y las comunidades biológicas. Por ejemplo, es visible cuando se realiza la deforestación mecanizada total o parcial de extensas zonas maderables de bosques y selvas (Singh, 1998). Este tipo de disturbio agudo se presenta de manera generalizada en países industrializados, debido a que se dispone de tecnología y recursos necesarios que permiten modificar áreas extensas y sus recursos naturales. A menudo, los sistemas perturbados se pueden recuperar de manera natural de este tipo de disturbios si se les otorga el tiempo necesario para que la sucesión se lleve a cabo, siempre y cuando exista un banco de semillas y un área adyacente con propágulos de especies que puedan establecerse nuevamente. Esto no excluye que en numerosos casos la perturbación aguda de los sistemas biológicos imposibilite su regeneración (Singh, 1998 ; Challenger, 1998).

1.4. Disturbio antropogénico crónico

La forma de disturbio crónico es una forma lenta y sutil de disturbio, pero igualmente destructivo. Generalmente la forma crónica de disturbio ocurre cuando sólo se toman fragmentos de biomasa de los ecosistemas, en forma de leña, forraje u otros productos útiles, de forma continua y sin permitir la reparación de la perturbación, modificándose así los procesos de sucesión ecológica (Singh, 1998).

El disturbio crónico es lento pero seguro. Es un proceso no lineal, acumulativo y puede causar perturbaciones irreversibles. Se observa primordialmente en países del tercer mundo. El disturbio crónico es uno de los problemas menos reconocidos en la actualidad debido al bajo impacto que se observa a corto plazo y a factores

sociopolíticos, principalmente. Este tipo de perturbación se observa en muchas regiones y ecosistemas del planeta, principalmente en los países en vías de desarrollo, ya que sus economías están basadas en la explotación de materias primas, las cuales frecuentemente están bajo una mala administración y manejo (Foote, 1996. citado por Singh, 1998).

La degradación ambiental causada por el disturbio humano crónico es un fenómeno discontinuo (Myers, 1996). Los cambios en la vegetación se presentan de manera drástica. Estos cambios pueden ser causados por factores como el sobrepastoreo, los cambios de uso de suelo (agricultura, ganadería y urbanización entre otros), la contaminación (suelo, aire y agua), el ozono, la fragmentación y la deforestación, al igual que la sobreexplotación de las tierras.

El efecto de este tipo de disturbio en los ecosistemas o las comunidades es imperceptible a corto plazo pero cuando las actividades humanas persisten a lo largo de un tiempo amplio, las consecuencias son observables (Singh, 1998; Milchunas, *et al*, 2000), y en muchos casos es demasiado tarde para detener o aminorar sus efectos. Podemos encontrar desde sitios con escasa vegetación hasta paisajes lunares donde la vegetación es inexistente. La alteración del hábitat por disturbios antropogénicos crónicos incluye la compactación del suelo y el incremento del escurrimiento superficial del agua con la erosión subsecuente, pérdida de nutrientes y hojarasca, cambios en la composición de especies e incremento en la abundancia de organismos exóticos, entre otras alteraciones ecológicas. Las zonas degradadas continúan siendo afectadas por el disturbio crónico, lo que resulta en un bajo reclutamiento y una alta mortalidad de reclutas (Singh, 1998; Rapport, 1999; Milchunas, *et al*, 2000).

1.5. El disturbio antropogénico en México

En México, al igual que en los demás países en vías de desarrollo, muchas de las presiones destructivas ejercidas sobre los ecosistemas son causadas directa o indirectamente por las poblaciones humanas empobrecidas que intentan satisfacer sus necesidades básicas (Challenger, 1998), en combinación con las políticas públicas que no se consideran como asuntos prioritarios para la conservación de sus recursos naturales. Además, en la mayoría de los casos estos temas son pretexto de campaña política, pero por lo general no llegan a ser asuntos prioritarios de estado. Frecuentemente los gobernantes tratan de ocultar los verdaderos problemas ecológicos como la deforestación y el cambio de uso de suelo, así como el uso irracional de las aguas continentales, ya que la obtención de divisas para países en vías de desarrollo se da principalmente a través de la exportación de sus recursos naturales a naciones industrializadas. Entre sus prioridades de éstas últimas está procesar estas materias primas en forma de productos de consumo que sustenten su crecimiento económico.

1.5.1 *Disturbio antropogénico crónico.*

La pérdida de la cobertura vegetal natural en México es debida en gran medida a causas antropogénicas crónicas, de las que destacan algunos tipos de agricultura, la ganadería y la extracción de biomasa de los bosques por los pobladores, ya que en la actualidad la leña es el principal proveedor de energía en las comunidades rurales (Singh, 1998) (Tabla.1.1).

Estado	Leña rural	Leña urbana	Total
Veracruz	1,452, 959	287, 136	2, 140, 785
Oaxaca	1, 173, 486	277, 535	1, 652, 581
Total del país	10, 530, 346	3, 094, 062	18, 356, 428

Tabla 1.1 Consumo (ton/año) residencial de leña en México. Masera, 1996. Principales estados consumidores de leña

Los principales ecosistemas sometidos a disturbios antropogénicos son las selvas, los bosques templados, las zonas áridas y semi-áridas del país. En México y en Latinoamérica, la pérdida de los bosques y selvas se debe sobre todo a su conversión en pastizales para pastoreo (Challenger, 1998). Las zonas áridas y semidesérticas también son objeto de pastoreo extensivo, 5,005,180 ha perturbadas (SARH,1992), por lo tanto 70% de las zonas áridas y semiáridas del país están sobrepastoreadas (SEMARNAP, 2000). Esto lleva inevitablemente a la simplificación de los ecosistemas, puesto que las especies apetecidas por el ganado, así como otras muy susceptibles al pisoteo, se pierden. A ello se suma la compactación y erosión del suelo, procesos que llevan a un grado alto de desertificación e incluso a la pérdida total de los ecosistemas (Flores-Villela y Gerez, 1988; Challenger, 1998). La degradación física del suelo impermeabiliza el terreno, lo que origina un volumen mayor de escurrimientos y disminución de la cantidad de agua disponible en el suelo, lo cual provoca problemas para la emergencia de plántulas y la penetración de las raíces. La degradación biológica del suelo ocurre en 64% del territorio y 25% es severo implicando una condición irreversible (Secretaría de Desarrollo Social,1993; Mainguet, 1996; SEMARNAT, 2002).

Cuando el disturbio antropogénico es tan intenso, prolongado y difundido que altera profundamente las características físicas y químicas del suelo, se modifica la composición y abundancia de los propágulos presentes en el banco de semillas del suelo y en la lluvia de semillas, haciendo que la regeneración de la vegetación primaria sea más difícil y quizás imposible (Challenger, 1998).

1.5.2 *Un ejemplo de los cambios debidos al disturbio en los bosques de México*

En estudios anteriores, realizados en varias áreas de México se encontró que los bosques sometidos a disturbios crónicos como la quema, la agricultura y el pastoreo, la vegetación secundaria que sustituye a los bosques templados es un matorral dominado por una o más especies de los géneros *Dodonaea*, *Arctostaphylos*, *Rhus*, *Baccharis*, *Senecio*, *Acacia*, *Croton* y *Juniperus* (Rzedowski, 1978; Caballero, 1992 citado por Challenger 1998).

1.6. ¿Existe la salud ambiental?

En la actualidad existe un auge por el monitoreo ambiental; este auge es resultado de las observaciones a nivel mundial sobre el impacto causado en los ecosistemas por las actividades humanas. Las investigaciones orientadas a conocer los efectos de los disturbios antropogénicos sobre las comunidades biológicas han acuñado nuevos términos para hacer más comprensibles los resultados a los ciudadanos comunes y mantener la atención pública en los sistemas vivos (Chaneton y Facelli, 1991; Harris y Silveira, 1999; Hughes *et al*, 2000). Éste es el caso del concepto de salud, normalmente definido como un estado de bienestar o prosperidad, o como un estado libre de enfermedades. A menudo algunos autores insisten que la salud es una metáfora inapropiada porque no es una propiedad observable de los ecosistemas o comunidades.

De acuerdo con esto, la salud sería una propiedad exclusiva de los organismos. Sin embargo, pudiera hablarse de un ecosistema saludable, si éste está activo y mantiene su organización y autonomía a través del tiempo, y además mantiene su elasticidad (*resilience*) contra los factores estresantes. Karr y Chu (1999) defienden el uso de la palabra salud como una forma apropiada de hacer más familiar el concepto ecológico de integridad biológica a los ciudadanos (Karr 1999). Por ello, ha pasado a emplearse en la jerga de la conservación, aplicándola a los ambientes que proporcionan servicios a sus residentes humanos y no humanos (Karr, 1999). Una de las aplicaciones más importantes del término, es la de equiparar la salud de acuerdo al grado de integridad biológica de las comunidades.

1.7. Integridad biológica

El término “integridad biológica” se aplica a la condición de un lugar que no ha sido perturbado, en contraste con uno que está expuesto a la influencia humana. Un sitio íntegro mantiene una biota que es producto de los procesos biogeográficos y ecológicos, en el que la influencia de la sociedad moderna es mínima. El disturbio crónico humano, al actuar gradualmente, crea un gradiente de integridad en los ecosistemas (Figura 1.1).

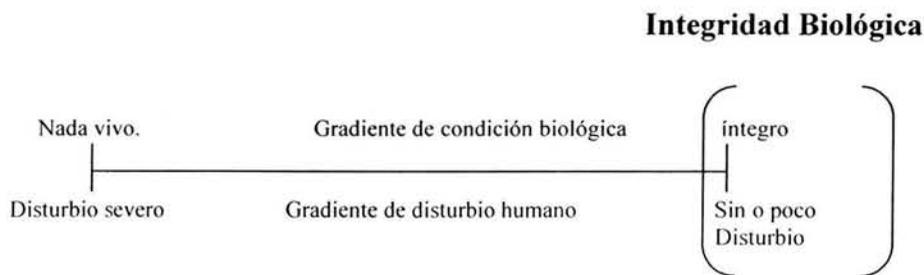


Figura 3.1. Esquema de la representación de la influencia de las actividades humanas y la condición biológica del sistema. Disturbio severo = nada vivo: La severidad del disturbio elimina todas las formas de vida. Integro=Poco o nada perturbado: No hay actividades o son tan pocas que casi no afecta a las formas de vida (íntegro). (Tomado de Karr, 1999).

1.7.1 *El índice de integridad biológica*

Una vez establecidas estas definiciones se desarrollaron criterios biológicos para el conocimiento de la integridad y la salud de los ecosistemas que nos rodean. Tal es el caso de los índices de integridad biológica (por sus siglas en inglés index of biological integrity, **IBI**), desarrollados por James J. Karr (1981), los cuales utilizan la combinación de dos o más indicadores biológicos (atributos ecológicos medibles que pueden ser afectados de una u otra manera por las actividades humanas). De forma análoga, en la salud humana el diagnóstico de enfermedades también se realiza por medio de indicadores tales como presión sanguínea, composición química en la orina, temperatura (los índices en economía funcionan de la misma forma, como el Dow-Jones y Nasdaq, basados en el valor de diferentes acciones). En un principio el IBI fue concebido para medir las condiciones biológicas de los ríos (Karr, 1981), pero sus fundamentos conceptuales le permiten desarrollar índices análogos que pueden medir la integridad en sistemas biológicos terrestres.

Uno de los pasos más importantes para el desarrollo de estos índices es la selección de los indicadores biológicos que formarán parte del índice de integridad biológica. Cada indicador tiene una respuesta diferente al disturbio antropogénico.

Muchos estudios han demostrado una correlación entre la degradación ambiental y algunos indicadores biológicos, como son los cambios en la riqueza, la composición y la abundancia de especies, cambios en las proporciones de especies nativas y exóticas, presencia de algunas especies indicadoras de perturbación tolerantes e intolerantes (Karr *et al*, 1986; Karr,1981,1991 y Karr y Chu,1999).

Cada indicador brinda información acerca del ecosistema, del sitio de muestreo y de toda la región. Con la combinación de estos indicadores se caracteriza la integridad biológica por varias vías, de manera semejante a un examen médico, el cual es indicador de la salud personal. Sin embargo, es importante hacer notar que ni la salud humana, ni la económica o la de los ecosistemas o comunidades, es una simple suma de sus parámetros (Karr *et al*, 1986). Estos indicadores pueden ser combinados en un índice multimétrico, que a su vez puede ser usado para detectar el nivel de degradación e identificar las causas; además, este índice puede ayudar a determinar las acciones de manejo y la prevención de la degradación ambiental causada por las perturbaciones antropogénicas, así como mantener un buen estado de los ecosistemas naturales. El papel principal del índice multimétrico es detectar la divergencia de la integridad biológica de las comunidades atribuida a las actividades humanas. El índice multimétrico integra múltiples dimensiones de los sistemas complejos, con la finalidad de documentar los procesos que permitan entender las variaciones observadas en los sistemas naturales. Esta característica del índice de integridad biológica permite predecir la integridad de manera robusta de acuerdo al grado de intensidad de los disturbios a los que ha sido sometida cada comunidad (Karr, 1991).

