



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE
SUELO EN LA CUENCA VALLE DE
BRAVO- AMANALCO MEDIANTE
PERCEPCIÓN REMOTA

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JORGE BENJAMÍN GARCÍA GÓMEZ

TUTOR:

M. I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA
HIROSE

2014





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

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/87/2014

Señor
JORGE BENJAMÍN GARCÍA GÓMEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA CIVIL

**"ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO EN LA CUENCA VALLE DE BRAVO- AMANALCO
MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA"**

INTRODUCCIÓN
I. MARCO TEÓRICO
II. MARCO DE REFERENCIA
III. DESARROLLO
IV. RESULTADOS
V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 6 de Junio de 2014
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ


M. ENI. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ
JLTS/MTA

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación que me brindó.

A mi profesor, Rodrigo Sepúlveda, por dirigirme en este proyecto y enseñarme mi cara favorita de la Ingeniería civil.

A mis sinodales, Alba Vázquez, Lilia Reyes, Francisco Granados y Juan Luis Umaña, por el interés que mostraron en el tema y en mi trabajo, y por su excelente asesoría.

A mis padres, Marcela y Jorge, por dibujarme ésta y muchas metas más. Espero cumplirlas todas y disfrutarlas con ustedes.

A mis hermanas, Lorena y Malena, por su compañía a lo largo de este camino. Sigamos adelante.

A todas las personas que creen en mí.

Gracias

Índice

Introducción	3
Objetivo	5
1. Marco teórico.....	6
1.1. El suelo	6
1.1.1. Definición	6
1.1.2. Origen y composición.....	6
1.1.3. Estructura y clasificación	7
1.1.4. Relación suelo- vegetación.....	8
1.1.5. Suelo en México	11
1.1.6. Legislación mexicana en materia de suelo.....	12
1.2. Agua y suelo en una cuenca	14
1.2.1. El agua	14
1.2.2. El ciclo hidrológico.....	21
1.2.3. Cuenca hidrológica	23
1.3. Pérdida de suelo.....	26
1.3.1. Definición	26
1.3.2. Estimación de la pérdida de suelo con el modelo <i>USLE</i>	27
1.3.3. Método de erosión potencial aplicado en la República Mexicana	51
1.3.4. Arrastre de sedimentos en el flujo de una cuenca hidrográfica	54
1.3.5. Consecuencias de la pérdida de suelo	65
2. Marco de referencia.....	67
2.1. Caracterización de la cuenca Valle de Bravo- Amanalco	67
2.1.1. Geografía física.....	67
2.1.2. Geografía humana.....	71
2.1.3. Historia	78
2.2. Diagnóstico hidrológico, hidrométrico, de uso de suelo y pérdida	82
2.3. Importancia de la cuenca Valle de Bravo- Amanalco en México	92
2.3.1. Región Hidrológica del Río Balsas	92
2.3.2. Sistema Cutzamala	97
3. Desarrollo	109

3.1.	Estimación de la pérdida potencial de suelo en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco ...	109
3.2.	Estimación de la pérdida de cubierta vegetal del suelo en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco, utilizando métodos de Percepción remota.....	114
3.2.1.	Generalidades de la Percepción remota	114
3.2.2.	Generalidades de las imágenes <i>Landsat</i>	120
3.2.3.	Generalidades del software <i>IDRISI Selva</i>	123
3.2.4.	Procedimiento de análisis	124
4.	Resultados, análisis y discusión.....	142
5.	Conclusiones y recomendaciones	170
	Bibliografía	174

Introducción

La presente tesis tiene como objetivo central estimar la pérdida de suelo en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco, sin embargo, en el camino busca la integración de otros objetivos particulares.

La pérdida de suelo es un problema del que se viene hablando hace tiempo en muchos informes, siempre con tono de crisis locales o mundiales. Uno de los objetivos particulares radicaría en responder qué es este fenómeno: el desarrollo del proceso, sus unidades de estudio, los factores que influyen.

Además, de contestar los fundamentos de la teoría de la pérdida de suelo nace el objetivo de definir cómo se calcula, los modelos físicos y matemáticos que la definen.

La relevancia de la pérdida de suelo se finca en la medida en cómo afecta a la población y a la sociedad. Y porque existe esta relación con el hombre se involucra a la Ingeniería civil: conocimiento y control de la naturaleza y sus recursos en beneficio y comodidad de la sociedad.

El tema, visto desde la simple frase, pérdida de suelo, pareciera referirse a un problema exclusivo de estudio geotécnico. Sin embargo, en los planes de estudios de la Facultad se incluye su análisis en las materias del área ambiental.

El temario de la asignatura Impacto Ambiental y Manejo de Residuos Municipales aborda en su capítulo 6 un panorama de la pérdida de suelo. Cita definiciones, clasificaciones, causas y consecuencias pero se queda corto en dos aspectos: primero, no consigue una definición pertinente, y segundo, no adopta en los ingenieros civiles conciencia del problema.

La aptitud colaborativa, integral y multidisciplinaria de los ingenieros voltea hacia otro eje en esta lista de objetivos particulares, pero esta vez en cuanto al método de análisis: la percepción remota. Se trata de una aplicación que vive un auge vigoroso relativamente temprano, frecuentemente adjudicada exclusivamente a ingenieros geofísicos o, más comúnmente, geomáticos. Se escuchan maravillas de sus bondades y se presenta como una excelente herramienta para estudiar fenómenos mundiales. En este proyecto se buscará aclarar qué tan útil es este arte de ver la tierra desde el cielo en el estudio de la pérdida de suelo.

Pero la duda de este carácter interdisciplinario viene también sustentada por la tendencia actual en la que los sistemas, al menos los que intervienen con diferentes ecosistemas, se deben abordar tomando como unidad básica una cuenca hidrológica. Éste término inmediatamente remite a otro elemento de la naturaleza estudiado por los ingenieros civiles, es decir, el agua. Se relacionarán a los recursos hídricos, fundamentales para la vida, en el estudio de la pérdida de suelo.

La cuenca tiene un sustantivo: Valle de Bravo- Amanalco. Se buscará ofrecer un marco de referencia de ésta área geográfica. Existe información breve sobre el problema en algunas zonas del país, incluida la cuenca. Enlistando un último objetivo particular vendría responder si existe coherencia entre los datos que arroje este estudio y los oficiales, y qué factores pueden hacer la diferencia.

En el primer capítulo de este proyecto, el Marco teórico, se exponen los conceptos que se consideran necesarios para abordar los objetivos. Se incluye la definición de suelo, su relación con otros factores bióticos y abióticos dentro de la unidad geográfica conocida como cuenca y se presentarán algunas cifras relevantes sobre el suelo. Naturalmente, se explica la teoría de la estimación de pérdida de suelo: sus unidades, los factores que la determinan y cómo ocurre el fenómeno.

El llamado Marco referencial ocupa el segundo capítulo. Es un esfuerzo de conjuntar las descripciones de la cuenca Valle de Bravo- Amanalco en sus muchas caras. Se aborda su geografía, su evolución histórica, y la forma de vida de sus habitantes.

Hace hincapié en la pertenencia de la región como subsistema de otros más complejos, sean naturales y de carácter humano, y que la hacen resaltar respecto a otras regiones.

Incluye un apartado especial para enumerar los detalles técnicos respecto a lo que incumbe en esta tesis, es decir, la condición reportada de la pérdida de suelo en la cuenca.

El tercer capítulo se ocupa del desarrollo central de la tesis: relacionar la teoría de pérdida de suelo con los datos recabados en la caracterización de la cuenca Valle de Bravo, y pretende plantear un modelo de acción para conseguir el objetivo: definir parámetros de pérdida de suelo.

Aquí es donde se hace relevante la aplicación de técnicas de percepción remota. Esta aplicación, que para muchos es un arte, contiene en el capítulo los fundamentos necesarios para comprenderla: se mencionan datos teóricos y técnicos y la manera en que sirvió para atacar los objetivos.

Finalmente está el capítulo de resultados. En este se interpretan los datos arrojados en el desarrollo, se presentan ideas de lo que puede estar ocurriendo en la región y se plantean los escenarios futuros.

Objetivo

Estimar la pérdida de suelo en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco utilizando a la percepción remota.

Objetivos Específicos

Validar el método seguido por la percepción remota en la estimación de pérdida de suelo.

Construir un panorama de la situación de la cuenca y su respuesta a la pérdida de suelo, basándose en la información geográfica e histórica de la región.

Definir la pérdida de suelo: sus causas, consecuencias, estimación y su impacto en el ser humano.

Relacionar la pérdida de suelo con otros factores que intervienen en su proceso, en el marco de una cuenca hidrológica: agua y vegetación.

Reconocer la relación de la pérdida de suelo con la Ingeniería Civil, conjuntar a las áreas que intervienen en su estudio y de las que se apoya para plantear soluciones.

1. Marco teórico

1.1. El suelo

1.1.1. Definición

El suelo es el sustrato físico que se encuentra en la parte superficial de la corteza terrestre. Se trata de un sistema en el que intervienen procesos físicos, químicos y biológicos que dependen unos de otros (Crespo Villalaz, 2004).

1.1.2. Origen y composición

El suelo se compone de dos partes fundamentales: una mineral y una orgánica. La parte mineral se puede asociar a la textura que tiene, y se clasifica de acuerdo al diámetro de las partículas minerales que contiene.

La formación mineral del suelo depende del fenómeno de intemperismo o meteorización de las rocas, que representa la respuesta de los minerales (que estaban en equilibrio a profundidades dentro de la litósfera) a las condiciones de la superficie terrestre, es decir, el contacto con la atmósfera, la hidrósfera y la biósfera.

Existen cuatro fenómenos físicos que agrietan a las rocas generando la disgregación de sus partículas:

- **Descompresión:** Variación del volumen de una roca debido a la disminución de la presión a la que se encontraba en la profundidad del manto.
- **Termoclastía:** Cambio en el volumen de una roca por efectos de la variación de la temperatura ambiental del día y la noche.
- **Gelifracción:** Variación del volumen del agua circundante a una roca y de la que se encuentra en sus oquedades debido a la congelación.
- **Haloclastía:** Aumento del volumen de las acumulaciones salinas en las oquedades de las rocas, depositadas por el agua o el viento.

Los fenómenos químicos que meteorizan las rocas son: oxidación, disolución, carbonatación, hidratación e hidrólisis. Estos actúan sobre los enlaces de los compuestos minerales, disgregando sus partículas y disolviéndose en soluciones que pueden ser transportadas por el agua.

La descomposición de las rocas también ocurre gracias a fenómenos biológicos: las raíces de las plantas y árboles se insertan en las oquedades ejerciendo presión y dañando la estructura original. También segregan sustancias que derivan en fenómenos bioquímicos de meteorización mencionados en el párrafo anterior (Crespo Villalaz, 2004).

Los productos derivados de estos fenómenos son partículas que se clasifican de acuerdo al tamaño de su diámetro en arenas, limos y arcillas. La acumulación de estas partículas es lo que se considera el sustrato mineral del suelo, como se muestra en la Tabla 1.1.

Nombre de la partícula	Diámetro		
Arena muy gruesa	2.0	-	1.0
Arena gruesa	1.0	-	0.5
Arena mediana	0.5	-	0.25
Arena fina	0.25	-	0.1
Arena muy fina	0.1	-	0.05
Limo	0.05	-	0.002
Arcilla	menos de		0.002

Tabla 1.1. Clasificación de las partículas de suelo (textura) (Nebel & Wrigth, 1999)

La parte orgánica del suelo la constituyen acumulaciones de hojas y raíces secas, así como una complicada red de organismos: numerosas especies de bacterias, hongos, protozoarios, acáridos, miriápodos, arácnidos, lombrices de tierra, caracoles, babosas y otros animales excavadores. El suelo también contiene detritos (productos derivados de la descomposición de materia orgánica) y *humus* (materia orgánica y mineral consumida por los organismos, parcialmente descompuesta).

1.1.3. Estructura y clasificación

Haciendo un corte transversal al suelo se puede reconocer dos fases (Nebel & Wrigth, 1999):

- **Mantillo:** Suelo suelto y terroso más superficial, rico en humus e ideal para el crecimiento de las plantas; tiene entre 10 y 30 centímetros de espesor. Un mantillo productivo necesita de relaciones dinámicas entre los organismos del suelo, los detritos y las partículas minerales que aloja.
- **Subsuelo:** capa densamente compactada con escasas de materia orgánica y abundancia de sustrato mineral.

La Edafología es la ciencia encargada del estudio de los suelos: involucra los aspectos relacionados a su evolución, el análisis de su dinámica, de sus características físicas, químicas y biológicas, así como los procesos de degradación, contaminación y perturbación.

Divide al suelo en horizontes, es decir, una serie de estratos horizontales que lo conforman y que presentan diferentes características de textura, adherencia y composición. La ordenación vertical de los estratos se conoce como perfil del suelo, y suele clasificarse de la siguiente manera:

- **Horizonte 0:** Es la parte más superficial del suelo, formado por hojas, ramas y restos vegetales.
- **Horizonte A:** En donde enraíza la vegetación herbácea. Su color es generalmente oscuro por la abundancia de materia orgánica descompuesta o *humus* elaborado. Determina el

paso de agua arrastrándola hacia abajo, y con ella fragmentos de otras partículas tamaño fino y de compuestos solubles en ella.

- **Horizonte B:** Carece prácticamente de *humus*, por lo que su color es más claro (pardo o rojo); aquí se depositan los materiales arrastrados desde el horizonte A: materiales arcillosos, óxidos e hidróxidos metálicos, etc.
- **Horizonte C:** Está constituido por la parte más alta del material rocoso *in situ*, sobre el que se apoya el suelo, más o menos fragmentado por la alteración mecánica y la química (la alteración química es casi inexistente ya que en las primeras etapas de formación de un suelo no existe colonización orgánica), pero en él aún puede reconocerse las características originales de la roca que lo originó.
- **Horizonte D:** Corresponde a la roca madre o material rocoso subyacente que no ha sufrido ninguna alteración química o física significativa. Algunos autores nombran a este estrato como D, cuando el suelo es autóctono y el horizonte representa a la roca madre, ó R, cuando el suelo es alóctono¹ y la roca representa sólo una base física sin una relación especial con la composición mineral del suelo que tiene encima.

La clasificación que proponen los edafólogos se muestra en la Tabla 1.2 (pág. 9). Cada grupo y familia depende de la dosificación de los dos componentes principales del suelo (mineral y orgánico), responsables de la diversa cantidad de características apreciables: adherencia, color, olor, textura, etc.

1.1.4. Relación suelo- vegetación

Se puede considerar un suelo fértil, o un buen suelo para las plantas, al que tiene un suministro adecuado de nutrientes orgánicos y minerales, y que posee la capacidad de retenerlos; así mismo, puede conservar humedad y evitar pérdidas por evaporación, y que tiene una estructura porosa que permite la aireación. También es necesario que su *pH* sea cercano al neutro y que las concentraciones salinas sean bajas.