Para garantizar una medición efectiva de la integridad, el valor para cada indicador debe estar basado en la comparación de un sitio a nivel regional con poco o nada de incidencia humana (Faush *et al*, 1984), por lo que todas las mediciones subsecuentes están de algún modo referidas a dicho sitio.

1.7.2 *Patrones biológicos para ecosistemas terrestres*

Los patrones propuestos para la construcción del IBI están basados en las interacciones bióticas, la estructura del hábitat y la diversidad y los efectos de los disturbios sobre éstas. Los indicadores son patrones teóricos y empíricos recabados de una revisión de esfuerzos anteriores para conocer la salud de los sistemas naturales (ECS, USEPA, RIVPACS e IBIs, entre otros). La aplicación exitosa del IBI depende en gran medida del riguroso proceso de identificación de los indicadores y de sus sensibilidades a los efectos de las perturbaciones sobre los sistemas.

La riqueza de especies es un atributo usado en muchos modelos de salud ambiental (Fausch *et al*, 1984; Harris y Silveira, 1999; Jenkins y Parker, 1999; Karr y Chu, 1999; Hughes *et al*, 2000), puesto que proyecta la complejidad de las comunidades, así como su estabilidad en términos del número de extinciones locales. Ambos atributos están relacionados con la hipótesis de disturbio intermedio (Connell, 1978). La composición y la diversidad de especies son características afectadas por la intensidad de las perturbaciones (Rawat y Uniyal, 1992; Singh, 1998; Peltzer *et al*, 2000). Algunos modelos propuestos para medir la salud o integridad de los sistemas biológicos son los relacionados con la abundancia por especie (log-normal, geométrico y vara-partida), que son indicadores del nivel de perturbación (Hill y Hamer, 1998).

Algunos grupos taxonómicos también responden a los efectos de los disturbios como las leguminosas, las gramíneas y las compuestas (Rawat y Uniyal, 1992; Vasconcelos, 1999; Milchunas *et al*, 2000; Peltzer *et al*, 2000). Las especies indicadoras de disturbio pueden ser utilizadas en los modelos que predicen la integridad, ya que su presencia y abundancia dan idea del grado de disturbio al que fue o está siendo sometida la

vegetación (Connell, 1978; Frouz 1999; Stapanian y Cassell, 1999). Otros patrones seleccionados son los grupos con características específicas (suculentas, hierbas) con respuesta diferenciada a los disturbios (Lavorel *et al*, 1997).

1.8. Monitoreo biológico

El grado de disturbio influye en la toma de decisiones, por ejemplo la definición de áreas prioritarias para la conservación. El grado de perturbación y destrucción del medio nos proporciona por sí mismo información valiosa para posteriormente evaluar el grado y tipo de amenaza de los ecosistemas y establecer planes y programas para el manejo sustentable de los mismos. Las decisiones en el área de la conservación deben tomarse en un corto plazo debido a que el disturbio antropogénico crónico actúa de manera acumulativa y no lineal.

Uno de los sitios más severamente afectados por el disturbio crónico es la región conocida como Mixteca Alta, en el estado de Oaxaca. Esta zona es, además, sumamente diversa, tanto por el gran número de especies que cobija (Cruz-Cisneros y Rzedowski, 1980), como por la enorme variedad de paisajes que se encuentran (García Mendoza, 1983; Reyes, 1993). Estas características de la región fueron la motivación para desarrollar y aplicar el índice de integridad biológica y conocer la integridad y salud de los sistemas biológicos.

La aplicación del IBI nos permitirá conocer, ¿qué tan íntegras son las comunidades vegetales del Municipio de Concepción Buenavista, Oaxaca. En relación a los diferentes intensidades —y calidades— de disturbio antropogénico crónico?. Los objetivos de aplicar dicho IBI. son,

1. Buscar las características de los sistemas biológicos que son afectados por el disturbio crónico. ¿cuales han sido los cambios estructurales, de diversidad, de abundancia de las especies vegetales de las comunidades más estables de el lugar?
2. Comparar dichos patrones con los modelos propuestos en la literatura.
3. Buscar indicadores biológicos de perturbación en la comunidad vegetal (metrics) para crear el índice de integridad biológica.

El monitoreo del estado de las comunidades vegetales a través del IBI puede sentar las bases para promover y desarrollar planes encaminados a mitigar los daños ocasionados por las actividades humanas y preservar los invaluable recursos naturales de la región, así como al mejoramiento tanto ambiental como económico de la zona.

2.-DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El municipio de Concepción Buenavista se localiza en la región de la Mixteca Alta, en el estado de Oaxaca (Fig.2.1), a una latitud de 17° 52' y una longitud de 97° 23'. Abarca una zona de serranías con altitudes de entre los 1640 a los 2800 m rodeada de cerros pronunciados y en ocasiones escarpados (Fig.2.2). Esta región ha sido sometida a través de la historia a un alto grado de disturbio humano, pues existen evidencias antropológicas que permiten correlacionar las ocupaciones humanas con los eventos de erosión a través de la historia. Junto con la ganadería y la agricultura, la explotación de los recursos (obtención de seda, tinte y maderas) han sido históricamente los principales factores del grave deterioro ambiental que se observa a simple vista en la región (Rincón Mautner, 1999), donde se presentan desde afloramientos extensos de roca madre expuesta por la erosión, hasta verdaderos encinares maduros bien conservados.

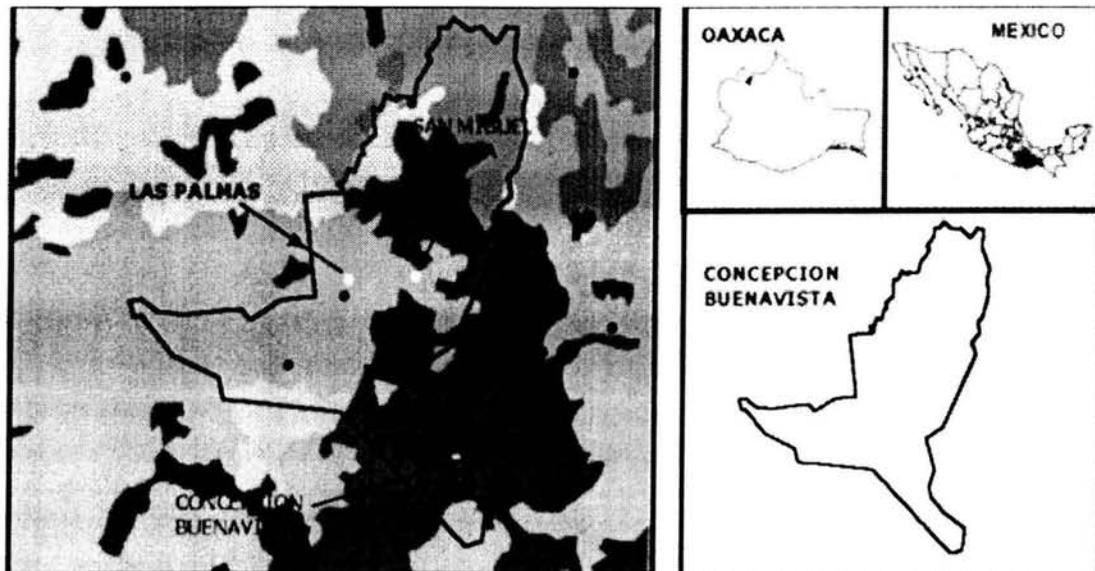


Figura 2.1 Mapa de localización de la región de la Mixteca Alta, Oaxaqueña.

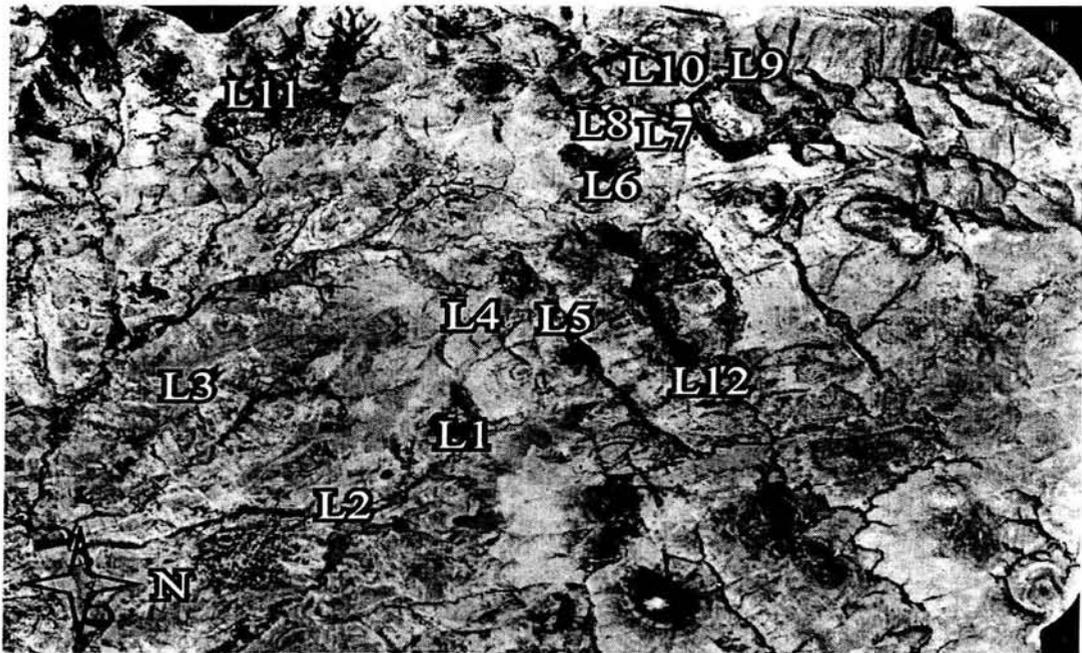


Figura 2.2 Fotografía aérea de la zona donde se localizan los 12 sitios de estudio. Se observa lo accidentado del terreno. Las zonas blancas de la fotografía son las de mayor grado de degradación ambiental y las zonas oscuras las que todavía conservan vegetación. INEGI. 2000. L1=La Pedrera; L2=La Hondura; L3=El cacalote; L4=La Peña agujerada; L5=Nacusenye; L6=La Cucharilla; L7=El Agua Blanca; L8=La Línea de Luz; L9=El Rincón de los Jazmines; L10=Rincón II; L11= La Cañada; L12=La Biznaga.

2.1 Geología

En la mayor parte de la región de estudio se observan principalmente tobas andesíticas, tobas silicificadas y tobas deleznales. La zona ha sufrido movimientos tectónicos y una muestra clara de ello es la formación de fallas donde hubo intrusión de las rocas ígneas, las cuales debido a su mayor resistencia a la erosión que las tobas que las rodean, sobresalen de forma llamativa y son nombradas por los habitantes “calles de piedra” (Cruz-Cisneros y Rzedowski, 1980).

2.2 Suelos

Los suelos son someros y pedregosos en la mayor parte del territorio; sus características están en íntima relación con la roca madre de la que derivan. La profundidad rara vez es superior a 70 cm y a veces no llega a 5 cm. No se observan horizontes edáficos. En las laderas y cañadas de los cerros cubiertos por bosques los suelos tienen una profundidad promedio de 30 a 50 cm, la textura es en general franca y el pH es ligeramente ácido debido a la roca de la cual derivan los suelos (Cruz-Cisneros y Rzedowski, 1980).

2.3 Clima

Para el presente estudio se dispuso de la información de las estaciones de Tepelmeme de Villa Morelos localizada 17° 52' de latitud y 97° 22' longitud, y a una altitud de 2060 m y de San Antonio Abad y de Tlacotepec Plumas se localizan 17°51' y 97°26' a una altitud de 2120 m únicas estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio con datos de más de 10 años continuos.

La temperatura media anual promedio de las tres estaciones es de 16° C. Las temperaturas máximas extremas que se registran son de 29.5° C y de 30° C, y las mínimas -7.7° C y de -0.5° C, respectivamente (figura 2.3)

La precipitación en general es escasa, con valores promedio por año de 450 a 550 mm anuales. El régimen de lluvias es de verano y las precipitaciones frecuentemente son torrenciales; anualmente se registran entre 80 y 100 días de lluvia apreciable (figura 2.3).

La evaporación potencial es muy fuerte en toda la zona. Durante el período de lluvias la evaporación disminuye notablemente, en parte por el aumento de la humedad atmosférica

y en parte porque en este período se reduce considerablemente la insolación. Las heladas son frecuentes y rigurosas, registrándose anualmente un promedio de 68 días con ese fenómeno.

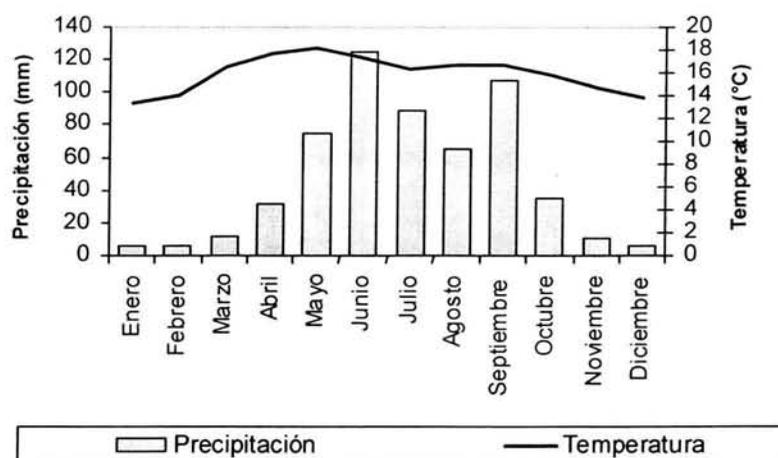


Figura 2.3. Diagrama ombrotermico resultado de los promedios de las tres estaciones cercanas a Concepción Buenavista, Oaxaca.