El suelo es protegido por los vegetales, procurándose también a sí mismos, de dos formas: disminuyen el efecto de la erosión y minimizan las pérdidas por evaporación. Las plantas dependen, a su vez, de que el suelo sea lo bastante suelto y poroso para permitir la difusión del oxígeno al interior y que se transfiera a sus raíces.

Un suelo con demasiada agua tiene menores espacios con aire e impide la ventilación, evitando la infiltración y aumentando el escurrimiento. En los sistemas de cultivo, los nutrientes del suelo se pierden con las cosechas, y es necesario reemplazarlos con técnicas de fertilización orgánica y mineral.

¹ Que no es originario del lugar en el que se encuentra.

Grupos de Suelos de Referencia							
Acrisol	AC	Chernozem	CH	Kastanozem	KS	Podzol	PZ
Albeluvisol	AB	Criosol	CR	Leptosol	LP	Regosol	RG
Alisol	AL	Durisol	DU	Lixisol	LX	Solonchak	SC
Andosol	AN	Ferralsol	FR	Luvisol	LV	Solonetz	SN
Antrosol	AT	Fluvisol	FL	Nitisol	NT	Stagnosol	ST
Arenosol	AR	Gleysol	GL	Phaeozem	PH	Tecnosol	TC
Calcisol	CL	Gipsisol	GY	Planosol	PL	Umbrisol	UM
Cambisol	CM	Histosol	HS	Plintosol	PT	Vertisol	VR
Calificadores							
Abrúptico	Ap	Ferrálico	fl	Irrágico	ir	Reductácuico	Ra
Acérico	Ae	Férrico	fr	Lamélico	ll	Redúctico	Rd
Ácrico	Ac	Fíbrico	fi	Láxico	la	Régico	Rg
Álbico	Ab	Fliótico	ft	Léptico	le	Réndzico	Rz
Alcálico	Ax	Flúvico	fv	Lígnico	lg	Rheico	Rh
Alico	Al	Fólico	fo	Límnico	lm	Ródico	Ro
Aluándico	Aa	Fractipétrico	fp	Línico	lc	Rúbico	Ru
Alúmico	Au	Fractiplíntico	fa	Lítico	li	Rúptico	Rp
Ándico	An	Frágico	Fg	Líxico	lx	Rústico	Rs
Antrácuico	Aq	Flúvico	Fu	Lúvico	lv	Sálico	Sz
Ántrico	Am	Gárbico	Ga	Magnésico	mg	Sáprico	Sa
Arénico	Ar	Gélico	Ge	Manganiférrico	mf	Silándico	Sn
Árico	Ai	Gelistánico	Gt	Mázico	mz	Límico	Sl
Arídico	Ad	Gérico	Gr	Melánico	ml	Esquelético	Sk
Árzico	Az	Gíbsico	Gi	Mesotrófico	ms	Sódico	So
Brúnico	Br	Glácico	Gc	Mólico	mo	Solódico	Sc
Calcárico	Ca	Gleyico	Gl	Moliglósico	mi	Sómbrico	Sm
Cálcico	Cc	Glosálbico	Gb	Nátrico	na	Spódico	Sd
Cámbico	Cm	Glósico	G	Nítico	ni	Spólico	Sp
Cárbico	Cb	Gréyico	Gz	Nóvico	nv	Stágnico	St
Carbonático	Cn	Grúmico	Gm	Nudiárgico	na	Sulfático	Su
Clorídico	Cl	Gípsico	Gy	Nudilítico	nt	Takyrico	Ty
Crómico	Cr	Gipsírico	Gp	Ómbrico	om	Técnico	Te
Arcíllico	Ce	Háplico	Ha	Ornítico	oc	Téfrico	Tf
Colúvico	Co	Hémico	Hm	Ortseinico	os	Térrico	Tr
Crífico	Cy	Hístico	Hi	Oxiácuico	oa	Thaptándico	Ba
Cutánico	Ct	Hórtico	Ht	Páquico	ph	Taptovítrico	Bv
Dénsico	Dn	Húmico	Hu	Pélico	pe	Tiónico	Ti
Drénico	Dr	Hidrágico	Hg	Pétrico	pt	Tixotrópico	Tp

Tabla 1.2. Clasificación mundial del suelo de acuerdo a la Edafología (FAO: Informe sobre recursos mundiales del suelo, 2007)

Calificadores							
Dúrico	Du	Hídrico	hy	Petrocálcico	pc	Tidálico	Td
Dístrico	Dy	Hidrofóbico	hf	Petrodúrico	pd	Tóxico	Tx
Ekránico	ek	Hiperálbico	hb	Petrogleyico	py	Transpórtico	tn
Endodúrico	Nd	Hiperálico	hl	Petrogípsico	pg	Túrbico	Tu
Endodístrico	ny	Hipercálcico	hc	Petroplíntico	pp	Úmbrico	Um
Endoeutríco	Ne	Hiperdístrico	hd	Petosálico	ps	Umbriglósico	Ug
Endoflúvico	Nf	Hiperéutríco	he	Pisocálcico	cp	Úrbico	Ub
Endogleyco	Ng	Hipergípsico	hp	Pisoplíntico	px	Vérmico	Vm
Endoléptico	Nl	Hiperótrico	ho	Plácico	pi	Vértico	Vr
Endosálico	Ns	Hipersálico	hs	Plágico	pa	Vético	Vt
Éntico	Et	Hiperesquelético	hk	Plíntico	pl	Vítrico	Vi
Epidístrico	Ed	Hipocálcico	wc	Pósico	po	Vorónico	Vo
Epieutríco	Ee	Hipogípsico	wg	Profúndico	pf	Xántico	Xa
Epiléptico	El	Hipolúvico	wl	Prótico	pr	Yérmico	Ye
Episálico	Ea	Hiposálico	ws	Púfico	pu		
Escálico	Ec	Hiposódico	wn				
Éutríco	Eu						
Eutrosílico	Es						
Especificadores							
Bati	..d	Epi	..p	Orto	..o	Proto	..t
Cumuli	..c	Hiper	..h	Para	..r	Tapto	..b
Endo	..n	Hipo	..w				

Continuación Tabla 1.2



Imagen 1.1. Estratos de suelo y roca. Distrito Federal.



Imagen 1.2. Estratos de suelo y roca. Guerrero.

1.1.5. Suelo en México

México tiene 25 de los 28 tipos de suelo que tienen registrados los edafólogos; 10 de esos constituyen el 74 por ciento de su territorio. Cinco son los más comunes: leptosoles, regosoles, calcisoles, feozems y vertisoles (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2004).

Sin embargo, el 50 por ciento de los suelos nacionales se encuentran severamente afectados por diversos factores. Los principales atacantes del suelo son la deforestación y el sobrepastoreo: se sabe que de 1950 a 1996 se redujo en un 40 por ciento la superficie agrícola por habitante nacional, obedeciendo no sólo a la tendencia de crecimiento poblacional, también a la pérdida de espacios agrícolas por la desertificación (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2004).

La tendencia es, desde 1986, la reducción del 2 por ciento anual de áreas naturales sin alteración antropogénica (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2004); por otra parte, se estima que año con año 10 por ciento de superficie nacional cambia su uso de suelo de conservación o forestal a agrícola o ganadero.

El uso pecuario del suelo generalmente se establece en terrenos de matorral, pero en el país se ha adaptado a casi todos los ecosistemas, y excede en muchos casos el 65 por ciento de la superficie estatal, como los estados del norte del país o Tabasco (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2004). En zonas áridas o semiáridas del país el sobre pastoreo es el mayor responsable de la desertificación.

El 45 por ciento del suelo mexicano está contaminado por sustancias como aceites, grasas y solventes derivados de la actividad industrial humana (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2004).

Se pierden cerca de 535 millones de toneladas anuales de suelo. Derivado de este problema, existe una pérdida anual de 188 millones de pesos en diversas áreas. La erosión hídrica es la principal responsable y afecta a una superficie cercana al 64 por ciento de la nacional (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2004).

Finalmente, la presión urbana representa el 27 por ciento de la responsabilidad de la degradación de suelos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2004). En la Figura 1.1 se muestra en color amarillo y azul las zonas afectadas por erosión eólica e hídrica severa, respectivamente.



Figura 1.1. Pérdida de suelo por erosión eólica e hídrica (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2004)

1.1.6. Legislación mexicana en materia de suelo

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Artículo 27) versa sobre la soberanía y la propiedad de todo lo que está contenido dentro los límites nacionales, pero específicamente la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la encargada de la regulación ambiental del suelo. Con su Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Medio Ambiente se establecen los objetivos y las preocupaciones de la nación para con el suelo.

Los Artículos que dictan alguna particularidad del suelo son los que aparecen en el Título Segundo, y se citan a continuación.

- **ARTÍCULO 98.** Hace referencia a la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo, en donde menciona darle un uso que no altere el equilibrio de los ecosistemas y que mantenga su capacidad productiva íntegra. En caso de afectación al mismo, consecuencia de obras públicas o privadas, se deben incluir acciones de mitigación en los proyectos.
- **ARTÍCULO 99.** Trata lo relacionado a la denominación de usos de suelo, donde obliga a la creación de planes de ordenamiento ecológico en todos los tipos: urbano (asentamientos

controlados, establecidos y regulares), reservas, zonas de aprovechamiento forestal, de exploración del subsuelo y de uso agrícola y ganadero.

- **ARTÍCULO 100.** Faculta a la autoridad para suspender permisos y sancionar a los responsables de hacer un aprovechamiento forestal que dañe al suelo.
- **ARTÍCULO 101.** Sobre la conservación y regulación del aprovechamiento de recursos que afecte al suelo en regiones selváticas del país.
- **ARTÍCULO 101 BIS.** Mismo criterio que el 101, pero aplicado a zonas áridas.
- **ARTÍCULO 102.** Responsabilidades y sanciones de las dos anteriores.
- **ARTÍCULO 103.** Sobre quienes realicen actividades agrícolas y pecuarias, sus responsabilidades.
- **ARTÍCULO 104.** Trata la promoción de prácticas de conservación del suelo en los sectores públicos y privados que les involucren, así como la obligación de incluirlos en los estudios de impacto ambiental cuando exista un cambio de uso de suelo.
- **ARTÍCULO 105.** Sobre los estímulos fiscales que se otorguen a quienes incluyan criterios ecológicos en las actividades forestales.

De igual manera, las Normas Oficiales Mexicanas que tocan el tema del suelo son las siguientes:

- **NOM 060 SEMARNAT 1994:** Sobre la mitigación de los efectos resultantes del aprovechamiento forestal.
- **NOM 062 SEMARNAT 1994:** Sobre el trabajo para la biodiversidad afectada por el cambio de uso de suelo de forestal a agropecuario.
- **NOM 021 SEMARNAT 2000:** Especificaciones sobre la fertilidad, salinidad, clasificación y estudio del suelo.
- **NOM 020 SEMARNAT 2001:** De los procesos y lineamientos de rehabilitación y mejoramiento de suelos forestales de pastoreo.
- **NOM 023 SEMARNAT 2001:** Sobre los inventarios cartográficos de suelo.

1.2. Agua y suelo en una cuenca

1.2.1. El agua

El agua es una sustancia formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O) que se encuentra naturalmente en el planeta. Es esencial para la supervivencia de todas las formas de vida conocida en la Tierra, además de haber sido su incubadora hace millones de años. Debido a que “La materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma (Antoine Lavoisier, 1787)”, la totalidad del agua en el planeta no cambia, simplemente varía en su estado dependiendo la energía.

La palabra agua se refiere generalmente a su estado líquido, sin embargo, se presenta también en los estados sólido y gaseoso dependiendo la temperatura a la que esté expuesta: mientras menor sea, sus moléculas se unen formando hielo; por otra parte, si la temperatura aumenta, no sólo regresa al estado líquido por la disociación de sus moléculas, sino que las separa lo suficiente para pasar al estado gaseoso y formar vapor.

El agua en la Tierra

Casi el 98 por ciento del agua mundial es salada y se encuentra en los mares y océanos. El resto, poco más del 2 por ciento, es dulce, pero no significa que se pueda consumir directamente por los seres vivos. El agua disponible en ríos y lagos es prácticamente el 0.103 por ciento, y su distribución en el mundo puede apreciarse en la Tabla 1.3 (pág. 19), así como en las figuras correspondientes (Figura 1.2, Figura 1.3 y Figura 1.4, págs. 19 y 20).

En valores más reales, en los océanos y mares se estima un volumen de mil 370 millones de kilómetros cúbicos de agua, mientras que en la corteza terrestre circulan 60 millones, y en los glaciares existen 29 millones 170 mil. El volumen contemplado para lagos es de 750 mil kilómetros cúbicos; la humedad del suelo asciende a 65 mil, el vapor atmosférico a 14 mil, 70 mil se evaporan por la vegetación y en los ríos se consideran mil kilómetros cúbicos (Comisión Nacional del Agua (B), 2010).

Dentro de las estadísticas del agua en relación a la población mundial, se sabe que el consumo humano, incluyendo actividades domésticas, agropecuarias e industriales, se estima en 4 mil kilómetros cuadrados al año. Se calcula que la población crecerá entre un 40 y 50 por ciento en los próximos 20 años, lo que implica, siguiendo con los hábitos de consumo actuales, la demanda extra de un 40 por ciento de agua anual (Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Mazatlán (JUMAPAM), 2013).

Actualmente, más de 884 millones de personas no tienen acceso agua potable, casi una octava parte de la población mundial. En promedio, 1.4 millones de niños mueren cada año por enfermedades relacionadas al consumo de agua (200 muertes de niños cada segundo) (Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Mazatlán (JUMAPAM), 2013).

Un habitante europeo consume en promedio 200 litros de agua al día, mientras que uno de Estados Unidos el doble. Finalmente, por cada dólar invertido en agua y saneamiento, 8 regresan (Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Mazatlán (JUMAPAM), 2013). Todos estos datos, positivos y negativos, reflejan la importancia del agua en la vida y su desarrollo, su riqueza, su importancia y, muy urgente, la problemática de su carencia.

El agua en México

La población mexicana concentra un 77 por ciento en la zona Norte Centro del país, donde se genera el 87 por ciento del Producto Interno Bruto (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010). Sin embargo la distribución del agua nacional no coincide con el patrón de asentamiento humano.

La disponibilidad de agua se refiere al volumen total de líquido que hay en una región. Para saber la cantidad existente para cada habitante se divide el volumen de agua entre el número de personas de una población.

En México hay diferencias muy grandes en cuanto a la disponibilidad de agua. Las zonas centro y norte de México son, en su mayor parte, áridas o semiáridas: los estados norteños, por ejemplo, apenas reciben 25 por ciento de agua de lluvia. En el caso de las entidades del sureste (Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz de Ignacio de la Llave y Tabasco) es lo contrario, éstas reciben casi la mitad del agua de lluvia (49.6 por ciento) y en las del sur, también llueve mucho, no obstante, sus habitantes tienen menor acceso al vital líquido, pues no cuentan con los servicios básicos, como es agua entubada dentro de la vivienda (Figura 1.5, pág. 20) (Comisión Nacional del Agua (B), 2010).