2.4 Vegetación

Debido a que la vegetación natural muestra una intensa perturbación, los límites naturales de las comunidades vegetales no siempre están bien definidos y con frecuencia se pasa imperceptiblemente de una comunidad a otra, así como también de terrenos con vegetación a lugares con roca madre al descubierto (Cruz-Cisneros y Rzedowski, 1980).

Para el presente trabajo, los sitios de estudio se ubicaron en zonas con evidencias de haber sido un bosque de *Quercus* como comunidad originaria. Entre éstas están la cercanía con bosque de *Quercus*, la presencia de especies afines y árboles remanentes, o bien la presencia de terrazas en ruinas que demuestran la existencia pretérita de suelos más profundos sobre las laderas. En todas ellas la altitud fue de más de 2100 m, para evitar la zona de selva baja que se encuentra cercana a las localidades de estudio. Otra evidencia

importante fueron los comentarios y relatos de los pobladores de la región, quienes confirman en algunos casos la existencia pasada de bosques. Las asociaciones vegetales encontradas en los sitios de estudio se presentan en la Tabla 2.1.

2.2.1 *Bosque de Quercus.*

Es una comunidad con un estrato arbóreo bien definido, el cual está formado por varias especies de *Quercus*, entre las que domina es *Q. crassifolia*. Se desarrolla en las partes altas de los cerros y en zonas poco accesibles, principalmente en su porción norte y oeste, en altitudes de 2250 a 2800 m. Se trata de un bosque bajo cuyos árboles no sobrepasan por lo general de 5 m de altura. En ocasiones este bosque crece sobre suelos relativamente profundos, pero también se encuentra en suelos someros; en cuyo caso los individuos arraigan entre las grietas de las rocas. Las pendientes son más bien fuertes, superiores a 10° de inclinación.

El bosque presenta una estratificación evidente. Existe un estrato rasante compuesto principalmente por *Tagetes*, *Bryum*, *Plantago*, *Euphorbia*, *Commelina* y plántulas de los componentes de los estratos superiores. El estrato herbáceo está formado, entre otras especies, por *Cheilanthes lendigera*, *C. pyramidata*, diversas Cariofiláceas, gramíneas y Cyperaceae como *Muhlenbergia rigida*, *M. emersleyi* y *Bulbostylis juncooides*. En el estrato arbustivo destacan las compuestas de los géneros *Eupatorium* y *Stevia*, además de otras especies como: *Salvia*, *Dodonea viscosa*, *Arctostaphylos pungens*, *Calliandra grandiflora*, entre otras (Cruz-Cisneros y Rzedowski, 1980).

2.2.2 Pastizales

La presencia de pastizales en la región está determinada por el clima, aunque otras veces son favorecidos por las condiciones del suelo o bien por el disturbio ocasionado por el hombre y sus animales domésticos. En este caso el sobrepastoreo y el pisoteo excesivo impiden muchas veces el buen desarrollo de la vegetación originaria y la reproducción de las especies más nutritivas y apetecidas por el ganado, lo que propicia el establecimiento de plantas que los animales no comen y que a menudo son venenosas (exóticas y riparias), reduciendo la cobertura vegetal y exponiendo al suelo a los efectos de la erosión. Existen dos variedades de pastizales, los de origen primario y los que son producidos por las actividades humanas (Rzedowski, 1978 y Cruz-Cisneros y Rzedowski, 1980). Este tipo de vegetación en la zona juega un papel económico importante al ser explotado por la ganadería menor. La mayoría de los pastizales parecen haber incrementado su extensión debido a factores antropogénico.

Tabla 2.1 Localización y descripción de los sitios de estudio

Localidad	Altitud (m s.n.m.)	Tipo de vegetación	Observaciones.
La Hondura	2120	Matorral secundario espinoso.	Zona cultivada, transito y erosión.
La Pedrera	2200	Bosque de <i>Quercus</i>	Bosque abierto.***
La Peña	2240	Vegetación escasa*	Roca madre
El Cacalote	2140	Pastizal secundario	Zona de cultivo
Nacusenye	2270	Pastizal de <i>Bouteloa</i>	**
La Biznaga	2180	Pastizal de <i>Bouteloa</i>	Erosión.
La Cucharilla	2340	Bosque de <i>Quercus</i>	Pocas actividades humanas y ganaderas
El Jazmín	2150	Bosque de <i>Quercus</i>	Vegetación de transición
Agua Blanca	2290	Pastizal secundario	Erosión , transito.
La línea de luz	2290	Vegetación escasa*	Roca madre
La cañada	2280	Bosque de <i>Quercus</i>	Pocas actividades humanas y ganaderas.
El Rincón 2	2300	Bosque de <i>Quercus</i>	Pocas actividades humanas y ganaderas

Roca madre.= Superficie totalmente modificada por actividades humanas y acción de la erosión. Zona de cultivo Localidad con evidencias recientes de ocupación agrícola. * La vegetación remanente es tan escasa que es difícil clasificarla. ** Con evidencias de cultivo en el pasado. *** Bosque con espacios abiertos debido a las actividades humanas. La localización de los sitios de estudio se muestran en la figura 2.2.

2.5 Influencia del hombre

Un estudio reciente sobre la historia ambiental de la Mixteca Alta relaciona varios eventos de erosión de suelos con las ocupaciones humanas en la región. Es evidente que hubo un cambio en el régimen de humedad de los valles, el cual posiblemente está relacionado con un cambio en el clima. Después de un óptimo húmedo correspondiente al Período Formativo o Preclásico (6000 a.C. a 200 a.C.), parece que hubo una tendencia hacia una mayor sequía en los valles de esta región montañosa. La población del período Clásico (200 a.C. al 850 a.C.) parece haberse adaptado a estas condiciones de reducida humedad, modificando sus actividades agrícolas mediante la construcción de terrazas en los drenajes naturales. Al mismo tiempo, es probable que se haya desarrollado allí la variedad de maíz de humedad residual, mejor conocido como maíz "cajete", que se siembra en los terrenos relativamente húmedos llamados "de jugo". Las evidencias antropológicas de Rincón Mautner (1999), parecen indicar que durante el período Clásico la erosión de suelos llegó a niveles altos, debido en parte a que se presentaron condiciones de mayor sequía, pero también a la práctica de actividades agrícolas en aumento. Es probable que hacia finales de este período la zona se haya despoblado. Durante el período Postclásico (850 a.C. a 1521 d.C.) los niveles de erosión parecen haber disminuido en forma significativa (Rincón Mautner, 1999).

Estos datos, junto con los proporcionados por Dahlgren de Jordan (1966), sugieren que la Mixteca fue en tiempos previos a la Conquista un área densamente poblada, lo que obligó a los habitantes a usar terrenos no propicios para la agricultura, habilitados a base de terrazas establecidas siguiendo la curva de nivel. Algunas todavía se pueden observar a pesar de que la mayoría ha dejado de cumplir su función. Después de la conquista de esta región por los

españoles, disminuyó el tamaño poblacional en la zona debido a las altísimas mortalidades por epidemias junto con la demanda de esclavos por los caciques españoles, las cuales contribuyeron a un nuevo evento de erosión, ya que el tipo de actividad agrícola utilizado en esta época (tierras agrícolas de "jugo") requería de una alta demanda de mano de obra para su mantenimiento. Consecuentemente, la agricultura intensiva perdió sustentabilidad y todas las obras de ingeniería se derrumbaron, lo que permitió el libre paso de los afluentes de las lluvias torrenciales, que arrastraron a su paso el suelo de toda la zona. Junto con el sobrepastoreo, esto dio origen al mayor evento de erosión de la historia de la región, que resultó en una desecación generalizada de la zona y al paisaje de cárcavas y "tepetate" que se observa hoy al atravesarla (Dahlgren De Jordan 1966 ; Cook y Borah, 1978; Cruz-Cisneros y Rzedowski, 1980; García Barrios y García Barrios 1990; Rincón Mautner, 1999).

4.5.1 *El sobrepastoreo*

En 1560, con la introducción de la ganadería por los españoles, las tierras a explotar pasaron de agrícolas a agropecuarias, aumentando los límites de estas últimas ya que el ganado, principalmente menor (caprino), presenta características que hacen fácil su manutención pues ellos mismos buscan su alimento y agua, y están adaptados a las tierras agrestes, lo cual les permite moverse en tierras de cultivo, yermos y montes. Debido a la obtención de varios productos y beneficios a partir del ganado caprino, las comunidades humanas aumentaron la explotación de este tipo de ganado, lo cual contribuiría a dañar el medio físico pues se talaron los bosques para habilitar zonas de pastizales (Dahlgren De Jordan 1966 y García, 1996)

Con la entrada de la ganadería menor a la Mixteca Alta se introdujo un nuevo tipo de actividad económica que representó otra forma de obtener ingresos a bajos costos. La obtención de beneficios directos del ganado como piel, leche, quesos y carne, permitió que se difundiera como una actividad muy rentable aumentando las mercedes de estancias para criar ganado caprino (Dahlgren De Jordan 1966). Estas actividades modificaron la vegetación, que sufrió cambios tanto en su estructura como en su composición florística lo que permitió el incremento de la presencia de especies arvenses y ruderales, al igual que el establecimiento de pastizales que son más rentables para el ganado caprino por sus características de adaptación y sus pocos requerimientos alimenticios y de suministro de agua (García, 1996).

En la actualidad, la agricultura está limitada a las tierras planas y las vegas de los ríos y arroyos. La actividad fundamental es la ganadería, la cual está compuesta básicamente de ganado caprino del más bajo rendimiento. La producción ganadera es raquítica y esta mal organizada; no contribuye significativamente a la economía de la población, empobrece la vegetación y los suelos e impide por completo toda tendencia hacia la recuperación de la salud ecológica de las comunidades (Cruz-Cisneros y Rzedowski, 1980).

Como consecuencia de las actividades del hombre, gran parte de la vegetación natural muestra altos grados de perturbación. El bosque de encino, que anteriormente se distribuía más ampliamente, ha sido deteriorado de manera notable y se ha reducido su distribución a zonas inaccesibles o remotas, posiblemente debido al alto impacto que tiene la ganadería, la tala y la mala administración que se ha hecho de los recursos del bosque (Cruz-Cisneros y Rzedowski, 1980).

3. METODOLOGÍA

Para realizar este estudio se establecieron 12 sitios de muestreo, cada una con una superficie aproximada de una hectárea y todas ellas ubicadas a una altitud superior a los 2100 m, con el propósito de evitar las zonas de selva baja caducifolia, que se establece por debajo de dicha altitud. Se ubicaron los sitios a lo largo de un gradiente de disturbio con la finalidad de examinar el efecto de las actividades humanas y las modificaciones ocurridas en la estructura y composición de las comunidades vegetales. En cada sitio se realizó un análisis de la estructura, la cobertura, la dominancia y la composición florística. Los datos fueron tomados de julio de 2001 a julio de 2002.

En cada sitio se ubicaron seis transectos al azar, con una longitud de 50×2 m para arbustos y de 50×12 m para árboles, abarcando una superficie de 600 m^2 y de 3600 m^2 , respectivamente. En cada transecto se efectuó el conteo directo de los individuos de la comunidad vegetal por especie, considerando como árboles aquellos individuos con más de 5 cm de diámetro a la altura del pecho y más de 2 cm en la corona (parte de la planta donde se unen el tallo y la raíz) para la categoría de arbustos. Con lo que respecta a las hierbas, se utilizaron cuadros al azar, con un área de 1 m^2 cada uno, subdivididos en cuadros de 10×10 cm. Para determinar el número de cuadros a revisar para cada localidad, se utilizó una curva de acumulación de especies, obteniéndose que con 16 cuadros y 20 cuadritos por sitio era el esfuerzo necesario para incluir la mayoría de las especies presentes en cada localidad.

3.1. Medición del disturbio

Se utilizó un índice para la medición de la intensidad de disturbio desarrollado por Martorell y Peters (2000) basado en varios indicadores de actividades humanas (agricultura, urbanización, extracción de recursos), ganaderas y de degradación ambiental (erosión atribuible al hombre). Estos indicadores fueron resumidos mediante un análisis de componentes principales en una fórmula, la cual se aplicó en el presente trabajo tal como se reporta en la fuente original. El índice tiene una escala arbitraria de 0 a 100 o más, dependiendo de la presión antrópica a la que está sujeta cada localidad, siendo 0 el valor asignado a una zona sin disturbio y 100 o más a una totalmente modificada y con una alta presión humana. En el presente estudio, los indicadores de disturbio necesarios para el cálculo del índice fueron obtenidos de la revisión a lo largo de los mismos transectos empleados para determinar la diversidad, la abundancia y la cobertura de las especies leñosa.

3.2 Índice de Integridad Biológica.

Se incluyeron indicadores biológicos que habían sido reportados en trabajos anteriores como susceptibles al disturbio (tabla 3.1), además de algunos derivados de observaciones directas en los sitios de estudio (pastos amacollados, *Arctostaphylos pungens*). Cada uno de estos indicadores fue analizado en el programa estadístico GLIM 4.0 (Crawley, 1996) para corroborar que fueran afectados por el disturbio antropogénico. El análisis se llevó a cabo mediante modelos lineales generalizados considerando que los datos de conteos y proporciones no tienen una distribución normal en el error, sino que éste es de tipo Poisson y binomial respectivamente, por lo que analizar todos los datos mediante ANOVA hubiera

sido incorrecto. Dentro de la familia de los modelos lineales generalizados, se denomina análisis log-lineal a aquel relacionado con variables con distribución Poisson, análisis logístico al que involucra errores binomiales, y análisis de varianza al que supone una distribución normal de los datos (Crawley, 1996)

Se hizo mayor énfasis en la búsqueda de patrones cuadráticos ya que permiten seguir el deterioro de la zona después de que los patrones lineales desaparecen del sistema a intensidades altas de perturbación. Estos últimos son los que se utilizan frecuentemente para medir la integridad y salud de los sistemas biológicos.

Los indicadores que fueron afectados significativamente por el disturbio pasaron a formar parte del conjunto de indicadores que se incluyeron para la formulación del índice de integridad biológica (IBI). Para resumir toda la información en un índice único, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con la matriz de indicadores biológicos, en el programa estadístico SPSS 9.0. Posteriormente, los valores de integridad de cada sitio fueron correlacionados con las intensidades de diferentes formas de disturbio antropogénico, para determinar el aporte y los efectos de estas diferentes formas sobre la comunidad vegetal.

Indicadores biológicos	Tipo de datos	Referencia
Composición de la comunidad		
Riqueza de Leguminosas	Conteo	Milchunas <i>et al</i> , 2000
Riqueza de Asteraceas	Conteo	Milchunas <i>et al</i> , 2000
Riqueza de Árboles	Conteo	Peltzer <i>et al</i> , 2000
Riqueza de Arbustos	Conteo	Peltzer <i>et al</i> , 2000
Riqueza de Hierbas	Conteo	Lavorel <i>et al</i> , 1997
Riqueza de Suculentas.	Conteo	Observaciones directas
Riqueza de Helechos.	Conteo	Observaciones directas
Riqueza de Gramíneas	Conteo	
Composición por grupos taxonomicos.		
% de la serie Eupatoriae con respecto al total de compuestas	Fracción	
Pasto clonal	Fracción.	Lavorel <i>et al</i> , 1997
Pasto amacollado	Fracción.	Observaciones directas
Índices de Diversidad de Simpson y Shannon		
D Herbáceas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
E Herbáceas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
H' Herbáceas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
J Herbáceas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
D Leñosas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
E Leñosas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
H' Leñosas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
J Leñosas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
S Herbáceas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
S Leñosas	Continuo	Karr <i>et al</i> , 1986
Correlación con modelos de abundancia.		
Correlación Geometrica de las Hierbas	Continuo	Hill y Hammer, 1998
Correlación Logistica de las Hierbas	Continuo	Hill y Hammer, 1998
Correlación Vara partida de las Hierbas	Continuo	Hill y Hammer, 1998
Correlación Geometrica de las especies leñosas	Continuo	Hill y Hammer, 1998
Correlación Lognormal de las especies leñosas	Continuo	Hill y Hammer, 1998
Correlación Vara partida de las especies leñosas	Continuo	Hill y Hammer, 1998
Cobertura de especies por localidad.		
Cobertura Árboles	Fracción.	Peltzer <i>et al</i> , 2000
Cobertura Arbustos	Fracción.	Peltzer <i>et al</i> , 2000
Cobertura Herbáceas	Fracción.	Milchunas <i>et al</i> , 2000
Especies indicadoras		
<i>Muhlenbergia pusilla</i>	Fracción.	Observaciones directas
<i>Arctostaphylos pungens</i>	Fracción.	Observaciones directas

Tabla 3.1 Indicadores biológicos de la comunidad vegetal que serán analizados y propuestos para formar parte de IBI.

4. RESULTADOS.

En los doce sitios, las familias botánicas mejor representadas fueron: Asteraceae, Poaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae, Cactaceae, Commelinaceae, Crassulaceae, Lamiaceae, Caryophyllaceae, Plantaginaceae, Convolvulaceae, Liliaceae, Scrophulariaceae, Fagaceae, Ericaceae, Cyperaceae, Bromeliaceae, Amaryllidaceae, Rubiaceae y Cucurbitaceae entre otras familias presentes en la región.

En los sitios de estudio se encontraron en total más de 220 de especies, donde destacan los pastos y las hierbas con una alta riqueza en la zona de pastizal secundario, así como las especies de árboles y arbustos en los bosques. En esta zona existe un alto grado de endemismo de especies de la familia Cactaceae y Crassulaceae principalmente de los géneros *Mammillaria*, *Echeveria* y *Sedum* (García Mendoza, 1983).

La región muestra una marcada degradación ambiental. Prueba de ello es la severa modificación de los paisajes, donde se observan desde afloramientos de roca madre, pastizales secundarios, algunas etapas de sucesión a bosque de *Quercus* hasta encinares maduros (apéndice I). Con respecto al grado de disturbio, el recambio espacial de especies y la estructura de la comunidad vegetal se ven afectadas de manera evidente.

4.1. Medición de Disturbio

Se observó un gradiente de actividades humanas (tabla 4.1), con una amplia variación en los valores del índice de disturbio, que abarca desde sitios relativamente conservados hasta lugares con una alta proporción de roca madre al descubierto. La percepción a “ojo” del disturbio coincide con el grado de deterioro indicado por el índice.

La localidad con menos actividades humanas fue El Rincón 2, con 14.93 puntos de disturbio, por lo que tomamos como referencia a esta localidad como el sitio mejor conservado de la zona de estudio. Le siguen La Cañada, El Jazmín y La Cucharilla. Las demás localidades presentaron evidencias claras de disturbio antropogénico, principalmente de actividades ganaderas (sobrepastoreo), y de actividades agrícolas tanto recientes como del pasado, al igual que de tránsito intenso (ganadero – humano). En el caso de La Luz y La Peña, que son sitios con suelo y vegetación casi inexistentes, se reportan como los sitios más perturbados debido al alto grado de degradación ambiental, junto con La Hondura, que es la localidad con más exposición al disturbio antropogénico (121.07), por su cercanía a la población de Concepción Buenavista, y al intenso tránsito ganadero y vehicular que se presenta en ella (tabla 4.1).

Localidad.	Disturbio	%Tipo de presión		
		humano	ganado	degradación del medio abiótico
El Rincón 2	14.93	65.91	32.15	1.93
La Cañada	20.37	71.04	21.16	7.78
El Jazmín	27.7	3.531	21.63	2.63
La Cucharilla	29.42	31.78	68.22	0
La Pedrera	39.17	32.81	66.61	0.57
Agua Blanca	36.69	15.51	70.78	13.68
Nacusenye	40.27	21.18	47.95	30.87
La Biznaga	55.47	15.07	48.91	36.00
El Cacalote	63.24	46.65	42.35	11.99
La Peña	98.27	7.78	28.93	63.27
La Luz	120.56	21.50	22.64	55.85
La Hondura	121.07	40.56	22.28	37.17

Tabla 4.1 Índice de disturbio instantáneo por localidad y aporte de los diferentes formas de perturbación

4.1.2 Indicadores de integridad

Los resultados obtenidos del ajuste a los modelos lineales generalizados permiten identificar cuáles indicadores biológicos son afectados por la intensidad de disturbio

antropogénico en la comunidad vegetal, y que consecuentemente son adecuados para la obtención del IBI de cada sitio de estudio. Los indicadores que no fueron significativos no se contemplaron en los análisis posteriores (tabla 4.2).

Patrones Biológicos	R²	Tipo de relación	P
Riqueza de árboles	68%	Lineal	<0.0001
Riqueza de arbustos	64%	Lineal	0.0195
Cobertura de árboles	82%	Lineal	<0.0001
Riqueza de helechos	39%	Lineal	0.0002
Riqueza de pastos amacollados	39%	Lineal	0.0380
Diversidad de leñosas (Simpson).	54%	Lineal	0.0170
Cobertura de hierbas	35%	Cuadrática	0.0321
Riqueza de leguminosas	28%	Cuadrática	0.0301
Riqueza de Suculentas	26%	Cuadrática	0.0154
Riqueza de Hierbas	38%	Cuadrática	0.0175
Equitatividad de hierbas (Shannon)	77%	Cuadrática	0.0004

Tabla 4.2 Resultado del análisis a través de GLIM 4.03 para obtener a los indicadores que formaran parte del IBI. Se observa que la Cobertura y Riqueza de árboles muestran una mayor respuesta al disturbio, junto con la Equitatividad de hierbas. P = Significancia de la prueba de ajuste.

Los mejores indicadores de integridad para esta zona resultaron ser la riqueza y la cobertura de especies arbóreas, la riqueza de helechos, de pastos amacollados, de arbustos y el índice de diversidad de Simpson para las especies leñosas (tabla 4.2). La riqueza de árboles ($R^2 = 68\%$) junto con la cobertura ($R^2 = 81.82\%$), son los mejores indicadores de integridad biológica, pues su elevada correlación con el disturbio los hace los mejores descriptores de lo que ocurre en el sistema (Ver Apéndice II). La riqueza y la cobertura de árboles no permiten predecir la integridad a partir de los 60 puntos de disturbio antropogénico, debido a que desaparecen del sistema por su alta sensibilidad. La riqueza de helechos es modificada por el disturbio; a los 60 puntos de disturbio se vuelve imposible medir la integridad con estos indicadores en sitios con mayor intensidad de disturbio. Con respecto a los pastos amacollados se observa un mismo comportamiento a partir de los 55 puntos de disturbio ya no permite medir la integridad biológica de localidades que sobrepasen tal valor. Estos indicadores muestran

una tendencia a la reducción conforme aumenta la intensidad del disturbio antropogénico (figuras 4.1 y 4.2).

Los indicadores relacionados con las hierbas, las leguminosas y las suculentas presentaron un comportamiento convexo con respecto a la intensidad de disturbio crónico (figura 4.3). A bajos niveles de disturbio antropogénico los valores de los indicadores con forma cuadrática muestran una tendencia al aumento, pero a partir de una intensidad intermedia de disturbio, con posteriores incrementos provoca una reducción (figura 4.3). Estos indicadores siguen variando una vez que los patrones lineales dejan de responder al disturbio tras haber adquirido sus valores mínimos posibles. Por ejemplo, una vez que la cobertura arbórea desaparece del sistema, este indicador es incapaz de hacer notar nuevos cambios en la comunidad biológica; en cambio, la riqueza de hierbas sigue respondiendo al disturbio hasta que el sitio queda denudado.

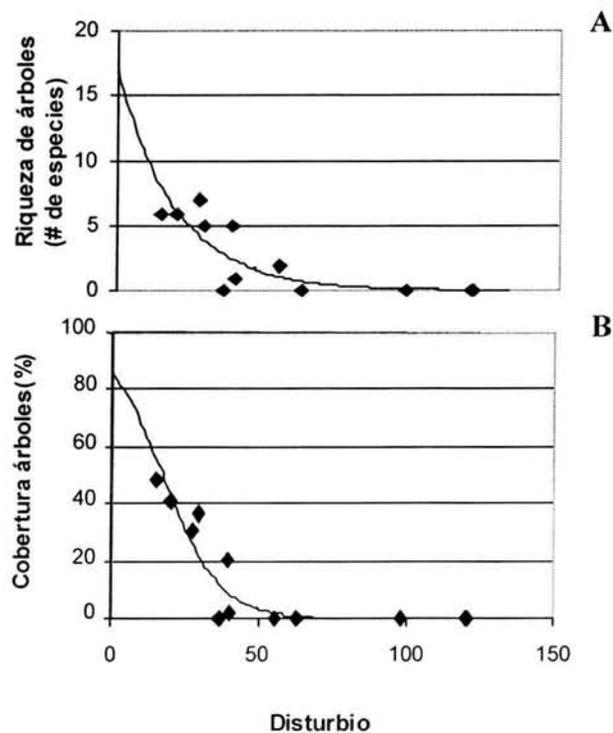


Figura 4.1. Comportamiento de la Riqueza (A) y la Cobertura (B) de especies arbóreas con respecto a la intensidad de disturbio antropogénico