En el Valle de México se encuentra la disponibilidad anual más baja de agua (apenas 186 metros cúbicos por habitante); en caso contrario se encuentra la frontera sur (más de 24 mil metros cúbicos por habitante) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010).

Debido al crecimiento de la población, la disponibilidad de agua ha disminuido de manera considerable: en 1910 era de 31 mil metros cúbicos por habitante al año; para 1950 había disminuido hasta un poco más de 18 mil metros cúbicos; en 1970 se ubicó por debajo de los 10 mil metros cúbicos, en 2005 era de 4 mil 573 metros cúbicos y para 2010 disminuyó a 4 mil 230 metros cúbicos anuales por cada mexicano (Comisión Nacional del Agua (B), 2010).

En México, al 2010, el porcentaje de viviendas con disponibilidad de agua fue de casi 89 por ciento, esto significa más de 74 millones de personas, el resto se abastecían de agua entubada fuera de la vivienda pero dentro del terreno que habitan, de pozos, ríos o arroyos, de la llave pública, o de otra vivienda. Por entidad federativa, este indicador se ha modificado los últimos 20 años (Comisión Nacional del Agua (B), 2010).

A nivel nacional, en 1990, el 62 por ciento de las viviendas contaban con drenaje; el porcentaje se elevó a 75 en el año 2000, para 2005 fue de 85 y en 2010 se ubicó en 89 por ciento. Las entidades con el menor porcentaje de viviendas que cuentan con este servicio son Guerrero y Oaxaca, con 72 y 70 por ciento, respectivamente (Comisión Nacional del Agua (B), 2010).

Sobre México caen mil 488 millones de metros cúbicos anuales de lluvia. El 72.5 por ciento se evapora, 25.4 escurre y 2.1 se infiltra. La precipitación media anual es de 759.6 milímetros, siendo el 68 por ciento en los meses de junio a septiembre (Comisión Nacional del Agua (B), 2010). Los ríos mexicanos suman 633 mil kilómetros de longitud, a lo largo de los cuales existen 1,014 sitios de monitoreo de la calidad del agua.

El país cuenta con 653 acuíferos, de los cuales 282 tienen disponibilidad para surtir de agua a la población. De hecho, el 58 por ciento del agua para consumo humano viene de éstos (Comisión Nacional del Agua (B), 2010).

Se comparten con Estados Unidos, Guatemala y Belice 8 cuencas hidrológicas. Se han construido obras de infraestructura que tienen como objetivo la captación, potabilización, distribución y deposición del agua para el uso humano, y se pueden apartar los usos indirectos al ser humano, como la generación de electricidad o las obras de contención del agua para evitar catástrofes (Tabla 1.4) (Comisión Nacional del Agua (B), 2010).

El 63 por ciento del agua concesionada para uso consuntivo² del agua concesionada proviene del subsuelo, mientras que el 33 por ciento de escurrimientos y cuerpos superficiales (Comisión Nacional del Agua (B), 2010). La distribución del agua concesionada se muestra en la tabla Tabla 1.5.

Marco legal mexicano en materia de agua

Son varios los documentos mexicanos que regulan el agua en varios de sus aspectos (Comisión Nacional del Agua (B), 2010). La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su Artículo 27 dicta: “La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponden originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada”. Además, el párrafo quinto establece que “son propiedad de la Nación las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el Derecho Internacional; las aguas marinas interiores; las de las lagunas y esteros que se comuniquen permanentemente o intermitentemente con el mar; la de los lagos interiores de formación natural que estén ligados directamente a corrientes constantes; las de los ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional; las de las corrientes constantes o intermitentes y

² Aquellos que consumen o extraen agua de su fuente de origen, y por tanto, pueden ser medidos cuantitativamente (Universidad Austral de Chile, 2000).

sus afluentes directos o indirectos, cuando el cauce de aquéllas en toda su extensión o en parte de ellas, sirva de límite al territorio nacional o a dos entidades federativas, o cuando pase de una entidad federativa a otra o cruce la línea divisoria de la República; las de los lagos, lagunas o esteros cuyos vasos, zonas o riberas, estén cruzadas por líneas divisorias de dos o más entidades entre la República y un país vecino, o cuando el límite de las riberas sirva de lindero entre dos entidades federativas o a la República con un país vecino; las de los manantiales que broten en las playas, zonas marítimas, cauces, vasos o riberas de los lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, y las que se extraigan de las minas; y los cauces, lechos o riberas de los lagos y corrientes interiores en la extensión que fija la ley.

Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos; el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional. Cualesquiera otras aguas no incluidas en la enumeración anterior, se considerarán como parte integrante de la propiedad de los terrenos por los que corran o en los que se encuentren sus depósitos, pero si se localizaren en dos o más predios, el aprovechamiento de estas aguas se considerará de utilidad pública, y quedará sujeto a las disposiciones que dicten los Estados”.

Por otra parte, la Ley de Aguas Nacionales en su Artículo 4 establece que “la autoridad y administración en materia de aguas nacionales y de sus bienes públicos inherentes corresponde al Ejecutivo Federal, quien la ejercerá directamente o a través de la Comisión (refiriéndose a la Comisión Nacional del Agua)”.

En su Artículo 9 enuncia: “La Comisión es un órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y que tiene por objeto ejercer las atribuciones que le corresponden a la autoridad en materia hídrica y constituirse como el Órgano Superior en carácter técnico, normativo y consultivo de la Federación, en materia de gestión integrada de los recursos hídricos, incluyendo la administración, regulación, control y protección del dominio público hídrico”.

Otras instituciones que velan por el agua en el país son:

- Organismos de Cuenca
- Comités de playas limpias
- Consejo Consultivo del Agua
- Ayuntamientos municipales
- Gobiernos estatales a través de sus Comisiones

Visión del agua para el futuro

El problema principal del agua, como se analizó: es escasa. El fenómeno se agrava con el cambio climático. Éste es un fenómeno que involucra el aumento de la temperatura superficial del planeta, ya sea de manera natural o antropogénica, y que modifica los procesos climáticos naturales.

Algunos de los principales síntomas de este cambio ya los está padeciendo México: las sequías, las lluvias atípicas o las extraordinarias (Comisión Nacional del Agua (B), 2010). Como resultado, se planteó la Agenda del agua, en la que el gobierno se compromete a trabajar en cuatro campos de acción:

- Ríos limpios: Se buscará el tratamiento del cien por ciento de las aguas residuales municipales e industriales, el retiro de basura inorgánica de ríos y lagos y el control de las fuentes de contaminación difusa.
- Cuencas en equilibrio: Todas las superficies de riego deben estar correctamente tecnificadas, las cuencas deben ser capaces de auto administrarse, se deben reutilizar el 100 por ciento de las aguas tratadas y el control de los acuíferos.
- Cobertura universal: Todos los suburbios urbanos deben estar conectados a redes de abastecimiento, dotar de agua potable a todas las comunidades rurales y hacer eficiente la operación de los organismos administradores del agua.
- Asentamientos seguros frente a inundaciones y catástrofes: Consiste en el eficaz ordenamiento territorial, quitar los asentamientos humanos en zonas inundables y la creación de un sistema de alerta temprana con tecnología de punta.

Pensando en que no se trata de solamente buenas intenciones, se alinean los propósitos con el Plan Nacional de Desarrollo, donde se pueden identificar los capítulos:

- Estado de derecho y seguridad
- Economía competitiva y generadora de empleos
- Igualdad de oportunidades
- Sustentabilidad ambiental
- Democracia efectiva y política exterior responsable

Agua en el mundo	
Salada	97.5000%
Nieve y hielo	1.9400%
Freáticas	0.5450%
Biológica	0.0005%
Atmosférica	0.0011%
Humedad del suelo	0.0050%
Ríos y lagos	0.0086%

Tabla 1.3. Distribución del agua en el mundo (Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Mazatlán (JUMAPAM), 2013)

Infraestructura hidráulica en México	
4,462	presas y bordos de almacenamiento
6.5	millones de hectáreas de riego
2.74	millones de hectáreas de temporal tecnificado
604	plantas potabilizadoras municipales en operación
1,833	plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación
2,082	plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación
3,000	kilómetros de acueductos

Tabla 1.4. Infraestructura hidráulica mexicana (Organismo de Cuenca Balsas (CONAGUA), 2010)

Uso del agua concesionada en México	
Agrícola	77%
Abastecimiento público	14%
Industrial	4%
Termoeléctrico	5%

Tabla 1.5. Uso del agua concesionada en México (Organismo de Cuenca Balsas (CONAGUA), 2010)



Figura 1.2. Agua en el mundo (Comisión Nacional del Agua (B), 2010)

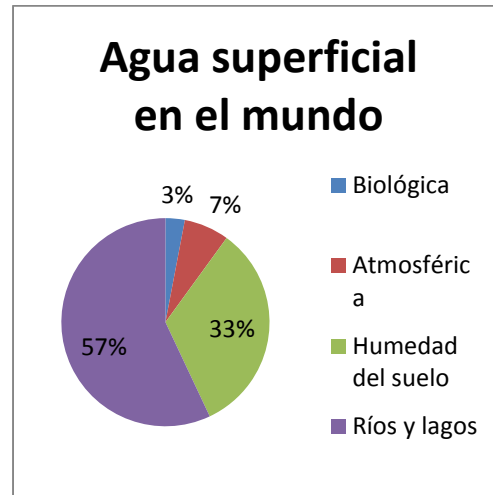


Figura 1.3. Agua dulce en el mundo (Comisión Nacional del Agua (B), 2010)

Figura 1.4. Agua superficial en el mundo (Comisión Nacional del Agua (B), 2010)

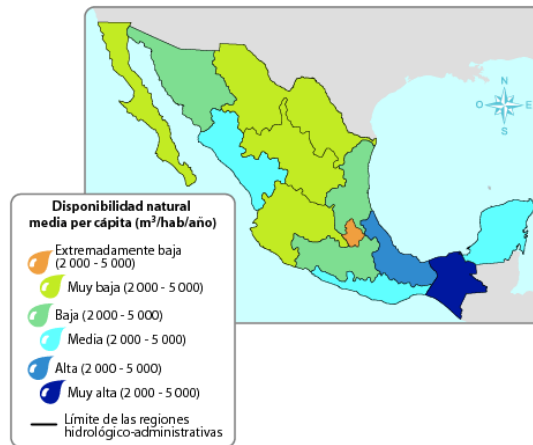


Figura 1.5. Disponibilidad natural media per cápita del agua (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)



Imagen 1.3. Río Grijalva, Chiapas.



Imagen 1.4. Manantiales de Chignautla, Puebla.



Imagen 1.5. Lagos de Colón, Chiapas.



Imagen 1.6. Río Colotepec, Oaxaca.

1.2.2. El ciclo hidrológico

Se trata de un proceso natural de transporte del agua a través de la atmósfera y la superficie terrestre. El ciclo inicia cuando al agua almacenada en los mares y océanos se le transfiere temperatura gracias a la radiación solar, lo que genera su evaporación.

El vapor de agua asciende a la atmósfera, en donde debido a la temperatura y presión, sus partículas, que se encuentran muy dispersas, son aglomeradas para formar gotas de agua, es decir, se condensan, y forman las nubes.

Si las condiciones de presión y temperatura son favorables, el agua se precipitará, gracias también a la fuerza de gravedad, y caerán. Este proceso puede darse directamente en los océanos, sin embargo, el movimiento de las masas del aire en la atmósfera lleva a las nubes sobre la superficie terrestre, por lo que las lluvias también ocurren en los continentes.

Cuando el agua cae en la tierra su destino puede ser variado: una parte puede infiltrarse inmediatamente en el suelo gracias a la porosidad del mismo y otra parte puede fluir sobre la superficie cuando esta se considera impermeable. En ambos casos el agua puede regresar a la atmósfera debido a la evaporación o a la transpiración de las plantas.

Lo restante del agua de lluvia puede penetrar más en el subsuelo y formará el suministro de agua subterránea.

Bajo la influencia de la gravedad, el escurrimiento superficial y el agua subterránea se mueven hacia cotas más bajas, se aglomeran y forman corrientes y con el tiempo regresan a los océanos.

El agua que viaja en los canales también puede infiltrarse al subsuelo gracias a la porosidad del suelo, así como también el agua subterránea se puede convertir en superficial por diferenciales de energía potencial en los cauces.

Otra variante que presenta el camino del agua en el ciclo es caer en zonas que sobrepasan el punto de congelación, y debido a la temperatura extremadamente baja se convierten en nieve que reposará hasta que un cambio la lleve a la fusión y pueda moverse hacia el suelo o sobre la superficie.

El agua en el ciclo no se mueve permanentemente en una tasa constante, su desplazamiento y transformaciones son erráticos tanto temporal como espacialmente, de tal suerte que la naturaleza produce lluvias torrenciales extraordinarias en regiones donde tenía siglos que no lo hacía, y por otra parte, se detienen los procesos atmosféricos y con ello la precipitación y escurrimiento generando sequías.

Debido a esto, el hombre creó la hidrología. Los hidrólogos tienen la función de obtener una comprensión de los procesos que se generan en la atmósfera y en el curso del agua durante su paso en la superficie, así como generar modelos cuantitativos que arrojen valores del volumen de agua en tránsito, y así relacionarlos a la actividad humana, que está íntimamente ligada al vital líquido.

La hidrología es la ciencia que trata de los procesos que rigen al agotamiento y recuperación de los recursos de agua en las áreas continentales y en las diversas fases del ciclo hidrológico (Organización Meteorológica Mundial (WMO)).



Figura 1.6. Ciclo del Agua (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2004).

1.2.3. Cuenca hidrológica

La cuenca es una zona de la superficie terrestre en la que se lleva a cabo un movimiento del agua, el cual inicia en la atmósfera circundante que le abastece de lluvia, y es drenada a través de un sistema de flujo hacia un mismo punto de salida.

Las cuencas también se pueden definir a partir de puntos de drenaje tales como presas, confluencias de ríos o estaciones hidrométricas con el fin de calcular la disponibilidad del agua, denominándose entonces como hidrológica (Comisión Nacional del Agua (B), 2010).

La mecánica de funcionamiento de una cuenca se puede definir como la respuesta a un estímulo. La precipitación se puede considerar el estímulo, y una de las respuestas es el escurrimiento.

Fenómenos controlados por características geomorfológicas y urbanas determinan esta mecánica, y se pueden clasificar como condicionantes del volumen de escurrimiento, como son el área y el tipo de suelo, y las que condicionan la respuesta, pendientes y cauces.

El flujo del agua en una cuenca obedece fundamentalmente a las fuerzas naturales, predominantemente la gravedad y la temperatura. El relieve de la superficie terrestre y la radiación solar serán factores que determinarán el movimiento de los fluidos dentro de la cuenca.

Existen fundamentalmente tres tipos de cuencas: endorreicas, exorreicas y arreicas. Las endorreicas son superficies hidrológicas en las que el punto de salida del agua se encuentra dentro del área. En estos casos el agua fluye dentro de la cuenca y termina en un cuerpo interior.

Las cuencas exorreicas sacan el agua de su superficie y el punto de salida se encuentra en los límites de la misma. Las cuencas arreicas son aquellas en las que el agua se evapora o infiltra tan rápido que no puede escurrir hacia un punto.

Partes de una cuenca

Los elementos que identifican a una cuenca pueden ser visibles o imaginarios, en cualquier caso diferencian a una superficie de drenaje de otra y para efectos de estudio son muy útiles.

La línea que delimita a la superficie, es decir, el perímetro de la cuenca, se llama parteaguas. Este se forma por la unión imaginaria de todos los puntos de mayor nivel topográfico. Las montañas distribuyen el flujo del agua que cae sobre ellas hacia sus lados por fuerzas gravitatorias, por ello, los parteaguas, que se pueden dibujar sobre sus cimas, sirven para dividir una cuenca de otra.

Toda la superficie, vista en planta, y que está delimitada por el parteaguas, se denomina área de la cuenca. El agua fluirá en esta superficie de diferentes maneras y depende de la composición geológica, la topografía del terreno, el uso que se dé al suelo así como lo que hay arriba y debajo de él, etc.

La corriente principal de una cuenca es la línea que sigue el flujo de agua y que la lleva al punto de salida. Una cuenca sólo puede tener una corriente principal, y las que la alimentan se llaman corrientes tributarias. Este subtipo sólo aplica en las cuencas exorreicas.

Las moléculas de agua en su camino hacia la salida de la cuenca, movidas por fuerzas de gravedad y temperatura, van aglomerándose haciendo masas cada vez más grandes, y por ello, más pesadas, lo que las agrupa en diferentes corrientes, es por ello la existencia de las tributarias, quienes finalmente entregan el agua en cotas más bajas a la corriente principal y finalmente la evacúan en la salida de la cuenca.

Una forma de clasificar las corrientes de una cuenca es por su orden, es decir, su posición respecto a la corriente principal. Una corriente de orden 1 es la que no tiene ramificaciones: de donde nace o inicia, a donde entrega el agua en otra corriente; ninguna otra le entrega a ella. La de orden dos es la unión de dos corrientes de orden 1. Una corriente de orden 1 y una de orden 2, así como dos corrientes de orden 2, pueden formar una corriente de orden 3.

El orden general de una cuenca es igual al orden que registra la corriente principal en su salida. La corriente depende de un cauce, es decir, el lecho o la cama donde el agua fluirá.

También existen las corrientes subterráneas: se mueven debajo de la línea de superficie gracias a diferenciales de energía, y dependen del tipo de suelo que se presente, que puede ser muy poroso o poco. El agua llega al subsuelo por infiltración al momento de presentarse la lluvia y puede ser almacenado y moverse por las mismas razones que se mueve en la superficie: fuerzas gravitatorias.

Físicamente, el orden de una cuenca presenta algunas características particulares. Órdenes de corriente pequeñas se observan en donde existen suelos muy resistentes a la erosión o muy permeables, mientras que en indicadores elevados se trata de suelos que se erosionan fácilmente y son impermeables.

También, las corrientes se clasifican dos maneras. La primera es por el tiempo de transporte del agua, y puede ser:

- Perenne: El punto más bajo del cauce se encuentra debajo del nivel de aguas freáticas, lo que hace que la corriente siempre tenga agua; en la época de estiaje este será abastecido por el agua subterránea.
- Intermitente: Transporta agua solamente en temporada de lluvias.
- Efímera: Será el que sólo transporte agua inmediatamente después de una tormenta.

La otra clasificación está definida por su posición topográfica o edad geológica:

- Corriente de montaña o río joven: Presenta grandes pendientes, pocas curvas, altas velocidades en el flujo del agua, los materiales de su cauce constituyen cantos rodados y arrastran muchos sedimentos en suspensión.
- Corrientes de planicie o ríos viejos: Tienen baja velocidad del flujo de agua, los sedimentos se depositan formando numerosos meandros y los cauces se componen de materiales limosos y arenosos.
- Corrientes intermedias: Cauces formados por gravas, las velocidades de flujo se consideran medias y presentan algunas curvas.



Imagen 1.7. Ejemplo de una cuenca. Río Jataté, Chiapas.



Imagen 1.8. Ejemplo de una cuenca. Río Grijalva, Chiapas.

1.3. Pérdida de suelo

1.3.1. Definición

La pérdida de suelo es el proceso por el cual el sustrato natural de una región es alterado, removido y transportado por efectos de la erosión.

La erosión es el fenómeno a través del cual el agua y el viento desprenden y arrastran partículas de suelo. Esto ocurre cuando no hay una capa vegetal que dé protección al suelo, dejándolo desnudo o descubierto y expuesto a estos agentes (Nebel & Wriqth, 1999).

La lluvia genera un proceso erosivo contundente, haciendo en una tormenta un efecto de transporte masivo de partículas de suelo. La energía de las gotas de lluvia produce un impacto en el suelo capaz de romper su estructura terrosa. Las partículas que son desalojadas resbalan en los espacios que existen entre los conglomerados de material, obstruyendo los poros y disminuyendo la infiltración, generando mayor escurrimiento.

Por otra parte, el viento erosiona más lenta y sutilmente al suelo removiendo poco a poco sus partículas.

La capa vegetal disipa la energía de la lluvia y del viento haciendo que el agua y el aire se infiltren con suavidad en el mantillo sin modificar su estructura, logrando un proceso de erosión mínimo o nulo.

En el suelo erosionado la capacidad de sustentar el crecimiento de vegetación es cada vez menor, haciéndolo susceptible a mayor erosión. El proceso erosivo es selectivo, pues priva al suelo de las partículas minerales más pequeñas y del *humus*, dejando materiales terrosos, pedregosos, rocosos y arenosos, desapareciendo el mantillo. Este sustrato no es capaz de retener agua y finalmente genera un fenómeno llamado desertificación.

Causas de la erosión

Se pueden reconocer dos fuentes de erosión: causas naturales y derivadas de la actividad humana; ambas producen la pérdida de cubierta vegetal generando así la pérdida de suelo.

Dentro de las causas naturales se puede nombrar a la actividad sismo-tectónica, que genera avalanchas, deslizamientos de tierra y derrumbes. Se sabe que los materiales ígneos extrusivos, como las cenizas volcánicas, se encuentran en general más sueltos y son susceptibles de movimientos.

La cantidad de lluvia que cae sobre una región puede ser tan extrema que se lleva consigo a la vegetación más enraizada dejando descubierto al suelo.

La orografía de una región, es decir, pendientes extremas, puede generar escasa vegetación, y la inclinación suficiente para desplazar por gravedad al mantillo. Así mismo, la composición mineralógica del suelo puede hacerlo candidato a mayor efecto de erosión.

La tierra y el paisaje son entidades que se modifican constante y naturalmente, siendo la erosión motor de esos cambios y hasta cierto punto necesaria.

La actividad humana como agente de erosión

El uso de suelo que le da el ser humano a la tierra afecta a los procesos naturales de manera directa, generando un impacto significativo y muchas veces irreversible.

La agricultura excesiva necesita de más espacios deforestados para desempeñarse. El arado, utilizado para controlar la maleza y dejar el material más suelto, genera un efecto contrario al oxidar el *humus* en la intemperie. La maquinaria usada en el mundo actualmente, como los tractores, provoca compactación extrema.

Cuando los recursos vegetales se encuentran en el campo, el suelo tiene cierta protección, sin embargo, en la época de cosecha se vuelve a dejar abandonado y vulnerable a los efectos de erosión. En campos de cultivos con pendientes, el agua afecta en temporada de lluvias, pero en terrenos llanos, el aire es el más agresivo.

Una agricultura de rotación no es tan erosiva como la intensiva, pero las exigencias de consumo orillan a la producción con este método, incrementando la erosión y acelerando la desertificación.

La ganadería exige grandes espacios deforestados para el pastoreo así como la plantación de forrajes. Además, el peso del ganado compacta el suelo reduciendo áreas de cultivo o de hábitat vegetal.

Finalmente, la deforestación para efectos de extracción de recursos forestales, cambio de usos de suelo de conservación a habitacional o para explotación mineral, es la causante de la erosión del suelo. Si el bosque es talado, el suelo queda expuesto y nada lo retiene a ser modificado y transportado.

1.3.2. Estimación de la pérdida de suelo con el modelo *USLE*

Existe un modelo resultante de un método empírico muy popular para el cálculo de la pérdida de suelo o erosión. Se creó con el fin de analizar el fenómeno en terrenos de uso de suelo agrícola. Sin embargo, debido a la participación de muchas variables (clima, tipo de suelo, técnicas de conservación y uso de suelo previo) puede ser aplicado a terrenos de cultivo o forestales.

Este modelo procede del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*USDA*), quien trabajó desde principios de siglo en el tema y consiguió analizar más de 10 mil parcelas por año,

para que en 1954 presentara la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, o más conocida como *USLE (Universal Soil Loss Equation)* (Mancillar E., 2008).

El modelo *USLE* ha sido probado en campos de todo el mundo, para verificar su eficacia en el estudio de erosión, pues fue desarrollada para suelos de Estados Unidos, incluyendo Puerto Rico y Hawaii.

Cuando se ingresan los datos, obtenidos de complejos estudios hidrológicos y climatológicos, forestales y edafológicos, se obtiene el volumen anual de suelo que se está moviendo por unidad de hectárea.

Modelo *USLE*

La pérdida de suelo del modelo *USLE* está expresada en la ecuación 1.1.

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1.1)$$

Dónde:

A : Pérdida anual de suelo, expresado en unidades escogidas para *K* y periodo abarcado en *R* ,
 $\left[\frac{\text{Ton}}{\text{ha} * \text{año}} \right]$

R : Erosividad de la lluvia, $\left[\frac{\text{MJ} * \text{cm}}{\text{ha} * \text{h}} \right]$

K : Erodabilidad del suelo, $\left[\frac{\text{Ton} * \text{ha} * \text{h}}{\text{MJ} * \text{ha} * \text{cm}} \right]$

L : Longitud de la pendiente, [*m*]

S : Pendiente

C : Cubierta vegetal y manejo del recurso

P : Técnica de conservación aplicada (cultivo en contorno, fajas o terrazas)

A continuación se describe la metodología de análisis y la obtención de todos los miembros de la ecuación de *USLE*.

Erosividad de la lluvia con el Método normal de USLE

El factor R de erosividad corresponde a la sumatoria de los productos de las energías de todos los eventos de lluvias erosivas anuales con sus respectivas intensidades máximas en 30 minutos, lo cual da una idea de la agresividad con que la precipitación influye en el proceso de degradación del suelo por erosión hídrica (ecuación 1.2).

$$R = \sum E * I_{30} \quad (1.2)$$

Pasos para calcular la R :

- Determinar si la lluvia es mayor a $12.7mm$. Para ello es necesario verificar los registros pluviográficos, recordando que se consideran eventos de lluvia distintos a los separados por lo menos 6 horas.
- Obtener la intensidad media en milímetros por hora (mm/h), para cada intervalo de igual pendiente existente en la curva pluviográfica de la respectiva tormenta.
- Para cada intervalo de precipitación fijado aplicar la ecuación 1.3.

$$e = 0.119 + 0.0873(\log I_M) \quad (1.3)$$

Donde I_M es la intensidad de la lluvia medida para el respectivo intervalo y entrega la energía de cada milímetro de agua caída en él. Esta fórmula es válida para intensidades de lluvia menor o iguales a $76mm/h$, y su resultado es en mega- Joules por hectárea y milímetro ($MJ/ha mm$).

Para el caso en que la intensidad del intervalo es superior a $76mm/h$, la energía de un milímetro de agua caída se asume igual a $0.283MJ/ha mm$.

- Calcular la energía total del intervalo, la cual es igual al valor calculado en el paso anterior, multiplicado por el total de los milímetros de agua caída en dicho lapso (ecuación 1.4).

$$E_i = e_i pp_i \quad (1.4)$$

En donde E_i es la energía total del intervalo i del evento de precipitación considerado, e_i corresponde a la energía por milímetro calculada en el paso anterior para cada intervalo y pp_i es el total de milímetros de lluvia caídos en el intervalo considerado.

- Determinar la energía total de la tormenta E , a través de las sumas de las energías calculadas para cada intervalo (ecuación 1.5).

$$E = \sum_1^n E_i \quad (1.5)$$

- f) Determinar la intensidad máxima en 30 minutos del evento de lluvia considerado I_{30} . Si el registro pluviográfico está graduada cada hora puede realizarse una división extra para establecer valores cada media hora. Si la graduación es cada dos horas, tratar de dividir al menos hacia una. Es conveniente, en todo caso, efectuar una apreciación visual inicial de las tendencias pluviográficas, dado que muchas veces los intervalos de mayor intensidad pueden ser detectados así con bastante facilidad.
- g) Efectuar el producto de la energía total del evento con la intensidad máxima en 30 minutos ($E * I_{30}$), lo cual constituye la erosividad total de la tormenta considerada.
- h) Determinar el factor R (ecuación 1.6), mediante la suma de las respectivas erosividades de cada una de las tormentas anuales superiores a $12.7mm$:

$$R = \sum_1^n (E * I_{30})_i \quad (1.6)$$

En donde j va de 1 a n tormentas producidas en la respectiva temporada.

Debe reiterarse el hecho de que, de disponerse de varios años de registro pluviográfico, podrá establecerse un factor R promedio más representativo del sector o área en estudio.

Erosividad de la lluvia con el Método alternativo

Cuando se tienen datos diarios o mensuales, existen metodologías complementarias que tienden a buscar la determinación del factor R a partir de dicha información. Estos métodos se basan en el índice de Fournier (IF), el cual emplea para sus cálculos las precipitaciones totales mensuales en la forma mostrada en la ecuación 1.7.

$$IF = \frac{p^2}{P} \quad (1.7)$$

En donde p corresponde a la precipitación del mes más lluvioso (mm) y P al total anual de caída de agua (mm); o bien en el índice modificado de Fournier (IMF , elaborado por Arnoldus, 1977), que se especifica como en la ecuación 1.8.

$$IMF = \sum_1^{12} \frac{p_i^2}{P} \quad (1.8)$$

Con p_i como la precipitación mensual del mes i , el cual va de enero a diciembre del correspondiente año. En este contexto, es necesario efectuar ajustes de regresión entre el factor R calculado por el método $USLE$ y el correspondiente IF o IMF . Para ello se requiere al menos de 3 años de datos concretos.

No obstante lo anterior, es usual ver que el índice original de Fournier (IF) es empleado como reemplazo directo del factor R para cálculos en donde la falta de datos es dramática. Debe hacerse notar que la precisión o bondad de la predicción del índice de erosividad R a través de este método alternativo podría ser discutible para los más puristas. No obstante, esto permite entregar índices comparativos y soluciones bastantes prácticas cuando no existen datos suficientes y se requiere de una consultoría rápida y económica.