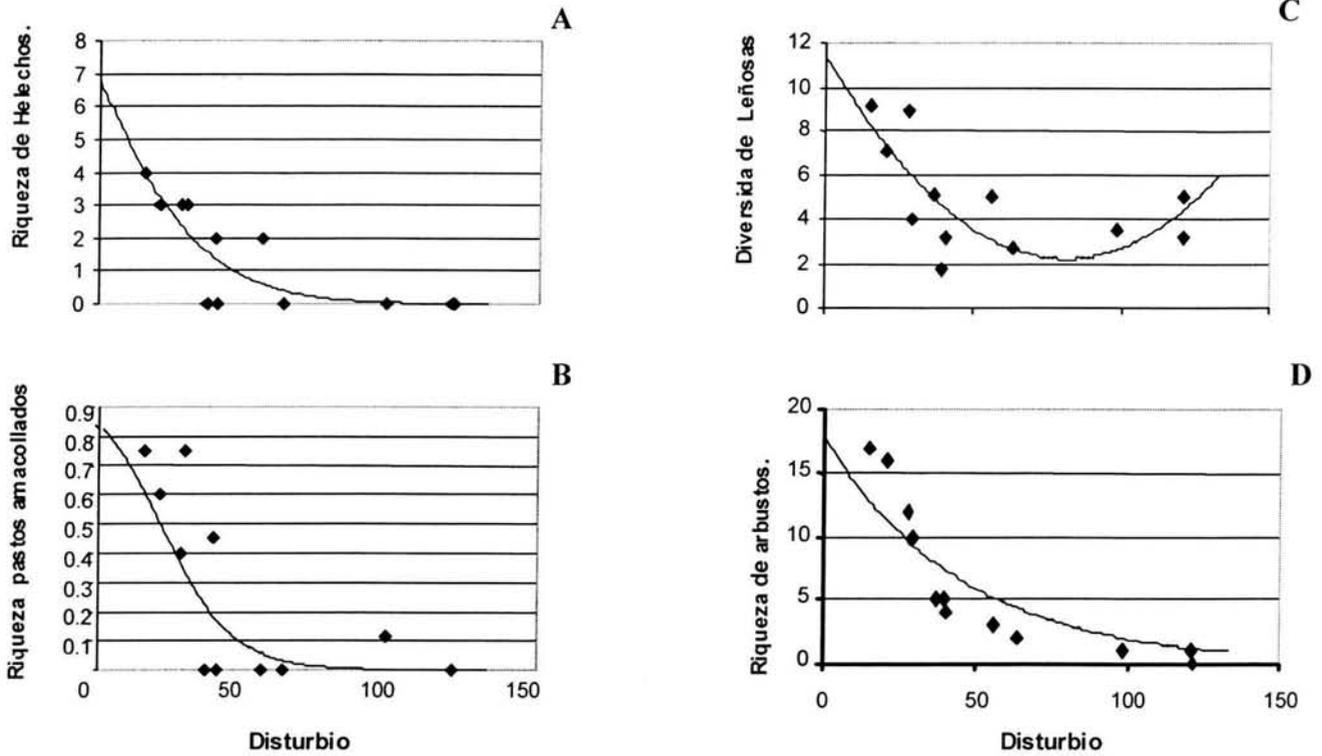


Figura 4.2. Efecto de la intensidad del disturbio antropogénico sobre los patrones biológicos que presentan una forma monótona. La figura (A) muestra la respuesta de la (R de helechos) a la intensidad de disturbio, el modelo ajustado arroja una $R^2 = 39\%$, La riqueza de pastos amacollados (B) del análisis con respecto a la calidad e intensidad de disturbio antropogénico, se encontró que ajustando al Modelo Logístico obtenemos un $R^2 = 39.50\%$ que puede explicar el modelo. La grafica (C) muestra el efecto del disturbio sobre la diversidad de leñosas, que fue medido a través del Índice de Simpson. Del análisis con ANOVA, se obtuvo una $R^2 = 54.30\%$. (D). Del análisis de la riqueza de arbustos arroja una $R^2 = 64\%$. Tabla de resultados de los análisis A,B,C,D, ver Apéndice II. (Tablas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8).

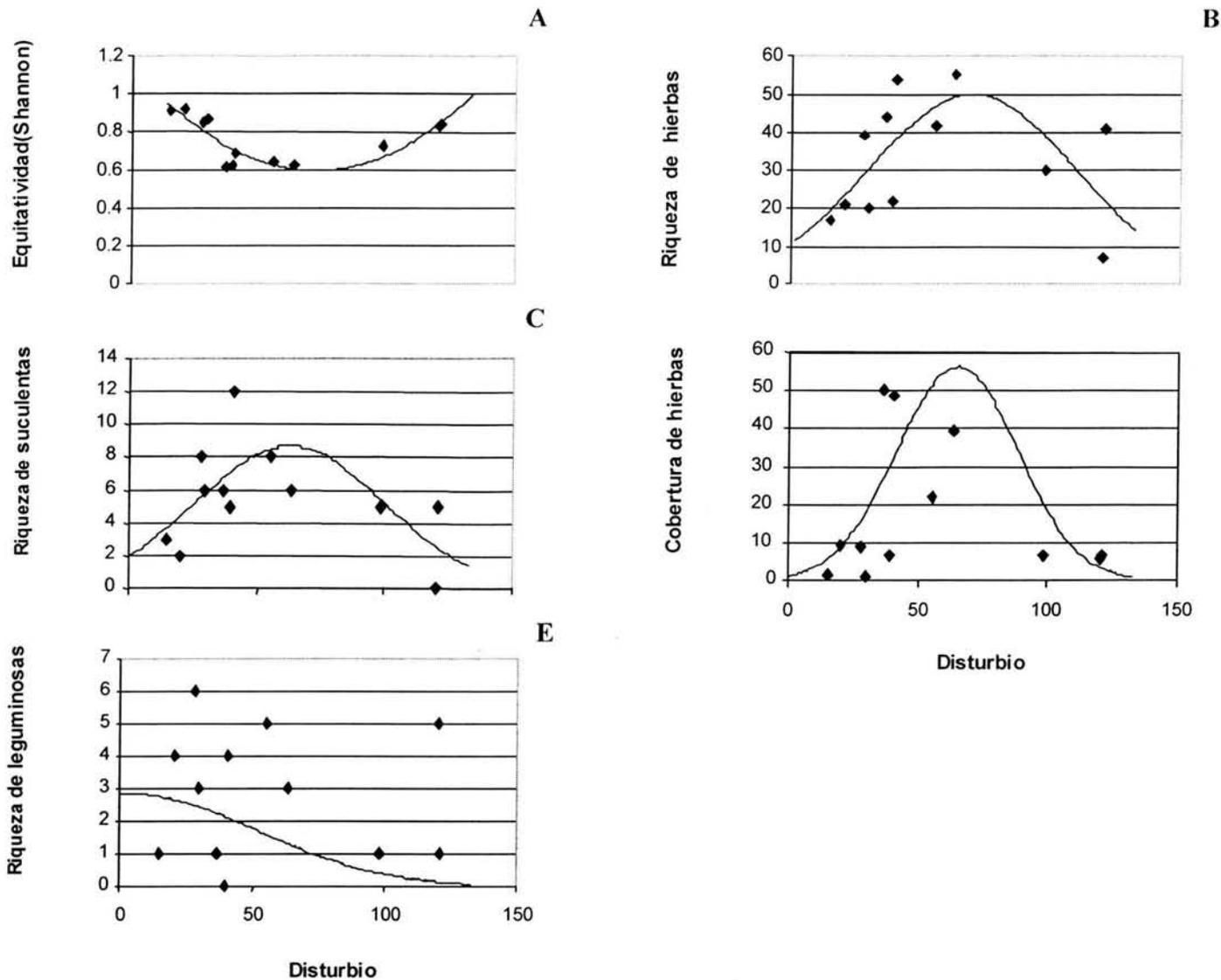


Figura 4.3. La equitatividad de hierbas (A) se ve afectada con la intensidad del disturbio, de acuerdo a los resultados del ajuste al Modelo Logístico, se obtiene una $R^2=77\%$ el cual es de los valores más altos. La riqueza de especies de hierbas, de acuerdo al análisis (B). Los resultados del ajuste al Modelo Log-Lineal se muestran en la tabla 4.9 (ver apéndice), la $R^2= 38.32\%$ por lo que es un buen indicador de integridad y disturbio de las comunidades vegetales. Efecto de la intensidad de disturbio antropogénico sobre la riqueza de especies suculentas, resultando ser un eficiente indicador de perturbación de la comunidad vegetal. Se observa un comportamiento cuadrático a lo largo del gradiente.(C) La cobertura de hierbas presenta una $R^2= 35\%$ y (D). La riqueza de leguminosas muestra una $R^2=28\%$ Tabla de resultados de los análisis de los ajustes para las figuras vea apéndice II.(Tablas 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13).

4.3. Índice de Integridad Biológica (IBI).

Una vez establecidos los patrones sensibles a las intensidades de disturbio antropogénico (tabla 4.2), se obtuvieron con base en el análisis de componentes principales (ACP) los valores de las proyección sobre lo ejes, generando así, un índice que incluía a los indicadores lineales y cuadráticos. El análisis de componentes principales (ACP) aplicado a todos los indicadores simultáneamente colocó en el mismo extremo del primer eje a los sitios mejor y peor conservados. Esto no es deseable, puesto que sitios muy contrastantes recibirían el mismo valor de integridad en el IBI. Dado que este resultado puede ser consecuencia de la incorporación en un comportamiento cuadrático y lineal en el mismo análisis, se optó por realizar dos ACP, cada uno de ellos con un solo tipo de indicador (IBI'_1 e IBI'_2).

4.3.1 *El IBI'_1*

Para generar los valores de este índice de integridad, se tomaron únicamente aquellos indicadores sensibles al disturbio antropogénico que mostraron un patrón lineal, ya que estos son los que están fuertemente correlacionados con la integridad (Karr *et al*, 1986). El IBI'_1 mantiene valores constantes entre -0.5 y -1 , una vez que cruza el eje de las X (figura 4.4). Esto significa que cuando el índice adquiere un valor de cero responde muy poco a subsecuentes perturbaciones, y por lo tanto es necesario emplear nuevos criterios para evaluar la integridad.

4.3.2 *El IBI'_2*

Los nuevos criterios para medir la integridad una vez que los indicadores lineales dejan de responder, son los indicadores con comportamiento cuadrático. Esto se logra sumando el IBI'_2 , siempre que el IBI'_1 arroje resultados negativos. Esto garantiza que

sólo se usen valores del IBI'_2 correspondientes a la porción derecha desde el punto de inflexión de la curva (figura 6.4), lo que evita ambigüedad ya que de lo contrario un dato con un bajo IBI'_2 que correspondería tanto a valores de perturbación bajos o altos.

4.3.3. *El IBI'*

La suma de ambos IBIs resulta en un índice de integridad biológica modificado (IBI'), el cual integra los indicadores que presentan un comportamiento cuadrático y lineal que se localizaron a lo largo del gradiente de intensidad de las actividades humanas en estos sistemas biológicos (tabla 4.14).

Localidad	IBI'
Rincon2	1.456
Cañada	0.9221
La Cucharilla	0.8265
La Pedrera	0.5113
Nacusenye	0.4647
La Biznaga	-0.086
Agua blanca	-0.272
El Cacalote	-0.378
La Hondura	-1.153
La Peña	-1.349
La Luz	-2.597
Valor crítico	64

Tabla 4.14 Índice de Integridad Biológica IBI' para cada localidad, resultado de la suma del IBI'_1 y IBI'_2 . Conjunta los resultados de los PCAs tanto los indicadores lineales como de los cuadráticos.

4.3.4. *¿Cuándo sumar el IBI'_2 ?*

Los patrones lineales presentaron deficiencias, por lo que el IBI'_1 no detectó cambios significativos por arriba de 64 puntos de disturbio; por lo tanto, fue necesario sumar los indicadores cuadráticos, con el fin de poder registrar los cambios del sistema por arriba del valor crítico (figura 4.4). La regla de decisión para corregir los valores del IBI'_1 son

Si IBI'_1 tiene valores positivos entonces no sumar.

Si IBI'_1 tiene valores negativos entonces corregir con IBI'_2 .

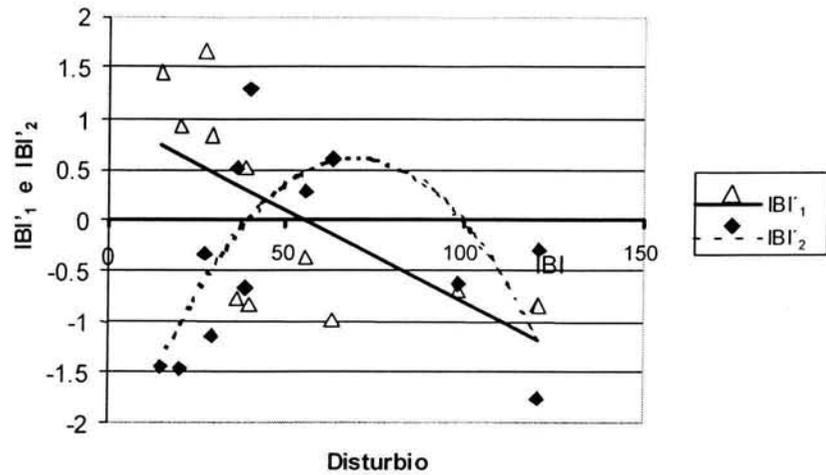


Figura 4.4. Representación del valor crítico para la corrección del IBI'_1 por el IBI'_2 . Nótese que el valor crítico es el punto de inflexión. De esta manera se obtiene la correspondencia unívoca de cada dato de perturbación y su correspondiente valor de integridad.

Los resultados del IBI' (tabla 4.14), fueron correlacionados con el resultado del disturbio por localidad (figura 4.5), donde se observa una alta correlación con una $R^2=93\%$.

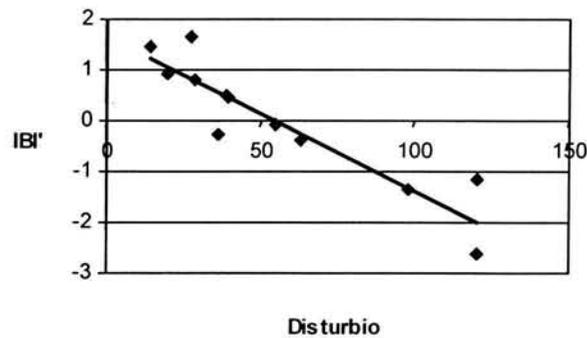


Figura 4.5. Correlación entre Índices de disturbio e integridad.

4.4. El IBIt.

Para una mejor comprensión de los resultados del IBI' , fue necesario estandarizar sus valores entre de 0-100. (Apéndice III), resultando el IBIt. Los resultados del índice por localidad muestran el efecto del disturbio antropogénico sobre la condición de la vegetación, sujeta a diversas intensidades y frecuencias de disturbio. La localidad El

Rincón 2 presentó el valor más bajo de intensidad de disturbio antropogénico, con una integridad de 100%, por lo que se utilizó como referencia (baseline), según la metodología de Karr *et al* (1986), aunque la integridad más alta la obtuvo la localidad El Jazmín (105.3), donde se da una mayor intensidad de perturbación debido a la alta riqueza de especies de árboles exclusivos de este sitio, los cuales eran afines a sitios de selva baja que no corresponden a la vegetación con la que se está contrastando. Para la creación de la escala de 0-100 se tomó El Rincón 2 como parámetro de comparación (tabla 4.15).

Una vez estandarizados los resultados del IBIt se obtuvieron las fórmulas generales a partir de los valores de las proyección sobre la recta que se integraron en la formulación de las ecuaciones 1 y 2 para su aplicación directa, y así de esta manera obtener los resultados estandarizados de la integridad. Las formulas obedecen a la misma regla de decisión de la suma de IBI'_{2} .

Localidad	IBIt
Rincon2	100**
Cañada	86.85
La Cucharilla	84.479
La Pedrera	76.709
Nacusenye	75.559
La Biznaga	61.979
Agua blanca	57.382
El Cacalote	54.759
La Hondura	35.651
La Peña	30.836
La Luz	0.0523

Tabla 4.15. Índice de integridad estandarizado para cada localidad (IBIt) para cada localidad, expresado en una escala entre 0 y 100 para su mejor comprensión.** Se tomo como base de la escala el valor del IBI 100 a el sitio más conservado que corresponde ael Rincón 2. No se incluye al El Jazmín debido a que es otro tipo de vegetación.

4.4.1 Formulas generales

IBI₁

$$1.898 * S \text{ \u00e1rboles} + 0.366 * S \text{ arbustos} + 3.357 * S \text{ helechos} + 2.582 * S \text{ amacolladas} + 1.622 * D \text{ le\u00f1osas} + 13.64 \text{ Cobertura de \u00e1rboles} + 33.187. \quad (1)$$

IBI₂

$$2.0466 * S \text{ leguminosas} + 2.1057 * S \text{ suculentas} - 46.6411 * J \text{ hierbas} + 0.4429 * S \text{ hierbas} + 16.8861 \text{ Cobertura de Hierbas} - 9.788. \quad (2)$$

Formulas generales para la obtenci\u00f3n de los valores de integridad. Los resultados se obtienen directamente estandarizados (0-100), Donde S = n\u00famero de especies, en ambos casos. D le\u00f1osas = \u00cdndice de diversidad de Simpson de le\u00f1osas. J hierbas = Equitatividad de hierbas de Shannon.

4.5. Tipos de disturbio antropog\u00e9nico

Para obtener los aportes y el efecto de cada tipo de disturbio antropog\u00e9nico en la integridad de cada localidad, el \u00cdndice de disturbio se desglos\u00f3 en sus tres formas de disturbio antropog\u00e9nico, los cuales correlacionamos con el IBI. Como resultado se obtuvo una $R^2 = 0.704$ para la ganader\u00eda, $R^2 = 0.4754$ para las actividades humanas, y para la degradaci\u00f3n una $R^2 = 0.906$ (figura 4.6). Es notoria la no linealidad de los tipos de disturbio con respecto a la integridad del sistema. El efecto de la ganader\u00eda sobre la integridad result\u00f3 ser imperceptible a niveles bajos de disturbio, pero al sobrepasar el umbral marcado entre los 20-25 puntos de intensidad el sistema, sufre un colapso, ya que las actividades humanas y la degradaci\u00f3n presentan un comportamiento m\u00e1s lineal con respecto a la integridad biol\u00f3gica del sistema.

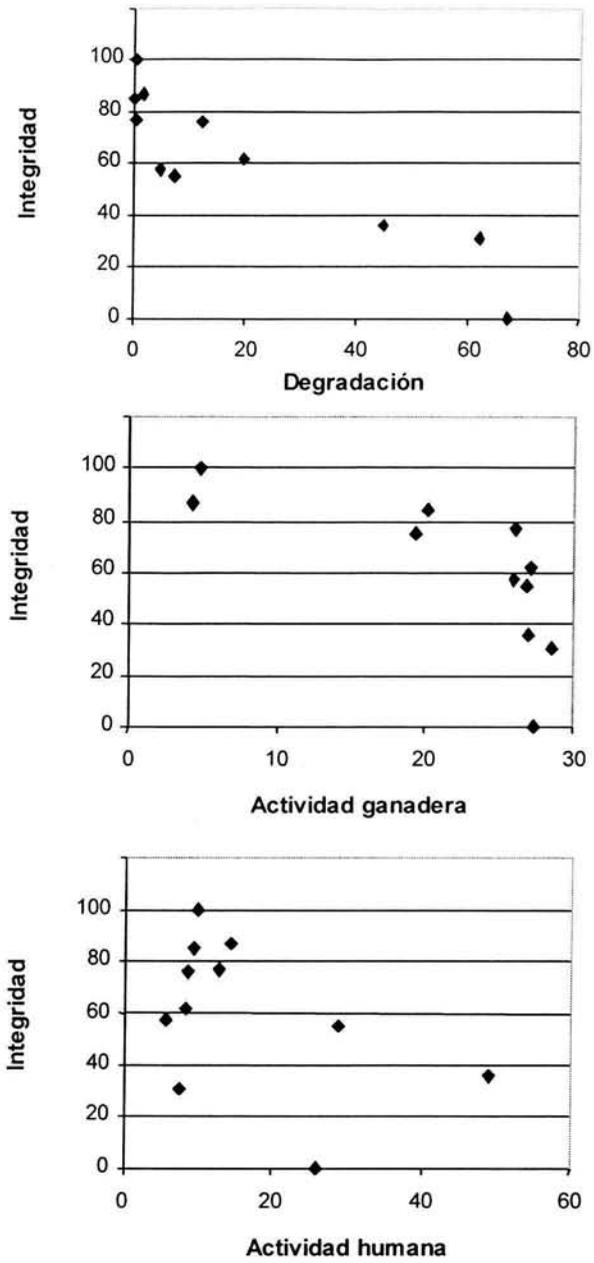


Figura. 4.6. Efecto de las intensidades de los diferentes tipos de disturbio sobre la integridad biológica de la comunidad vegetal de Concepción Buenavista

5. DISCUSIÓN

Es evidente la intensa perturbación de los sistemas biológicos en la zona originada por las actividades humanas, iniciadas desde tiempos inmemoriales y permaneciendo hasta la actualidad. Estas actividades son las causantes del acelerado avance de la degradación ambiental, que además se encuentra favorecida por la naturaleza deleznable del sustrato geológico, algunas características del clima (lluvias torrenciales y sequías intensas), y el tipo de vegetación reinante (especies longevas y de crecimiento lento, Cruz-Cisneros y Rzedowski 1980). La pausada regeneración hace que el efecto de los disturbios sea observable durante períodos más largos (Wiens, 1985).

5.1. Índice instantáneo de disturbio.

Se observa claramente un gradiente continuo de degradación ambiental ocasionado por las actividades humanas, el cual se manifiesta por la presencia desde sitios totalmente erosionados donde prevalece la roca madre al descubierto, hasta pastizales, bosques abiertos y verdaderos bosques maduros.

El gradiente observado nos indica el tipo e intensidad de incidencia de las actividades (ganadera-humana), y su influencia en la degradación ambiental. Para el caso de los sitios con mayor intensidad de disturbio, se encontró que los indicadores que más contribuyen al valor del índice de disturbio son la adyacencia o cercanía de poblaciones, el cambio de uso de suelo, la densidad de excretas de cabra y la cantidad de caminos humanos. Todos estos factores afectan de manera directa la susceptibilidad a la erosión y la cantidad de superficie totalmente modificada, las que a su vez contribuyen al deterioro de cada localidad. Por ello, son las actividades productivas (Rincón Mautner, 1999), las principales causas del grave deterioro ambiental.

En los sitios con menos actividades humanas, se encontraron que los factores que indican menor grado de perturbación son el alejamiento de las poblaciones, las actividades ganaderas (bovina), la compactación del suelo por el ganado y el macheteo. En estos sitios se encuentran los remanentes de bosques de *Quercus* donde aún se conserva la estructura de los bosques de encino maduros característicos de la región. La mayoría de estos sitios se localizan en las laderas de los cerros más inaccesibles para las poblaciones humanas aunque algunos más se conservan gracias a que se utilizan como zonas de recreo por los pobladores.

5.2. Patrones biológicos afectados por la intensidad de disturbio

De los indicadores analizados, algunos resultaron ser más eficientes que otros como la cobertura y la riqueza de especies leñosas (árboles y arbustos), las taxones indicadores de perturbación (Read y Andersen, 2000; Wardell-Johnson y Williams, 2000), y el índice de diversidad de Simpson. En algunos casos los indicadores reportados en la literatura como eficientes, por ejemplo los modelos de abundancia, no resultaron ser indicadores universales del disturbio (Hill y Hamer, 1998).

Los indicadores biológicos con los cuales se construyó el IBI₁ son los que están más fuertemente relacionados con la integridad de la vegetación, y son los que muestran los primeros cambios evidentes en la comparación de un sitio prístino contra otro sometido a un continuo disturbio. Con el segundo conjunto de indicadores, se corrige el IBI₁ los cuales presentan un comportamiento cuadrático IBI₂, que predicen la integridad por arriba del valor crítico (64).

La riqueza y la cobertura de especies arbóreas, con aproximadamente 35 a 45 puntos de intensidad, desaparecen del sistema, lo que nos indica una gran sensibilidad incluso a bajas intensidad de disturbio, además de presentar uno de los valores de R^2 más altos,

por lo que creemos son buenos indicadores tempranos de la pérdida de integridad de los bosques (Stapanian y Cassell 1999). En el caso de los pastos amacollados, se observa claramente su susceptibilidad, ya que se encuentran preferentemente dentro de los bosques. En pastizales secundarios, este tipo de gramíneas sólo fueron observados entre los escasos árboles remanentes o protegidos por rocas o grietas en sitios húmedos. El índice de Simpson y la riqueza de especies leñosas muestran el mismo comportamiento, aunque se ha reportado que en algunos casos no se ven afectados de manera significativa, por lo que no resultan buenos indicadores de integridad en otros sistemas (Peltzer *et al.*, 2000 ; Milchunas *et al.*, 2000).

5.3. Medición de la integridad por arriba del valor crítico (IBI₂)

Los resultados obtenidos por Peltzer *et al.*, (2000), Rawat y Uniyal (1992) y Rietkerk y van de Koppel (1997) muestran que el disturbio incrementa la capacidad de invasión por parte de las hierbas, debido al incremento de la mezcla de los horizontes edáficos, lo que además permite un establecimiento más exitoso de especies rizomatosas (pastos). El resultado de este proceso es una estructura de comunidad diferente a la inicial. El efecto de la silvicultura y el pastoreo continuo en los sistemas biológicos incrementa la cobertura de especies herbáceas anuales y de pastos (Jenkins y Parker 1999; Nash *et al.*, 1999), este mismo fenómeno ocurre en la región.

Otro indicador afectado por el disturbio es la riqueza de especies suculentas, que a intensidades intermedias de disturbio alcanza su máximo valor de riqueza, lo que sugiere que los niveles intermedios benefician a estas especies. Además, hay evidencias de que algunas especies de cactáceas, principalmente del género *Mammillaria*, son ruderales (Martorell y Peters, 2000), por lo que es normal encontrarlas en sitios con cierto grado de perturbación. Las especies suculentas (cactáceas, crasuláceas y

euforbiáceas) presentan características fisiológicas, anatómicas y fenológicas que les permiten establecerse, al disminuir el dosel de la vegetación circundante, ya que aumenta la irradiación solar y la temperatura, con la consecuente disminución de la humedad. Todo ello corresponde a condiciones de mayor aridez, lo que propicia el establecimiento de especies xerófilas en las zonas degradadas.