Erodabilidad del suelo

El factor de erodabilidad del suelo puede ser estimado de manera directa a través de una ecuación, o bien de manera gráfica. Para ambos métodos es necesario, sin embargo, efectuar determinaciones previas de ciertas propiedades que se revisan a continuación:

- Textura: Se determina a través del método de la pipeta³, de tal manera de conocer los montos de arena, arenas finas, limo y arcilla. De acuerdo a los manuales originales de *USLE*, para efectos de la erosión del suelo la arena muy fina se comporta similar al limo.
- Materia orgánica: Se estima su proporción porcentual dentro del suelo, para lo cual se efectúa un análisis de Walkley- Black⁴ a las muestras obtenidas. Según *USLE*, el porcentaje de materia orgánica oscila entre 0 y 4%, con valores de números enteros. Si el contenido fijado es más que el rango especificado, se asume 4%.
- Estructura del suelo: Se efectúa su determinación mediante observación visual y tacto. Para ello es recomendable en un principio, emplear algún manual para comparación. De acuerdo a *USLE*, las categorías y códigos empleados son cuatro y se muestran en la Tabla 1.6 (pág. 41).
- Permeabilidad del suelo: En *USLE* se asignan seis valores o códigos diferentes de acuerdo a la permeabilidad de un suelo determinado, como se muestra en la Tabla 1.7 (pág. 41).

El factor K en el sistema internacional de unidades es expresado en $\left[\frac{\text{Ton} * \text{ha} * \text{h}}{\text{MJ} * \text{ha} * \text{cm}} \right]$, que expresa la resistencia del suelo en superficie y tiempo, respecto a la energía de lluvia.

Método de la ecuación para el cálculo de la erodabilidad del suelo

Una vez realizado el análisis de textura y determinado los valores o códigos de materia orgánica, estructura y permeabilidad, se está en condiciones de calcular el factor K . Al respecto, se establece en *USLE* una ecuación para el factor de erodabilidad en la forma mostrada en la ecuación 1.9.

³ Pasar el material por la serie numerada de tamices para conocer su granulometría. Prueba granulométrica.

⁴ Serie de reacciones químicas que implican la oxidación del CO₂ contenido en una muestra de suelo. Carreira, Daniel. Carbono orgánico (Método de Walkley- Black).

$$K = 1.313 \frac{[(2.1)(10^{-4})(12 - MO)(M^{1.14}) + (3.25)(s - 2) + (2.5)(p - 3)]}{100} \quad (1.9)$$

En donde MO corresponde al porcentaje de materia orgánica del suelo; s es el código de la estructura del suelo; p es el código de la permeabilidad; y M (ecuación 1.10) es un factor dado por el producto de la suma de los porcentajes de limo y arena muy fina con la suma de los porcentajes de arena y limo.

$$M = (\%(\text{limo} + \text{arena fina}))(100 - (\% \text{arcilla})) \quad (1.10)$$

Cabe señalar que esta ecuación es válida para suelos que tienen 70% o menos de fracción limosa.

Método gráfico para calcular Erodabilidad del suelo

El método gráfico o nomograma de erodabilidad (Figura 1.7, pág. 49) es la manera más tradicional de estimar el factor K y representa la misma ecuación (ecuación 1.9) del método anterior.

La determinación gráfica del factor de erodabilidad se efectúa proyectando siempre líneas rectas en el interior del nomograma. Se comienza ingresando con el porcentaje de limo más arena muy fina en el gráfico izquierdo. A partir de este valor, se proyecta una línea hasta interceptar la correspondiente curva representativa del porcentaje de arena del suelo en cuestión. Desde ese punto se proyecta verticalmente una línea hasta topar con la curva que representa el porcentaje de materia orgánica del suelo. Desde allí se continúa hacia la derecha, cruzando la primera aproximación del valor K , la cual es útil si no se dispone de los antecedentes de estructura o permeabilidad. De esta manera, se ingresa al gráfico derecho, continuando la proyección realizada, hasta interceptar la línea correspondiente al código de estructura del suelo en cuestión. Desde ese punto, se desciende por el gráfico hasta topar la línea que representa el código de permeabilidad adecuado al suelo en estudio. Finalmente, desde ese punto se traza la línea recta hacia la izquierda del gráfico, hasta encontrar el factor correspondiente de erodabilidad del suelo K .

Longitud de la pendiente y pendiente

La inclusión de los factores topográficos agrega matices importantes en el modelo *USLE*. En términos simples, el grado de inclinación de un terreno S entrega el componente de gravedad necesario para comenzar el movimiento del flujo concentrado y otorgarle velocidad, mientras que la longitud de la pendiente L es un factor que condiciona el volumen de agua que fluye en una ladera determinada, y por lo tanto el esfuerzo de corte que el flujo tiene.

Otra variable topográfica de no menos relevancia es la forma de la pendiente. En efecto, la convexidad o concavidad de una ladera puede determinar el aumento de velocidad del flujo

concentrado, o bien su reducción y estancamiento. Este tema no está explícitamente expresado en la *USLE*, sin embargo, a través de la segmentación en trazos menores de similar pendiente se pueden representar pendientes complejas o múltiples, ya sean cóncavas o convexas.

Cálculo de L y de S

Originalmente los factores L y S fueron determinados en conjunto como en la ecuación 1.11.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{72.6} \right)^m (65.41 \text{sen}^2(\alpha) + 4.56 \text{sen}(\alpha) + 0.065) \quad (1.11)$$

Con λ como la longitud de pendiente en pies, α el ángulo de pendiente y m un coeficiente que toma valores mostrados en la Tabla 1.8 (pág. 41).

Al igual que el caso del factor de erodabilidad, esta fórmula de determinación de LS fue esquematizada en un gráfico (Figura 1.8, pág. 50) que permite su estimación directa.

Para evitar la conversión de unidades, es conveniente utilizar la forma de LS descrita por Arnoldus (1977) (ecuación 1.12).

$$LS = \left(\frac{\gamma}{22.1} \right)^{0.6} \left(\frac{s}{9} \right)^{1.4} \quad (1.12)$$

Donde γ representa la longitud de la ladera en pendiente (en metros), y s es el porcentaje de dicha inclinación. Nótese las divisiones por 22.1 y por 9 en la ecuación, lo que representa las respectivas razones de la ladera considerada sobre la longitud y grado de pendiente de la parcela estándar *USLE*. Además podrá verificarse, de acuerdo a los exponentes de dicha ecuación, que el grado de inclinación del terreno tendría un peso relativo mayor que la longitud de la ladera.

Cálculo de L y S en pendientes compuestas

Como fue mencionado, la forma de la pendiente es una variable bastante importante que puede ser considerada para los cálculos de erosión de suelos. Una forma de abordar dicho efecto es dividiendo las laderas a considerar en distintos trazos, de tal manera de encontrar una representación promedio de los factores topográficos. Este método permite por consiguiente, incorporar el cálculo de *USLE* laderas complejas, poco homogéneas en cuanto a la pendiente.

Para determinar LS en laderas de pendientes compuestas se establecen dos supuestos:

- i. Los cambios en la pendiente no son suficientes para implicar deposición.

- ii. Las laderas pueden ser divididas en segmentos pequeños de igual longitud y de un grado de pendiente interna uniforme.

Los pasos para la determinación de LS , una vez establecidos los segmentos, son:

- a. Listar los segmentos desde el extremo superior hacia el inferior.
- b. Utilizar la fórmula o gráfico normalmente, considerando el largo total de la pendiente, pero con grados de inclinación variables según segmento; obtener LS para cada segmento.
- c. Utilizar la siguiente fórmula para determinar la proporción de suelo perdido según segmento (ecuación 1.13).

$$\text{Fracción de pérdida de suelo} = \frac{i^{m+1} - (i-1)^{m+1}}{N^{m+1}} \quad (1.13)$$

Donde i es el número secuencial del segmento, m es el exponente de largo de pendiente, y N es el número total de segmentos considerados. El valor de m corresponderá a 0.5 si la pendiente del segmento es mayor o igual a 5%; 0.4 si la pendiente del segmento es de 4%; y 0.3 si la inclinación del segmento es menor o igual a 3%.

- d. Multiplicar LS obtenido por cada segmento por la fracción de pérdida de suelo. Sumar los productos.

El usuario es quien debe tomar la decisión acerca de si emplear el método de pendiente irregular, de no tener clara la situación, es de todas maneras recomendable efectuar determinaciones de pendiente de la manera más exhaustiva posible, o bien contar con cartografía topográfica de la más alta resolución.

Cubierta vegetal y manejo del recurso

El factor C de $USLE$ representa el grado de protección que un determinado tipo de cubierta vegetal ofrece al suelo, en oposición al resto de las variables que facilitan la erosión hídrica. En otras palabras, en el factor C están representados los efectos de cubrimiento de la vegetación, el efecto protector de los residuos vegetales incluida la hojarasca y la agregación de que tienen las raíces en el suelo. En sí, el factor C aparece como el más subjetivo, especialmente en materias de índole forestal, puesto que su determinación aúna antecedentes puntuales de investigaciones, más que de datos resultantes de una planificación seria y constante. El caso de los suelos de cultivo es diferente, dado que $USLE$ fue establecida primordialmente para este tipo de terrenos y la gran mayoría de los datos y parámetros existentes derivan de ellos. El factor C para cultivos agrícola incluye los efectos de labores anexas, tales como preparación del sitio, época de siembra y rotaciones usuales para diferentes tipos de clima y suelo.

En general, para determinar el factor C existen tabulaciones y no ecuaciones. Lo anterior radica en el hecho de concentrar los resultados de las diversas parcelas que originalmente se distribuyeron en Estados Unidos para calibrar la ecuación. Como se mencionó, para terrenos agrícolas las tabulaciones de C pueden considerarse más precisas, puesto que poseen mayor número de datos. Al contrario, para sitios forestales las tabulaciones denotan un sesgo importante, que obliga muchas veces a efectuar varios supuestos.

La determinación del factor C para cultivos agrícolas requiere el detalle de todas las labores de la rotación y sus equivalentes por periodo de rotación. Estas supuestas pueden ser entregadas por *USLE*. En el caso de bosques con manejo, sería entonces igualmente importante poder incorporar el detalle de cobertura, rotación, época del año, cortas inmediatas, residuos, etc., todos los cuales influyen en C . Sin embargo, *USLE* no es capaz de entregar las alternativas para valorar C en dichas circunstancias.

Valores tabulados para terrenos boscosos usados en el cálculo de cubierta vegetal y manejo del terreno

Originalmente *USLE* entrega tabulaciones para valores de C en áreas boscosas de ciertas características: i) terrenos forestales inalterados, ii) terrenos forestales empleados para pastoreo, quemados o cosechados de manera selectiva, y iii) terrenos forestales que han tenido labores de preparación de sitio post cosecha y están en vías de o han sido recientemente restablecidos. Para el primer caso, bosques inalterados, los valores se presentan en la Tabla 1.9 (pág. 42).

Los valores anteriores de C son válidos para áreas boscosas con más de 20% de cobertura arbórea, o bien en situaciones en que las hojas secas que forman una capa sobre el suelo superan un 40%. Puede observarse los amplios rangos de variación propuestos para C , los cuales, según Wischmeier y Smith (1978), se deben a la variación en porcentajes de esta capa y en la cobertura y profundidad del dosel arbóreo, pero también denotan la falta de datos ya mencionada de *USLE* para terrenos forestales. De estudios anexos, se pueden obtener datos relacionados a *USLE* en situaciones locales.

Para el caso de terrenos forestales pastoreados, quemados o con cosecha selectiva, el empleo de valores se hace con la Tabla 1.10 (pág. 42).

Los valores de C obtenidos del cuadro deben ser además ponderados por 0.7, factor que presenta el efecto que los aportes de residuos u hojarasca del bosque anterior (o bien actual) han efectuado sobre el suelo. La altura media de caída de gotas no indica la longitud de los árboles, sino que la altura desde la cual caen las gotas tras escurrir por el dosel. En este caso, en las últimas filas del cuadro se podría asumir que el follaje comienza a los cuatro metros de altura del árbol.

Para los terrenos forestales que han sido cosechados y, posteriormente, han tenido alguna labor de preparación de sitio para futuro restablecimiento de la plantación, o bien ésta ha sido reciente,

USLE recomienda emplear la Tabla 1.11 (pág. 43). Sin embargo, se hace mención a que dichos valores emanaron de datos puntuales y poco abundantes provenientes de bosques sureños de Pináceas de Estados Unidos, por lo cual podrían no funcionar de buena manera en otras condiciones y climas.

Factor C por el método de los sub factores

La complejidad de los sistemas boscosos obligó al Servicio Forestal de Estados Unidos, dependiente del Departamento de Agricultura (*USDA Forest Service*), a tratar de representar más fielmente la determinación del factor C en ecosistemas forestales. Es por ello que se elaboró la *Guía para la predicción de erosión laminar y concentración en terrenos forestales*, por parte de Dissmeyer y Foster (1984). En dicho documento se establece que el factor C en terrenos forestales puede ser obtenido evaluando una serie de nueve sub factores, los cuales son:

- Proporción de suelo desnudo
- Cubierta del dosel
- Alto contenido orgánico
- Raíces finas
- Efecto de enlace residual
- Almacenamiento *in situ*
- Secuencia de saltos en el terreno
- Labranza en contorno, el cual es más bien determinado por el factor P de prácticas de conservación de suelos, a revisar más adelante en este documento.

El factor C es absoluto en el producto de esos nueve sub factores. Sin embargo, el usuario debe evaluar si todos los sub factores son aplicables a una determinada situación o no. A continuación se hará una revisión de cada sub factor, para posteriormente avanzar hacia la estimación de su valor.

a) Sub factor de proporción de suelo desnudo

En general, se considera que desechos vegetales y rocas protegen al suelo contra los agentes de erosión hídrica y favorecen indirectamente a la condición de una mayor capacidad de infiltración del suelo. A condiciones similares del suelo desnudo menor al 100%, la erosión será siempre menor en los suelos bajo bosque. Esto se debe a que en suelos agrícolas, especialmente bajo cultivos, la falta de cobertura vegetal es continua, por lo cual escurrimiento puede generarse y alcanzar mayor velocidad y esfuerzo de corte. En terrenos boscosos, las zonas sin cobertura corresponden por lo general a áreas sin conexión, hecho que impide la continuidad del flujo de escurrimiento que podría generarse en ellos y favorece la infiltración.

b) Sub factor de cubierta del dosel

Este sub factor considera el efecto del dosel de las diversas cubiertas vegetales, en su acción de interceptar el agua de lluvia. El agua podrá posteriormente evaporarse, o bien alcanzar de todas maneras piso a través del escurrimiento fustal o goteo. El efecto del goteo puede, incluso, ser más perjudicial que el impacto de la lluvia, puesto que las gotas formadas en el follaje y ramas del árbol pueden alcanzar gran tamaño y, por ende, una velocidad de caída considerable. Es necesario enfatizar que este sub factor debe aplicarse sólo a sitios desnudo bajo la cubierta de dosel, puesto que donde existen residuos sobre el suelo se emplea el sub factor de la proporción del suelo desnudo, ya revisado con anterioridad. Se especifica en la Tabla 1.12 (pág. 43).

c) Sub factor de reconsolidación del suelo

Un suelo que ha sido labrado o intervenido en general, tiende a disminuir su erodabilidad con el tiempo, lo cual se denomina reconsolidación del suelo. Al respecto, Dissmeyer y Foster (1984) señalan que las experiencias indican que la máxima reducción de la erodabilidad sería de un 45%, lo cual ocurriría a partir del séptimo año sin labranza. Es por ello que se estima como 0.45 el valor mínimo de este sub factor, aumentando de acuerdo a las temporadas desde el último laboreo del suelo.

d) Sub factor del alto contenido orgánico

Si se revisan las condiciones del cálculo del factor K de erodabilidad del suelo, se recordará que el contenido de materia orgánica tiene un límite máximo de 4%, es decir, aunque sea mayor se asume como 4%. El sub factor del alto contenido orgánico pretende entonces subsanar ese sesgo, usando un valor de 0.7 sólo en los casos donde, aparte de que el contenido orgánico sea mayor de 4%, tenga también una profundidad de 2.5 centímetros en el perfil del suelo. Si no cumple con dichas características, el valor del sub factor es 1.

e) Sub factor de raíces finas

Este sub factor tiene como finalidad representar el efecto protector que las raíces finas tienen en el suelo, especialmente en los primeros 5 centímetros del perfil edáfico. Se hace notar que la red de raíces finas cumple su función protectora aún después de que la cubierta vegetal ha sido removida, manteniendo el suelo en su lugar y repeliendo las fuerzas erosivas de la gota de lluvia y el escurrimiento superficial. Para evaluar este factor se requiere bastante observación de la porción desnuda del suelo. No obstante, si la maquinaria ha removido los primeros centímetros de suelo, ya sea por arado, subsolar⁵ u otra técnica, entonces este sub factor toma el valor 1. Dissmeyer y Foster (1984) señalan como una guía para estimar este sub factor, efectuar micro parcelas de un cuarto de pulgada cuadrada de área (1.61 cm^2), en las cuales las raíces finas deben

⁵ Subsolar: Remover el suelo por debajo de la capa arable, o roturar a bastante profundidad, sin voltear la tierra. <http://es.thefreedictionary.com/subsolar>

estar presentes en cada una de dichas micro parcelas, sin exclusión. De lo contrario, el sub factor toma el valor de 1.

f) Sub factor del efecto de enlace residual

Cuando hay un cambio de uso de suelo, y éste es intervenido, la historia previa del sitio sólo tiene efectos sobre la erodabilidad del lugar. Esto es, si dicho terreno estaba previamente cubierto por vegetación, tendrá una erosión reducida al principio, aumentando posteriormente si continúa en su nueva condición de labranza. Este efecto se debe a la buena estructuración del suelo, ya que aún existen efectos de agregación de partículas edáficas por parte de las raíces y la materia orgánica remanentes. Se distinguen 4 situaciones referidas a este sub factor:

- El suelo superficial tiene una buena red de raíces finas, mientras que el sub suelo tiene buena estructura y permeabilidad.
- El suelo superficial tiene una red de raíces finas muy pobre, mientras que el sub suelo tiene una buena estructura y permeabilidad.
- Se ha perdido el suelo superficial, pero existe una red de raíces finas muy pobre, mientras que el sub suelo tiene buena estructura y permeabilidad.
- Se ha perdido el suelo superficial, pero existe una red de raíces finas muy pobre, mientras que el sub suelo tiene una pobre estructura y permeabilidad.

g) Sub factor de almacenamiento *in situ*

Las partículas de suelo que son removidas no necesariamente serán transportadas hacia el final de la cuenca o liberadas en el curso de agua de desagüe. En efecto, muchas partículas serán depositadas o retenidas en cavidades, depresiones u otros obstáculos ubicados en la ladera. El sub factor de almacenamiento *in situ* evalúa este efecto, para lo cual existen algunos valores refrendados por Dissmeyer y Foster (1984) (Mancillar E., 2008). No obstante, se recomienda observar cuidadosamente la presencia de depresiones u obstáculos en terreno y su cercanía a los puntos en que se produce erosión. La Tabla 1.13 (pág. 44) entrega valores para este sub factor.

h) Sub factor de la secuencia de saltos en el terreno

Los saltos corresponden a la estructura tipo peldaño que se forma en el terreno por diversos factores, tales como el efecto acumulador de partículas de suelo que tienen residuos vegetales, rocas, tocones u otros obstáculos en el terreno, el paso de ciertas maquinarias, etc. Estos peldaños o saltos tienen la particularidad de reducir la pendiente en sus secciones horizontales, y se consideran no sistemáticos, sino que distribuidos al azar.

Es por ello que no se cuentan los saltos ocasionados por maquinaria de labranza agrícola usual, tales como arados. Para evaluar este sub factor debe primero estimarse la proporción del terreno que posee saltos y luego aplicar la fórmula para pendientes irregulares, como fue descrito en el

apartado donde se estudió la longitud y la pendiente del terreno, considerando factores de C para cada segmento. No obstante, se entrega la Tabla 1.14 (pág. 44) con valores para el sub factor.

i) Sub factor de labranza en contorno

Este sub factor pretende evaluar el efecto que ocasiona el labrado mediante arado o subsolado en el terreno forestal. Esto es positivo si se efectúa en contorno (siguiendo la curva de nivel), puesto que reduce el escurrimiento superficial respecto a una ladera sin labranza. En ese caso, conviene evaluar el proceso a través del factor P de *USLE*. No obstante, si el labrado es angulado respecto a la curva de nivel, el efecto varía y es necesario evaluarlo de manera diferente. En la Tabla 1.15 (pág. 44) se aprecia el sub factor.

Evaluación de los sub factores

Para determinar cada uno de los sub factores es necesario considerar dos situaciones: suelos forestales a los cuales se les hizo algún tipo de labranza (subsolados por ejemplo) y suelos forestales a los cuales no se les hizo labranza o preparación alguna.

i. Tablas especiales para suelos forestales no labrados

Corresponde a la situación más común en los suelos forestales. A este respecto, se ha desarrollado una tabla que combina algunos de los sub factores y permite determinar los valores respectivos (Tabla 1.16, pág. 45).

ii. Tablas especiales para suelos forestales labrados

Al igual que en el caso anterior, en terrenos de uso forestal existirían efectos combinados de algunos sub factores, como también existe una tabla especial para el sub factor de raíces finas. En el caso de los sub factores combinados, las tablas difieren de acuerdo a las categorías revisadas en el sub factor de efecto de enlace residual (tablas Tabla 1.17, Tabla 1.18, Tabla 1.19, Tabla 1.20 y Tabla 1.21, págs. 45, 46 y 47).

Diferencia en el uso de C directo y el uso de subfactores

Es el nivel de detalle de la información recabada el que faculta para emplear uno u otro método estimador del factor C .

El método de los sub factores responde a una necesidad de ajustar más fielmente las condiciones de los terrenos forestales. En rigor, sus resultados deben ser más aproximados a lo real. Sin embargo, los valores que aparecen en sus respectivas tablas responden en general a un reducido número de datos experimentales, los cuales podrían no ajustarse a la realidad de diversos

sistemas forestales, ya que responden a estudios en parcelas y cuencas de los estados de Tennessee, Carolina del Sur y Mississippi.

Por otra parte, precisar la pertenencia de emplear uno u otro método es decisión del profesional o técnico a cargo del estudio y del mandante, toda vez que la mayor demanda de datos e información de terreno redundan también en un incremento de los costos.

Valores tabulados para sitios de Construcción usados en el cálculo de Cubierta vegetal y manejo del terreno

En los casos en que se aplican técnicas para reducir los impactos de las gotas de lluvia y del escurrimiento superficial en sitios de construcción, es necesario evaluar la efectividad de las alternativas propuestas o empleadas. Para ello también puede utilizarse *USLE*, ya que dispone de algunos valores para el factor C con coberturas artificiales. Esto es útil, por ejemplo, cuando se trabaja en control de taludes o en asesorías para parques u otros centros recreativos, en los cuales puede solicitarse la competencia profesional de un ingeniero civil, forestal o un experto afín. En este contexto, la Tabla 1.22 (pág. 48) entrega algunos de los valores para el factor C y que son aplicables en áreas de construcción según se ha referido, haciendo la salvedad de que no hay cobertura vegetal alguna y que se debe ser sensato al interpolar o extrapolar valores.

Factor de técnica de conservación aplicada

Muchas veces la presencia de vegetación no evita la producción de escurrimiento superficial. En este sentido, el empleo de prácticas de conservación en el suelo minimiza el efecto del flujo de agua. Al respecto, *USLE* incluye un factor P de prácticas de conservación para tres situaciones:

- El empleo de labranza siguiendo curvas de nivel (cultivo en contorno)
- El empleo de fajas de cultivo⁶ en contorno
- El empleo de terrazas

El cultivo en contorno es tal vez lo más aplicable al sector forestal, dado que las plantaciones se establecen siguiendo en general las curvas de nivel. Su efectividad, en todo caso, disminuye con el mayor grado de pendiente del terreno y también con la mayor longitud de la ladera en cuestión. Por el contrario, su efecto protector es mayor si los residuos de la cosecha anterior se apilan en el sentido de las curvas de nivel. Los valores de P para esta condición se presenta la Tabla 1.23 (pág. 49).

El empleo de fajas de cultivo en contorno consiste en el establecimiento de fajas del cultivo de interés intercaladas con otras de residuos o pastos. Este sistema no es empleado en cultivos forestales, por lo cual no será mayormente tratado.

⁶ Cultivo de fajas de cultivo en contorno: Sembrar en líneas o surcos transversales a la pendiente máxima del terreno. <http://es.scribd.com/doc/74169559/Cultivos-en-Contorno>

El uso de terrazas es también efectuado de manera preferente en los cultivos agrícolas, sin embargo se ha extendido, aunque aún en forma incipiente, a los sistemas de producción forestal. A este respecto, la tabla entrega una sección de los valores de P para terrenos forestales, en el caso hipotético del establecimiento de terrazas y plantación en curvas de nivel sobre ellas.


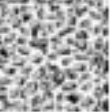




Código USLE	Tipo de estructura	
1	Granular muy fina	
2	Granular fina	
3	Granular media a gruesa	
	Bloques	
4	Laminar	
	Masiva	

Tabla 1.6. Códigos de estructura del suelo de USLE (Mancillar E., 2008)

Código USLE	Categoría de Permeabilidad		
1	Rápida	más de	12.7 cm/h
2	Moderada a rápida	6.3	12.7 cm/h
3	Moderada	2.0	6.3 cm/h
4	Lenta a moderada	0.5	2.0 cm/h
5	Lenta	0.13	0.5 cm/h
6	Muy Lenta	menor de	0.13 cm/h

Tabla 1.7. Códigos USLE de permeabilidad de suelo (Mancillar E., 2008)

α	s	
0.5	mayor de	5%
0.4	3.5	4.5
0.3	1.0	3.0
0.2	menor de	1.0

Tabla 1.8. Valores de m (Mancillar E., 2008)

Porcentaje de cobertura de árboles y sotobosque		Porcentaje de cobertura de la hojarasca		Factor <i>C</i>	
100 -	75	100 -	90	0.0001-	0.001
70 -	45	85 -	75	0.002-	0.004
45 -	20	70 -	40	0.003-	0.009

Tabla 1.9. Valores de C para terrenos forestales sin alterar (Wischmeier y Smith, 1978) (Mancillar E., 2008)

Cobertura aérea		Cubierta superficial en contacto con el terreno						
Tipo y altura	% Cobertura aérea	% de suelo cubierto						
		Tipo	0	20	40	60	80	95 +
No apreciable		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.012	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
Herbáceas, pastos largos o matorral con altura media de caída de gotas menos a 0.09 metros	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		W	0.36	0.2	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
Arbustos o matorrales, con altura media de caída de gotas de 1.95 metros	25	G	0.40	0.18	0.09	0.04	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.078	0.04	0.011
Árboles, pero sin apreciable	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
Cubierta arbustiva o de matorral. Altura media de caída de gotas de 4 metros	50	G	0.39	0.18	0.09	0.04	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.084	0.042	0.011

G: Cubierta superficial está compuesta por pastos o material en descomposición; W: la cubierta superficial está compuesta de herbáceas con poca cobertura radicular o residuos no descompuestos.

Tabla 1.10. Factor C para praderas permanentes, terrenos baldíos y bosques pastoreados (adaptado de Wischmeier y Smith, 1978) (Mancillar E., 2008)

Preparación del sitio	Cobertura de mantillo	Condición del suelo y cobertura de malezas							
		Excelente		Buena		Regular		Pobre	
		NC	WC	NC	WC	NC	WC	NC	WC
Discado, rastrillado o preparado para semillas	0	0.52	0.2	0.72	0.27	0.85	0.32	0.94	0.36
	10	0.33	0.15	0.46	0.2	0.54	0.24	0.60	0.26
	20	0.24	0.12	0.34	0.17	0.40	0.20	0.44	0.22
	40	0.17	0.11	0.23	0.14	0.27	0.17	0.30	0.19
	60	0.11	0.08	0.15	0.11	0.18	0.17	0.20	0.15
	80	0.05	0.04	0.07	0.06	0.09	0.08	0.10	0.09
Quemas	0	0.25	0.10	0.26	0.10	0.31	0.12	0.45	0.17
	10	0.23	0.10	0.24	0.10	0.26	0.11	0.36	0.16
	20	0.19	0.10	0.19	0.10	0.21	0.11	0.27	0.14
	40	0.14	0.09	0.14	0.09	0.15	0.09	0.17	0.11
	60	0.08	0.06	0.09	0.07	0.10	0.08	0.11	0.08
	80	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06	0.05
Trituración de residuos	0	0.16	0.07	0.17	0.07	0.2	0.08	0.29	0.11
	10	0.15	0.07	0.16	0.07	0.17	0.08	0.23	0.10
	20	0.12	0.06	0.12	0.06	0.14	0.07	0.18	0.09
	40	0.09	0.06	0.09	0.06	0.1	0.06	0.11	0.07
	60	0.06	0.05	0.06	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05
	80	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04

NC: Sin vegetación viva; WC: Con un 75% de pasto y malezas, implicando una altura media de goteo de 1.27m.