La equitatividad de hierbas de acuerdo al índice de Shannon es otro de los patrones biológicos de la comunidad vegetal que se ve afectado por acción del disturbio. De acuerdo con Peltzer *et al.*, (2000) y Milchunas *et al.*, (2000), la equitatividad disminuye a niveles altos de intensidad de disturbio, debido a que éste permite la dominancia de especies capaces de soportar el sobrepastoreo y otras actividades humanas, tales como las hierbas y las gramíneas rizomatosas (pastos) principalmente, y de algunas especies leñosas que no son apetecibles. De acuerdo con los resultados (Figura 4.3), el aumento de la intensidad hasta rebasar el valor crítico permite el restablecimiento de la equitatividad. Suponemos que con el aumento en intensidad, el disturbio permitirá el aislamiento de las hierbas y los pastos, disminuyendo la dominancia y competencia entre ellas.

La riqueza de especies de leguminosas es otro de los indicadores afectados por el disturbio. Algunas de estas especies presentan características como las espinas, la formación de asociaciones con bacterias fijadoras de nitrógeno y un tipo de sistema radicular que les permiten establecerse en sitios con un alto disturbio y con pocos nutrientes.

En todos los casos, el aumento de la intensidad de disturbio antropogénico crónico hace disminuir los valores de todos los patrones biológicos al aumentar hasta llegar a un grado crítico. Todos los indicadores se ven afectados por la disminución de los espacios colonizables, principalmente la riqueza, la abundancia y la cobertura, debido al continuo

pisoteo y consumo de especies apetecibles por el ganado. Esto da como resultado la disminución de la cobertura vegetal basal y el aumento la erosión potencial del sistema. Además, estos factores afectan directamente la mortalidad, al igual que la capacidad de penetración de las raíces y el establecimiento de semillas (Milchunas *et al.* 2000), alterando la dinámica del agua y los nutrientes del suelo (Masera, 1996).

5.4. El caso de El Jazmín.

La base del método propuesto por Karr *et al.* (1986) no permite comparar los efectos del disturbio sobre diversos tipos de vegetación a la vez, ya que está basado primordialmente en la comparación de un sitio prístino (“*baseline*”) con otros de la misma vegetación originaria. En la localidad El Jazmín se encontró una alta diversidad de especies arbóreas, lo cual no corresponde a los bosques de encino de la región. La vegetación de este sitio posiblemente pertenece a una zona de transición entre el encinar y la selva baja caducifolia. El valor de disturbio antropogénico para este sitio no corresponde al índice de integridad biológica (IBI), de acuerdo a la metodología reportada, por lo que es evidentemente un dato fuera del conjunto (*outlier*). Como consecuencia de no presentar el mismo tipo de vegetación, se acordó eliminarlo de los resultados finales en la categorización de la integridad biológica, por no ser comparable con las demás localidades, y no se empleó como *baseline* para el IBI, a pesar de que tenía el más alto valor de integridad de los 12 sitios estudiados.

Por ello, como sitio de referencia (*baseline*) se empleó el sitio con menor intensidad de disturbio antropogénico, El Rincón 2, que presenta 14.9 puntos de perturbación. En trabajos anteriores sólo se reportaron tres sitios con una intensidad de disturbio más baja de un total de 81 localidades reportadas para la región, por lo que creemos es un sitio

con una integridad muy alta y por lo tanto un buen *baseline* para la generación de este IBI (Martorell y Peters, 2000).

5.5. Índice de integridad biológica (IBIt)

De acuerdo con el método de Karr *et al.* (1986), los valores de integridad se obtienen a partir de la comparación de los indicadores de la localidad prístina o de referencia con respecto a los demás sitios, y la categorización de cada lugar es resultado de la distancia del los indicadores graficados con respecto a sitio más íntegro y la suma posterior de éstos. Nuestro índice multimétrico se construyó basado en términos de los atributos que son sensibles a los cambios en la integridad biológica causados por las actividades humanas.(Karr. 1981; Karr, *et al.*, 1986; Karr, 1991; Karr, 1999, Karr y Chu, 1999). Por el contrario, nosotros empleamos el Análisis de Componentes Principales (ACP) como una forma más sensible y robusta de describir el comportamiento de las comunidades de encinares de Concepción Buenavista con respecto a la intensidad de disturbio antropogénico, pues los valores obtenidos están en función del análisis de ordenación y no como en el caso del método original, donde la apreciación juega un papel importante. Esta modificación del método propuesto por Karr *et al.*, (1986) es uno de los aportes de este trabajo, junto a la incorporación de los indicadores de segundo grado (cuadráticos), los cuales permiten evaluar la condición biológica una vez que la perturbación alcanza niveles donde ya no es posible evaluar cambios significativos de la integridad con el método original. Es evidente que incluso después de alcanzar estos niveles se siguen produciendo cambios importantes en la estructura y dinámica de la comunidad, al igual que en su integridad, por lo que es importante continuar evaluando los cambios en los sistemas biológicos hasta sus últimas consecuencias. Es evidente la existencia de un gradiente de integridad biológica a lo largo de las doce localidades. Los resultados de

IBIt confirman las observaciones hechas directamente en la vegetación donde se observa un mosaico de actividades humanas que reflejan diferentes tipos e intensidades (Vasconcelos, 1999).

5.6. Disturbio instantáneo vs. Integridad biológica

La correlación entre el disturbio instantáneo y la integridad biológica es alta, pero en algunos casos en específico el disturbio no corresponde a la integridad reportada por el IBI. El Jazmín es claramente un “*outlier*” ya que la integridad no corresponde con la cantidad de disturbio reportado por el índice instantáneo, debido a la riqueza tan alta de árboles asociados a otro tipo de vegetación. Otros casos parecidos son los de las localidades El Agua blanca, La Hondura y La Luz, donde la respuesta del índice de integridad es más sensible a los cambios producidos por las actividades humanas, ya que reporta para sitios con una mayor diversidad y abundancia de vegetación un valor alto de integridad. En cambio, el disturbio instantáneo predice para estos mismos sitios valores mucho menores que los esperados. Por lo tanto, el IBI es una mejor medida de la salud de los ecosistemas.

La correlación sugiere que las actividades humanas son la principal causa de la pobre condición biológica de la zona, sin restar importancia a otros factores que aumentan la fragilidad y susceptibilidad de la vegetación a la degradación, como el clima (desertificación), la topografía (pendiente) y el disturbio natural.

El IBI reportado para cada localidad nos muestra el efecto de las intensidades de disturbio antropogénico sobre el sistema y su salud. El IBI es una buena medida de integridad o conservación, pero no predice la resistencia y elasticidad, que son factores importantes para la conservación y restauración de la vegetación de Concepción Buenavista, ni evalúa directamente los cambios en la dinámica de la comunidad vegetal.

5.7. Categorías de salud

Para su mejor interpretación y comprensión, se asignó una categoría de integridad de acuerdo a la metodología de Karr (1991), el cual utiliza cinco estados o categorías de la condición biológica resultante de la aplicación del IBI (tabla 5.1). Según nuestro criterio y de acuerdo a la evidencia de la intensa y prolongada existencia de estos factores estresantes, ninguna de las comunidades se ve exenta de sus efectos. Es importante hacer notar que la integridad presenta un comportamiento no lineal. No se observa el mismo efecto de un disturbio de, por ejemplo, 10 puntos en comunidades íntegras, donde puede haber habido un cambio drástico, que en zonas totalmente degradadas donde el efecto es atenuado y poco evidente.

Tabla 5.1 Categorías de salud de los sitios de estudio

Escala de integridad	Categoría asignada	Sitios
91-100	Excelente	El Rincón 2
81-90	Buena	La Cañada La Cucharilla
66-80	Regular	La Pedrera Nacusenye
46-65	Pobre	La Biznaga Agua Blanca El Cacalote
0-45	Muy pobre.	La Hondura La Peña La Luz

5.8. Comunidades vegetales.

El disturbio antropogénico crónico modifica radicalmente la estructura y la composición de las comunidades vegetales existentes. Así, lo que probablemente fue un bosque de *Quercus* en el pasado hoy son pastizales secundarios, que pueden ser estados de la sucesión arrestados por el continuo disturbio en los sitios o resultado de cambios catastróficos (Scheffer *et al.*, 2001).

5.9. Efecto de las intensidades y tipos de disturbio sobre la integridad biológica

El efecto de los diferentes tipos de disturbio sobre la integridad biológica varía dependiendo de la intensidad con la que se presentan. La degradación del medio abiótico es el factor que más impacta en la integridad de la vegetación y es consecuencia de las actividades humanas y ganaderas de la región.

A niveles bajos de disturbio, el efecto de la actividad ganadera, es imperceptible, pero al sobrepasar cierto umbral (20-25 puntos de disturbio) el sistema biológico se colapsa. El efecto de la ganadería sobre la integridad biológica nos da un nuevo marco de referencia sobre el problema ganadero en la región, el cual no es posible erradicar o eliminar de manera definitiva, aunque quizás de manera planeada, racional y sometida a una estricta vigilancia podría permitir el mantenimiento de las zonas prioritarias para la conservación de los suelos y la escasa vegetación remanente. El efecto de los diferentes tipos de disturbio antropogénico sobre la integridad nos permite tomar decisiones sobre el manejo y la conservación de los recursos naturales de la región, al igual que la capacidad de discernir entre los diferentes factores estresantes, su aporte y el posible manejo de éstos, para tratar de detener el deterioro ambiental de la comunidad vegetal de Concepción Buenavista, principalmente de los Bosques de *Quercus*, ya que

éstos juegan un papel importante en la captación e infiltración del agua de lluvia, por lo que es preciso disminuir la presión ejercida por las actividades humanas y reestablecer el equilibrio hídrico y ambiental de la zona (Cruz-Cisneros y Rzedowski. 1980). La pérdida difícilmente reparable de los suelos reduce el potencial económico de la región. La pérdida de los suelos es una causa de emigración de los habitantes, al igual que la degradación del ambiente debida a este fenómeno social (García Barrios y García Barrios1990).

Lógicamente lo que se ha destruido en varios siglos no podrá restituirse en unos cuantos años, debido al grave deterioro acumulado a lo largo de la historia ambiental de la región, y la utilización de los recursos naturales por parte de las poblaciones humanas establecidas desde la prehistoria en la zona.

El aumento de estudios en zonas degradadas permitirá mostrar la urgencia y la necesidad de incorporar a la humanidad dentro de los estudios ecológicos, que ayuden a promover los enlaces entre la ecología y las ciencias sociales (Castilla. 1999).

6. REFERENCIAS

- Begon M., Harper J.L y Townsend C.R. 1987. Ecology: Individuals, Populations and Communities. Blackwell, Oxford.
- Castilla, J.C. 1999. Coastal marine communities: trends and perspectives from human-exclusion experiments. *Trends of Ecology and Evolution*, 14: 280-283.
- Cook, S. y Borah W. 1987. Ensayo sobre la historia de la población: México y el Caribe. Ed Siglo XXI. México. D.F.
- Crawley, J.M. 1996. GLIM for Ecologists. Blackwell Science, Oxford.
- Challenger, A. 1998. Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado, Presente y Futuro. CONABIO, UNAM y Agrupación Sierra Madre, México, D.F.
- Chaneton, E. J y Facelli J.M. 1991. Disturbance effects on plant community diversity: spatial scales and dominance hierarchies. *Vegetatio*, 93:143-155.
- Connell, J. 1978. Diversity in Tropical Rain Forest and Coral Reefs. *Science*. 199:302-309.
- Cruz-Cisneros, R. y Rzedowski, J. 1980. Vegetación de la cuenca del río Tepelmeme. Alta Mixteca, Estado de Oaxaca, (México). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas*. IPN, 22:19-84.

Dahlgren De Jordan, B. 1966. La Mixteca. Su Cultura e Historia Prehispánica. Cultura Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Fausch, K.D., Karr, J y Yant, P.R. 1984. Regional application of an index of biotic integrity based on stream fish communities. *American Fisheries Society*, 113: 39-55.

Flores-Villela, O. y Gerez, P. 1988. Conservación en México: Síntesis Sobre Vertebrados Terrestres, Vegetación y Uso del Suelo. INIREB y Conservation International, México, D.F.

Freedman, B. 1995. Environmental ecology. The ecological effects of pollution, disturbance and others stresses. Academic Press,

Frouz J. 1997. Use of soil dwelling diptera (Insecta, Diptera) as bioindicators: a review of ecological requirements and response to disturbance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74: 167-186.

García-Barrios L. y García-Barrios R. 1990. Environmental and technological degradation in peasant agriculture: A consequence of development in México. *World Development* 18:1565-1585.

García, L. A. 1996. La Caprinocultura en la Mixteca Oaxaqueña. Orígenes. *Ciencias* 44:28-31.

García Mendoza, A. J. 1983. Estudio ecológico-florístico de una porción de la sierra de Tamazulapan, distrito de Teposcolula, Oaxaca, México. Tesis de licenciatura, UNAM, Facultad de ciencias.

Harper, J.L.1977. Population Biology of Plants. Academic Press, Nueva York.

Harris, J.H. y Silveira R.1999. Large-scale assessments of river health using an index of biotic integrity with low-diversity fish communities. *Freshwater Biology*, 41:235-252.

Hill, J.K. y Hamer, K.C. 1998. Using species abundance models as indicators of habitat disturbance in tropical forests. *Journal of Applied Ecology*. 35: 458-460.

Hughes, R.M., Howlin S. y Kaufmann P.R. 2000. An index of biological integrity for coldwater Mountain Streams. *Communication at the NABS Annual Meeting*.

Instituto nacional de estadística geografía e informática. 2000. Fotografía aérea del municipio de Concepción Buenavista, Oaxaca. Vuelo 1256.

Jenkins, M y Parker, G. 1999. Composition and diversity of ground-layer vegetation in silvicultural openings of southern Indiana forests. *The American Midland Naturalist* 142 :1-16.

Karr, J.R.1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* 6:21-27.

Karr, J.R.1991. Biological integrity a long-neglected aspect of water resource management. *Ecological Applications*,1: 66-84.

Karr, J. R. 1999. Defining and measuring river health. *Freshwater Biology*, 41: 221-234.

Karr J. R. y Chu E.W. 1999. Restoring life in running waters: better biological monitoring. Island Press, Washington, D.C.

Karr, J.R., Fausch, K.D., Angermeier, P.L ., Yant, P.R. y Schollosser, I.J. 1986. Assessing biological integrity in running waters: a method and its rationale. Illinois Natural History Survey Special Publication 5. Champaing IL.

Lavorel, S., McIntyre, S., Landsberg, J. y Forbes, T.D.A.1997. Plant Functional Classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends of Ecology and Evolution*, 12: 474-477.

Mainguet, M. 1996. Desertification: natural background and human mismanagement. Springer- Verlag, Ciudad de publicación.

Magurran A.E. 1988. Ecological Diversity and Its Measurement. University Press, Princeton.

Martorell, C. y Peters, E. 2000. Conocimiento y conservación de las mamilarias endémicas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Informe final de actividades del proyecto R-166. CONABIO

Masera, R.O. 1996. Deforestación y degradación forestal en México. GIRA A.C. Michoacán, México.

Milchunas, D.G, Schulz, K. y Shaw, R. 2000. Plant community structure in relation to long-term disturbance by mechanized military maneuvers in a semiarid region. *Environmental Management*, 25:525-539.

Myers, N. 1996. Environmental Unknowns. *Science*, 269:358-360.

Nash, M.S, Whitford, W.G., De Soyza, A.G., A.G., Van Zee, A.G. y Havstad, K.M. 1999. Livestock Activity and Chihuahuan Desert Annual-Plant Communities: Boundary Analysis of Disturbance Gradients. *Ecological Applications*, 9:814-823.

Parker, E.D.1999. Stress in ecological systems. *Oikos*, 86:179-184.

Peltzer D.A., Bast, M.L., Wilson, S.D. y Gerry, A.K. 2000. Plant diversity and tree responses following contrasting disturbances in boreal forest. *Forest Ecology and Management*. 127:191-203.

Pickett, S.T.A. y White, P. S. 1985. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Academic Press, San Diego.

Rapport , D.J. 1999. How ecosystems responds to stress. *Bioscience*, 49:325-357.

Rawat, G.S. y V.K. Uniyal.1992. Pastoralism and plant conservation: The Valley of Flowers dilemma. *Environmental Conservation*, 30:164-167.

Read, L. J. y A. Andersen. 2000. The value of ants as early warning bioindicators: responses to pulsed cattle grazing at an Australian arid zone locality. *Journal of Arid Environments*, 45:231-251.

Reyes Santiago, P. J. 1993. Estudio florístico y fito-geográfico en el municipio de San Juan Mixtepec, distrito de Juxtlahuaca, Oaxaca. Tesis licenciatura, UNAM, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala.

Rietkerk , M. y van de Koppel, J. 1997. Alternate stable states and threshold effects in semi-arid grazing systems. *Oikos*, 79: 69-76.

Rincón Mautner, C. 1999. Man and the Environment in the Coixtlahuaca Basin of Northwestern Oaxaca, Mexico: Two Thousand Years of Historical Ecology. Tesis Doctoral. University of Texas, Austin University Microfilms.

Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa, México .D.F.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.1992. Inventario Nacional Forestal de Gran Visión. SARH. México, D.F.

Secretaría de Desarrollo Social. 1993. Plan de acción para combatir la desertificación en México. Comisión Nacional de las Zonas Áridas. México, D.F.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales. 2002. Informe de la situación del medio ambiente en México. SEMANAT. México, D.F.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2000. La Gestión Ambiental en México. SEMARNAP. México, D.F.

Scheffer, M., Carpenter S., Foley J.A., Folkes C. y Walker B. 2001. Catastrophic Shifts in Ecosystems. *Nature*, 413:256-264.

Singh, S.P.1998. Chronic disturbance, a principal cause of environmental degradation in developing countries. *Environmental Conservation*, 25:1-2.

Souza, P. W.1984. The role of disturbance in natural communities. *Annual Review of Ecology and Systematic*, 15:253-291.

Stapanian A.M., y Cassell, D. L. 1999. Regional frequencies of tree species associated with anthropogenic disturbance in Three Forest Types. *Forest Ecology and Management*, 117:241-252.

Tabachnick, B.G. y Fidell, L. 1989. Using multivariate statistics. Harper Collins Publishers. Nueva York.

Vasconcelos, H. 1999. Effects of forest disturbance on the structure of ground-foraging ant communities in central Amazonia. *Biodiversity and Conservation*, 8:409-420.

Wardell-Johnson, G. y Williams M. 2000. Edges and gaps in mature karri forest, southwestern Australia: logging effects on bird species abundance and diversity. *Forest Ecology and Management*, 131: 1-21.

Wiens J, A.1985. Vertebrate responses to environmental patchiness in arid and semiarid ecosystems. En: Pickett, S.T.A. y White, P. S. 1985. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Academic Press, San Diego.

APÉNDICE I

Imágenes del gradiente de intensidad del disturbio en Concepción Buenavista, Oaxaca.

	<p>Localidad: La Peña Vegetación escasa. Disturbio: 98.27 IBI: 30.83</p>
	<p>Localidad: La Biznaga Vegetación: Pastizal de Bouteloa Disturbio: 55.47 IBI: 61.97</p>
	<p>Localidad: Nacusenye Vegetación: Pastizal de Bouteloa Disturbio: 40.27 IBI: 75.55</p>
	<p>Localidad: La Pedrera Vegetación: Bosque abierto de encino Disturbio: 39.17 IBI: 76.70</p>
	<p>Localidad: La Cucharilla Vegetación Bosque de encino Disturbio: 29.42 IBI: 84.47</p>

10.- APÉNDICE II

Tablas de resultados de los análisis de ajuste a los modelos lineales generalizados con GLIM para comprobar que los indicadores fueran afectados por el disturbio crónico. Dependiendo del tipo de dato (conteos, fracciones o continuos) fue el tipo de ajuste que se realizó (normal, Poisson o binomial).

Tabla 4.3
Riqueza de árboles

Fuente	χ^2	gl	p
Disturbio	22.28	1	<0.0001
R2=	68%		

Tabla 4.4
Cobertura de árboles

Fuente	SC	GL	CM	F	p
Disturbio	55.2	1	55.2	44.88	<0.0001
Error	12.3	10	1.23		
Total	67.5	11			
R2=	81.82%				

Tabla 4.5
Riqueza de helechos

Fuente	χ^2	gl	p
Disturbio	13.87	1	0.0001959
R2=	39%		

Tabla 4.6
Riqueza de pastos amacolladas

Fuente	SC	GL	CM	F	p
Disturbio	5.776	1	5.776	5.88	0.038
Error	8.8287	9	0.98		
Total					
R2=	39.50%				

Tabla 4.7
Diversidad de especies leñosas (Índice de Simpson)

Fuente	SC	GL	CM	F	p
Disturbio	26.78	1	26.78	8.418	0.017
Disturbio2	21.1	1	21.1	6.03	0.02
Error	28.632	9	3.181		
Total	62.681				
R2=	54.30%				

Tabla 4.8
Riqueza de arbustos

Fuente	χ^2	gl	p
Disturbio	26.8	1	0.0019
R2=	64%		

Tabla 4.9
Equitatividad de hierbas

Fuente	SC	Gl	CM	F	p
Disturbio	0.1181	1	0.1181	30.31	0.0004
Dist2	0.1183	1	0.1183	30.36	0.0004
Error	0.035064	9	0.003896		
Total	0.015426				
R2=	77%				

Tabla 4.10
Riqueza de hierbas

Fuente	χ^2	gl	p
Disturbio	5.341	1	0.0208
Disturbio2	5.348	1	0.0175
R2=	38.32%		

Tabla 4.11
Riqueza de especies suculentas

Fuente	χ^2	gl	p
Disturbio	4.978	1	0.02567165
Disturbio2	5.863	1	0.01546242
R2=	26%		

Tabla 4.12
Cobertura de Hierbas

Fuente	χ^2	<i>gl</i>	<i>p</i>
Disturbio	5.455	1	0.0308
Disturbio2	5.548	1	0.0155
R2=	35.3%		

Tabla 4.13
Riqueza de leguminosas

Fuente	<i>SC</i>	<i>Gl</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Disturbio	0.2587	1	0.3515	8.64	0.0025
Dist2	0.1183	1	0.4255	6.251	0.03011
Error	0.02935	9	0.0251		
Total	0.1425				
R2=	28.5%				

11.-APÉNDICE III Estandarización del IBI

Para poder combinar variables con diferentes escalas en un análisis de componentes principales (PCA) es necesario primero estandarizarlas de manera que todas ellas tengan el mismo peso en el procedimiento. Para ello se empleó el método habitual de restar a cada dato la media y dividir el resultado entre la desviación estándar:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (1)$$

donde x_{ij} es el i -ésimo dato de la variable j , \bar{x}_j y s_j son la media y la desviación estándar de la variable j , y el apóstrofe indica que se trata del dato estandarizado. Las variables así transformadas tienen una media de 0 y una varianza de 1.

En consecuencia, los datos que arroja el PCA tienen una media de cero, habiendo resultados positivos y negativos. A fin de facilitar la interpretación y comunicación de los resultados del IBI, es conveniente establecer una escala donde un sitio prístino tuviera un valor de integridad de 100, y uno totalmente destruido correspondiera a un valor de cero. Para ello es necesario transformar los datos. Como la escala deseada es siempre positiva, lo primero que se debe hacer es sumar a todos los datos 2.6 (que es el valor del IBI más pequeño calculado a partir del PCA, correspondiente a La Línea de Luz), de modo que todos los datos se encuentren entre 0 y 4.05 (correspondiente al sitio íntegro, en El Rincón 2). Posteriormente, se multiplican todos los datos por $100/4.05$ ($= 24.65$) para que el dato mayor corresponda al 100% de integridad, y se mantenga el dato menor como cero integridad. Esto es:

$$IBI_i = 24.65(IBI'_i + 2.6) \quad (2)$$

donde IBI_i es el índice de integridad biológica del i -ésimo sitio medido en una escala de 0 a 100, e IBI'_i es el mismo índice pero en la escala original producida por el PCA.

A partir de las variables estandarizadas que se le proporcionan, el PCA genera sus resultados como una combinación lineal del tipo:

$$IBI'_i = \sum_{j=1} \beta_j x'_{ij} \quad (3)$$

donde β_j es el coeficiente para la variable j calculado mediante el algoritmo del PCA.

Sustituyendo las ecuaciones (1) y (3) en (2):

$$IBI_i = 24.65 \left(\sum_{j=1} \beta_j \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} + 2.6 \right)$$

$$IBI_i = \sum_{j=1} \frac{24.65\beta_j}{s_j} x_{ij} - \sum_{j=1} \frac{24.65\beta_j \bar{x}_j}{s_j} + 64.1$$

Como lo único que varía entre sitios es x_{ij} , y todo lo demás son constantes, se puede simplificar notablemente la última ecuación:

$$IBI_i = \sum_{j=1} \alpha_j x_{ij} + k \quad (4)$$

donde $\alpha_j = \frac{24.65\beta_j}{s_j}$, y k es la suma de los últimos dos términos de la ecuación previa.

A partir de la ecuación (4) se generaron las fórmulas para los IBI_1 e IBI_2 que se reportan en la tesis. Dichas fórmulas ya dan por resultado un índice entre cero y 100, pues se derivan de la ecuación (2).

En el índice generado por el PCA se había tomado como regla de decisión para sumar el IBI'_2 el signo del IBI'_1 , por lo que el valor mínimo aceptable para emplear este índice sin corregir es de cero. Sustituyendo este valor en (2), el valor correspondiente tras la estandarización es:

$$IBI_i = 24.65(0 + 2.6) = 64.1$$

Por esta razón el IBI_1 puede emplearse directamente como indicador de integridad si ésta es superior a 64.1, pero si está por debajo deben tomarse en cuenta los valores del IBI_2 para corregirlo.