Tabla 1.11. Factor C para áreas de bosques alteradas mecánicamente con métodos de preparación de sitio (Wischmeier y Smith, 1978) (Mancillar E., 2008)

Altura del dosel en metros	Porcentaje de suelo desnudo cubierto por algún dosel										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.50	1.00	0.91	0.83	0.74	0.66	0.58	0.49	0.41	0.32	0.24	0.16
1.00	1.00	0.93	0.86	0.79	0.72	0.65	0.58	0.51	0.44	0.37	0.30
2.00	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
4.00	1.00	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.84	0.82	0.79	0.76	0.74
6.00	1.00	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.92	0.90	0.89	0.87	0.85
8.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92
16.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96
20.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 1.12. Valores para el subfactor de la cubierta del dosel (Dissmeyer y Foster 1984) (Mancillar E., 2008)

Situación	Valor de sub factor
Ladera sin depresiones, plana en superficie.	1.0
Almacenamiento entre agregados de suelo de 2.5cm de diámetro.	0.9
Almacenamiento entre agregados de suelo de 5cm de diámetro.	0.8
Almacenamiento entre agregados de suelo de 10cm de diámetro.	0.7
Almacenamiento entre agregados de suelo de 15cm de diámetro.	0.5
Almacenamiento en huellas de tractor ubicadas en contra de la pendiente principal.	0.8
Almacenamiento en cavidades dejadas por tocones o por la marca de un aspa de arado.	0.8
Almacenamiento en represas creadas por residuos vegetales o trozos de fuste o ramas, ubicados en contra de la pendiente principal.	0.8
Almacenamiento en sectores arados o excavados en contra de la pendiente principal, con poco suelo desnudo y más hojarasca, hendiduras de 15cm.	0 a 0.2
Almacenamiento en sectores arados o trabajados con hendiduras de 2.5cm, en contra de la pendiente principal, con suelo desnudo en áreas entre hendiduras.	0.8
Almacenamiento en sectores arados a favor de la pendiente principal.	0.9

Tabla 1.13. Valores para el sub factor de almacenamiento in situ, en el cual las características enunciadas son sistemáticamente continuas espacialmente (Dissmeyer y Foster, 1984) (Mancillar E., 2008)

Pendiente (%)	Porcentaje de la ladera con estructuras de saltos										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.94	0.93	0.92
6	1.00	0.97	0.94	0.92	0.89	0.86	0.84	0.81	0.78	0.76	0.73
7	1.00	0.96	0.92	0.88	0.84	0.80	0.75	0.71	0.67	0.63	0.59
8	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.69	0.64	0.59	0.54	0.49
9	1.00	0.94	0.89	0.83	0.77	0.71	0.65	0.60	0.54	0.48	0.42
10	1.00	0.94	0.87	0.81	0.75	0.68	0.62	0.56	0.49	0.43	0.36
12	1.00	0.93	0.85	0.78	0.71	0.63	0.56	0.49	0.42	0.34	0.27
15	1.00	0.92	0.84	0.75	0.67	0.59	0.51	0.43	0.34	0.26	0.18
20	1.00	0.91	0.82	0.74	0.65	0.56	0.47	0.38	0.29	0.20	0.11
30 y más	1.00	0.91	0.81	0.72	0.63	0.53	0.44	0.35	0.25	0.15	0.06

Tabla 1.14. Valores para el sub factor de la secuencia de saltos en el terreno (Dissmeyer y Foster, 1984) (Mancillar E., 2008)

Pendiente (%)	Siguiendo la curva de nivel	Grados de desviación respecto a la curva de nivel					
		15	30	45	60	90	
0 -	2	0.80	0.88	0.91	0.94	0.96	1.00
3 -	7	0.70	0.82	0.87	0.91	0.94	1.00
8 -	12	0.80	0.88	0.91	0.94	0.96	1.00
13 -	18	0.90	0.94	0.96	0.97	0.98	1.00
19	y más	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 1.15. Valores para el sub factor de labranza en contorno (Dissmeyer y Foster, 1984) (Mancillar E., 2008)

% Suelo desnudo	Porcentaje de suelo desnudo con una densa red de raíces finas en los primeros tres centímetros de suelo											
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	
0	0.0000											
1	0.0004	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0010	0.0012	0.0014	0.0016	0.0018	
2	0.0008	0.0008	0.0010	0.0012	0.0014	0.0017	0.0020	0.0023	0.0027	0.0031	0.0036	
5	0.0030	0.0030	0.0030	0.0040	0.0050	0.0060	0.0070	0.0080	0.0090	0.0110	0.0120	
10	0.0050	0.0050	0.0060	0.0080	0.0090	0.0110	0.0130	0.0150	0.0170	0.0200	0.0230	
20	0.1100	0.0120	0.0140	0.0170	0.0200	0.0240	0.0280	0.0330	0.0380	0.0440	0.0500	
30	0.0170	0.0180	0.0200	0.0250	0.0290	0.0360	0.0420	0.0500	0.0590	0.0680	0.0770	
40	0.0230	0.0240	0.0270	0.0340	0.0420	0.0490	0.0580	0.0680	0.0790	0.0920	0.1040	
50	0.0300	0.0320	0.0380	0.0450	0.0540	0.0640	0.0740	0.0880	0.1030	0.1180	0.1350	
60	0.0370	0.0380	0.0430	0.0550	0.0670	0.0790	0.0920	0.1090	0.1270	0.1470	0.1670	
70	0.0470	0.0490	0.0540	0.0680	0.0830	0.0980	0.1170	0.1380	0.1610	0.1870	0.2120	
80	0.0550	0.0580	0.0660	0.0810	0.0980	0.1180	0.1410	0.1640	0.1920	0.2210	0.2520	
85	0.0660	0.0690	0.0780	0.0950	0.1150	0.1380	0.1650	0.1950	0.2280	0.2640	0.3000	
90	0.0750	0.0800	0.0890	0.1110	0.1330	0.1570	0.1870	0.2220	0.2600	0.3010	0.3420	
95	0.0860	0.0900	0.1020	0.1250	0.1550	0.1820	0.2170	0.2550	0.2980	0.3450	0.3920	
100	0.0990	0.1040	0.1170	0.1440	0.1800	0.2070	0.2480	0.2930	0.3420	0.3960	0.4500	

Tabla 1.16. Valores para el efecto combinado de los sub factores de proporción de suelo desnudo, raíces finas y reconsolidación del suelo en suelos forestales sin labranza (Dissmeyer y Foster, 1984) (Mancillar E., 2008)

% Suelo desnudo	Tiempo desde labranza (meses)			
	0	6	12 o más de 72	más de 24 y hasta 60
0	0.0000	0.0000	0.0000	0
1	0.0014	0.0017	0.0018	0.0020
2	0.0029	0.0030	0.0036	0.0041
5	0.0090	0.0110	0.0120	0.0130
10	0.0190	0.0220	0.2300	0.0260
20	0.0370	0.0450	0.0490	0.0560
30	0.0590	0.0680	0.0740	0.0840
40	0.0830	0.0950	0.1040	0.1170
50	0.1080	0.1240	0.1360	0.1530
60	0.1370	0.1570	0.1720	0.1940
70	0.1690	0.1940	0.2120	0.2400
80	0.2120	0.2440	0.2670	0.3010
85	0.2410	0.2770	0.3030	0.3420
90	0.2740	0.3150	0.3440	0.3880
95	0.3130	0.3600	0.3930	0.4440
100	0.3600	0.4140	0.4500	0.5100

Tabla 1.17. Valores para el efecto combinado del porcentaje de suelo desnudo, reconsolidación del suelo y enlace residual en suelos forestales labrados. Situación de suelo superficial con una buena red de raíces finas y sub suelos con buena estructura y permeabilidad (Dissmeyer y Foster, 1984) (Mancillar E., 2008)

% Suelo desnudo	Tiempo desde labranza (meses)					
	0	6	12 a 36	48	60	72 y más
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0021	0.0023	0.0025	0.0020	0.0020	0.0018
2	0.0042	0.0047	0.0050	0.0045	0.0040	0.0036
5	0.0140	0.0150	0.0160	0.0150	0.0130	0.0117
10	0.0270	0.0310	0.0330	0.0290	0.0260	0.2300
20	0.0580	0.0650	0.0690	0.0600	0.0540	0.0490
30	0.0870	0.0980	0.1030	0.0920	0.0820	0.0740
40	0.1220	0.1350	0.1440	0.1290	0.1150	0.1040
50	0.1590	0.1760	0.1880	0.1670	0.1500	0.1350
60	0.2010	0.2240	0.2390	0.2130	0.1900	0.1710
70	0.2490	0.2770	0.2960	0.2630	0.2350	0.2120
80	0.3130	0.3480	0.3520	0.3300	0.2950	0.2660
90	0.4030	0.4480	0.4790	0.4260	0.3800	0.3420
95	0.4610	0.5130	0.5480	0.4870	0.4350	0.3920
100	0.5300	0.5900	0.6300	0.5600	0.5000	0.4500

Tabla 1.18. Valores para el efecto combinado del porcentaje de suelo desnudo, reconsolidación del suelo y enlace residual en suelos forestales labrados. Situaciones de suelo superficial con una red de raíces finas muy pobre y sub suelo con buena estructura y permeabilidad (Dissmeyer y Foster, 1984) (Mancillar E., 2008)

% Suelo desnudo	Tiempo de labranza (meses)							
	0	6	12	24	36	48	60	72 y más
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0028	0.0029	0.0030	0.0029	0.0026	0.0022	0.0020	0.0018
2	0.0056	0.0058	0.0059	0.0057	0.0052	0.0045	0.0040	0.0036
5	0.0180	0.0190	0.0190	0.0180	0.0170	0.0150	0.0130	0.0120
10	0.0360	0.0380	0.0380	0.0370	0.0340	0.0290	0.0260	0.0230
20	0.0760	0.0790	0.0800	0.0770	0.0700	0.0600	0.0540	0.0490
30	0.1150	0.1200	0.1210	0.1160	0.1070	0.0920	0.0860	0.0740
40	0.1610	0.1690	0.1700	0.1630	0.1500	0.1290	0.1150	0.1040
50	0.2100	0.2200	0.2220	0.2130	0.1950	0.1680	0.1500	0.1350
60	0.2660	0.2790	0.2810	0.2700	0.2470	0.2130	0.1900	0.1710
70	0.3290	0.3450	0.3470	0.3340	0.3060	0.2630	0.2350	0.2120
80	0.4130	0.4320	0.4360	0.4190	0.3840	0.3300	0.2950	0.2660
85	0.4690	0.4910	0.4950	0.4760	0.4360	0.3750	0.3350	0.3020
90	0.5320	0.5570	0.5620	0.5400	0.4940	0.4260	0.3800	0.3420
95	0.6090	0.6380	0.6430	0.6180	0.5660	0.4870	0.4350	0.3920
100	0.7000	0.7330	0.7390	0.7100	0.6500	0.5600	0.5000	0.4500

Tabla 1.19. Valores para el efecto combinado de porcentaje de suelo desnudo, reconsolidación del suelo y enlace residual en los suelos forestales labrados. Situación en la que se ha perdido el suelo superficial pero existe una red de raíces finas muy pobre, y el subsuelo tiene una buena estructura permeable (Dissmeyer y Foster, 1984) (Mancillar E., 2008)

% Suelo desnudo	Tiempo desde la labranza (meses)							
	0	6	12	24	36	48	60	72 y más
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0032	0.0033	0.0033	0.0030	0.0026	0.0022	0.0020	0.0018
2	0.0064	0.0066	0.0066	0.0059	0.0052	0.0045	0.0040	0.0036
5	0.0210	0.0220	0.0220	0.0190	0.0170	0.0150	0.0130	0.0120
10	0.0420	0.0430	0.0430	0.0380	0.0340	0.0290	0.0260	0.0230
20	0.0860	0.0890	0.0880	0.0800	0.0700	0.0600	0.0540	0.0490
30	0.1310	0.1360	0.1340	0.1220	0.1070	0.0920	0.0840	0.0740
40	0.1840	0.1900	0.1880	0.1700	0.1500	0.1290	0.1150	0.1040
50	0.2400	0.2480	0.2450	0.2220	0.1950	0.1680	0.1500	0.1350
60	0.3040	0.3140	0.3110	0.2810	0.2470	0.2130	0.1900	0.1710
70	0.3760	0.3890	0.3840	0.3480	0.3060	0.2630	0.2350	0.2120
80	0.4720	0.4880	0.4830	0.4370	0.3840	0.3300	0.2950	0.2660
85	0.5360	0.5540	0.5480	0.4960	0.4360	0.3750	0.3350	0.3020
90	0.6080	0.6290	0.6220	0.5620	0.4940	0.4260	0.3800	0.3420
95	0.6960	0.7190	0.7120	0.6440	0.5660	0.4870	0.4350	0.3920
100	0.8000	0.8270	0.8180	0.7400	0.6500	0.5600	0.5000	0.4500

Tabla 1.20. Valores para el efecto combinado de suelo desnudo, reconsolidación del suelo y enlace residual en suelos forestales labrados. Situación en que se ha perdido el suelo superficial pero existe una red de raíces finas muy pobre y el subsuelo tiene una pobre estructura y permeabilidad (Dissmeyer y Foster, 1984) (Mancillar E., 2008)

% Suelo desnudo con raíces finas	Valor sub factor
0	1.00
10	0.87
20	0.76
30	0.65
40	0.56
50	0.47
60	0.40
70	0.34
80	0.28
90	0.24
100	0.22

Tabla 1.21. Valores para el sub factor de raíces finas, para el caso de plantas invasoras en terrenos forestales labrados (Dissmeyer y Foster, 1984) (Mancillar E., 2008)

Tipo de mantillo	Cantidad Aplicada [Ton/ha]	Pendiente (%)	C	Máxima longitud de pendiente (m)	
Ninguno	0	Todas	1	-	
Paja o heno fijados al terreno por algún sistema de anclaje*	2.2	1 - 5	0.2	61	
		6 - 10	0.2	30	
	3.4	1 - 5	0.12	91	
		6 - 10	0.12	46	
	4.5	11 - 15	0.06	122	
		6 - 10	0.06	61	
	Rocas partidas de 0.6 a 4 centímetros de tamaño (longitud)	303	11 - 15	0.7	46
			16 - 20	0.11	30
			21 - 25	0.14	23
			26 - 33	0.17	15
538		34 - 50	0.2	11	
		Menor que	16	0.05	61
Astillas de madera	16	16 - 20	0.05	46	
		21 - 33	0.05	30	
		34 - 50	0.05	23	
		Menor que	21	0.02	91
	27	21 - 33	0.02	61	
		34 - 50	0.02	46	
		Menor que	16	0.08	23
		16 - 20	0.08	15	
	56	Menor que	16	0.05	46
		16 - 20	0.05	30	
21 - 33		0.05	23		
Menor que		16	0.02	61	
56	16 - 20	0.02	46		
	21 - 33	0.02	30		
56	34 - 50	0.02	23		

*Si no se aplica el sistema de anclaje y el terreno tiene un factor de erodabilidad K superior a 0.3, entonces los valores de C deben ser el doble de los escrito en esta tabla

Tabla 1.22. Valores para el factor C de cubierta y manejo en áreas de construcción (Wischmeier y Smith, 1978) (Mancillar E., 2008).

Pendiente (%)	Cultivo en contorno o en curvas de nivel		<i>P</i> para cultivo en terrazas
	<i>P</i> *	Longitud máxima de ladera (m)	
1 - 2	0.6	122	0.12
3 - 5	0.5	91	0.1
6 - 8	0.5	61	0.1
9 - 12	0.6	37	0.12
13 - 16	0.7	24	0.14
17 - 20	0.8	18	0.16
21 - 25	0.9	15	0.18

*Se pondera por 0.8 si considera contornos realizados con pilas de residuos

Tabla 1.23. Factor P de prácticas de conservación (Wischmeier y Smith, 1978) (Mancillar E., 2008).

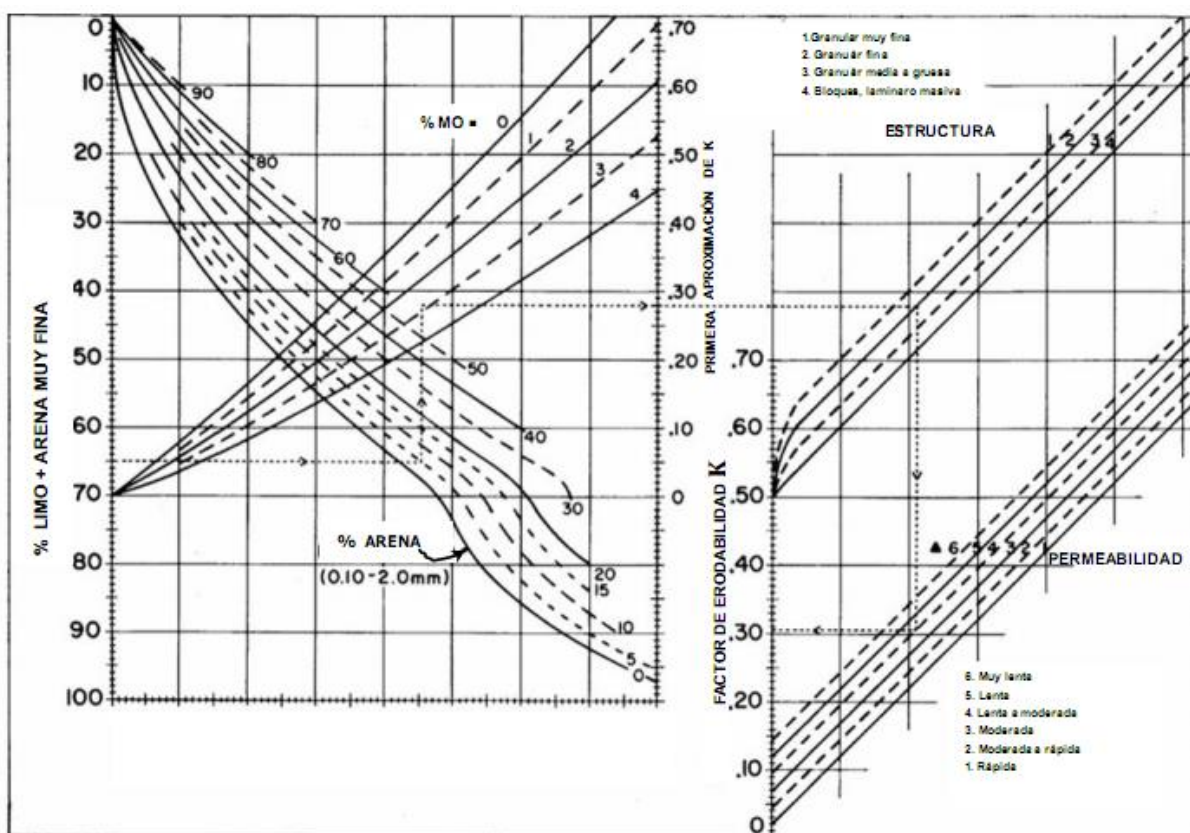


Figura 1.7. Gráfico o nomograma para la determinación de erodabilidad del suelo (adaptado desde Wischmeier y Smith⁷, 1978) (Mancillar E., 2008)

⁷ Walter H. Wischmeier y Dwight D. Smith trabajaron en el USDA y fueron los pioneros en el desarrollo de USLE. Wischmeier trabajó 35 años para el USDA y es considerado el pionero en el estudio de la erosión.

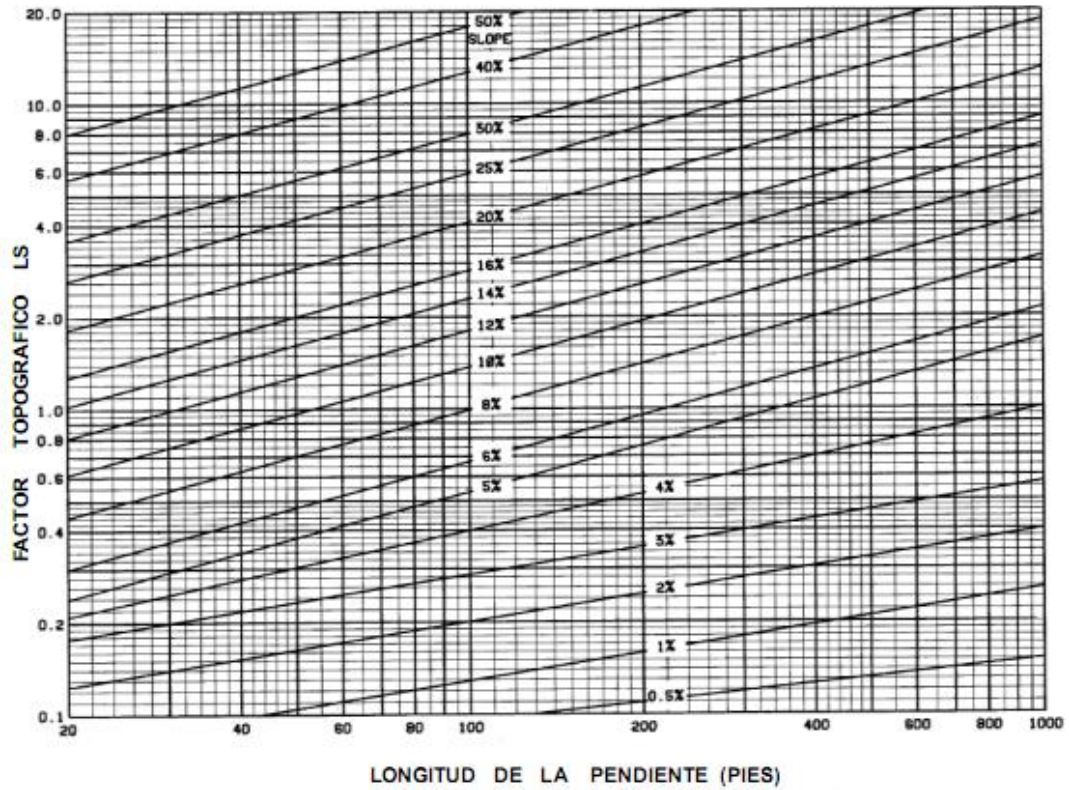


Figura 1.8. Gráfico o nomograma de determinación del factor combinado de LS (adaptado desde Wischmeier y Smith, 1978) (Mancillar E., 2008)

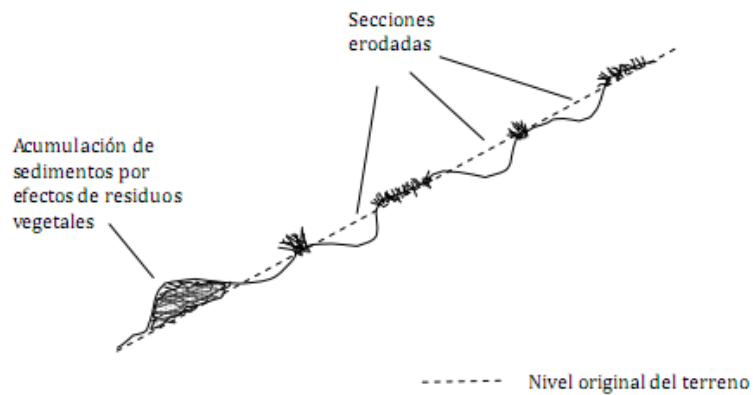


Figura 1.9. Secuencia de saltos en terreno. La menor pendiente que existe en los topes de los peldaños redonda en una disminución de la velocidad del escurrimiento (Mancillar E., 2008)

1.3.3. Método de erosión potencial aplicado en la República Mexicana

La erosión potencial es un concepto que surge de la *USLE* y estima la superficie erodable descartando factores modificables, es decir, vegetación y técnicas de conservación, y apoyándose de los que son fijos: suelo, lluvia y espacio geográfico. Será útil para estimar el suelo que se perdería por erosión sin conocer su uso y las condiciones ambientales de la cuenca (Martínez Ménez, 2005). Su ecuación es la 1.14.

$$E_p = R K L S \quad (1.14)$$

Dónde:

E_p : Erosión potencial, en $\left(\frac{T/ha}{año}\right)$. Sus factores se presentan a continuación:

- R : Erosividad de la lluvia, en $\left(\frac{MJ/mm*ha}{hr}\right)$: Para estimar la erosión potencial es necesario un análisis hidrológico de la región (como se atendió en la sección 1.3.2), sin embargo, la Figura 1.10 (pág. 52) muestra un mapa en donde se han propuesto las ecuaciones que pueden usarse en la República Mexicana, simplemente conociendo el valor de la precipitación P . La Tabla 1.24 (pág. 53) presenta la ecuación de acuerdo a la región.
- K : Erodabilidad de los suelos: Se proporciona la Tabla 1.25 (pág. 53), en la que se especifica el valor utilizado dependiendo de las características granulométricas del suelo, así como su permeabilidad, su estructura y el contenido de materia orgánica.
- LS : Longitud y grado de pendiente, que utiliza la ecuación 1.15.

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{s_1}} + \frac{1}{\sqrt{s_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_{m-1}}} + \frac{1}{\sqrt{s_m}}} \right]^2 \quad (1.15)$$

Dónde:

S : Pendiente media del terreno, en porcentaje.

s_i : Pendiente por sección de terreno: $s_i = \frac{\text{Cota mayor} - \text{Cota menor}}{\text{Longitud}}$.

m : Número de secciones.

Una vez conocida la pendiente y la longitud se aplica la 1.16.

$$LS = \lambda^m (0.0138 + 0.00965 S + 0.00138 S^2) \quad (1.16)$$

Dónde:

LS : Factor de grado y longitud de la pendiente.

λ : Longitud de la pendiente.

S : Pendiente media del terreno.

m : Parámetro ajustado a 0.5.

Para los factores de cubierta vegetal C y técnicas de conservación P se pueden aprovechar: Tabla 1.26 y Tabla 1.27 (págs. 54).

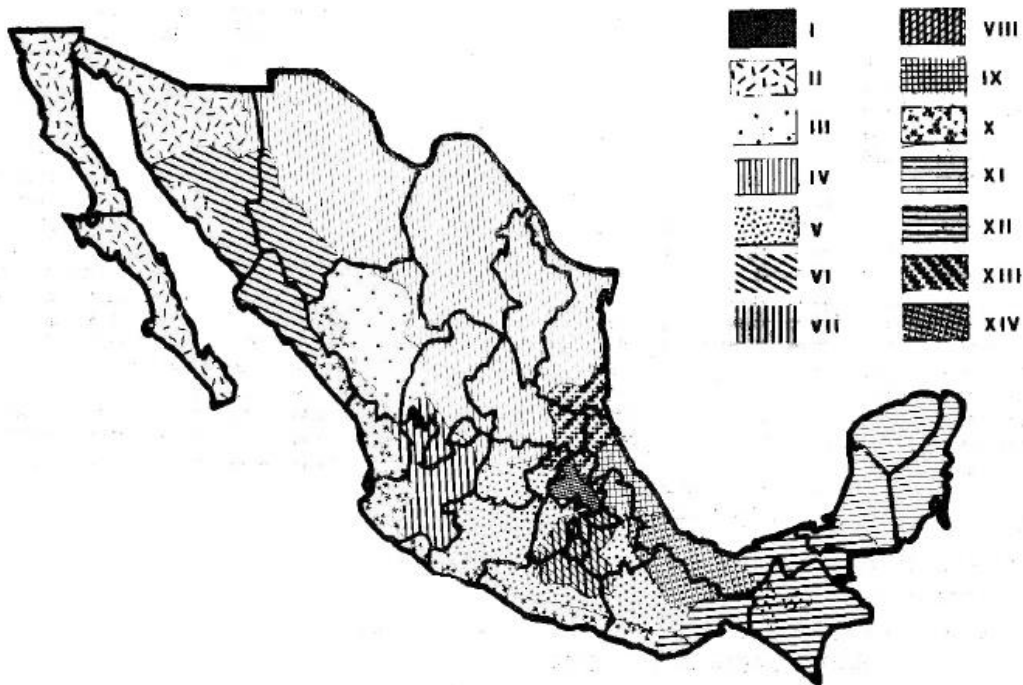


Figura 1.10. Clasificación de la República Mexicana de acuerdo con su precipitación (Martínez Ménez, 2005)

Región	Ecuación
I	$R = 1.2078P + 0.002276P^2$
II	$R = 3.4555P + 0.006470P^2$
III	$R = 3.6752P - 0.001720P^2$
IV	$R = 2.8559P + 0.002983P^2$
V	$R = 3.4880P - 0.00088P^2$
VI	$R = 6.6847P + 0.001680P^2$
VII	$R = -0.0334P + 0.006661P^2$
VIII	$R = 1.9967P + 0.003270P^2$
IX	$R = 7.0458P - 0.002096P^2$
X	$R = 6.8938P + 0.000442P^2$
XI	$R = 3.7745P + 0.004540P^2$
XII	$R = 2.4619P + 0.006067P^2$
XIII	$R = 10.7427P - 0.00108P^2$
XIV	$R = 1.5005P + 0.002640P^2$

Tabla 1.24. Ecuaciones por región (Martínez Ménez, 2005)

Textura	% de materia orgánica		
	0.0- 0.5	0.5- 2.0	2.0- 4.0
Arena	0.005	0.003	0.002
Arena fina	0.016	0.014	0.010
Arena muy fina	0.042	0.036	0.028
Arena migajosa	0.012	0.010	0.008
Arena fina migajosa	0.024	0.020	0.016
Arena muy fina migajosa	0.044	0.038	0.030
Migajón arenosa	0.027	0.024	0.019
Migajón arenosa fina	0.035	0.030	0.024
Migajón arenosa muy fina	0.047	0.041	0.033
Migajón	0.038	0.034	0.029
Migajón limoso	0.048	0.042	0.033
Limo	0.060	0.052	0.042
Migajón arcillo arenosa	0.027	0.025	0.021
Migajón arcillosa	0.028	0.025	0.021
Migajón arcillo limosa	0.037	0.032	0.026
Arcillo arenosa	0.014	0.013	0.012
Arcillo limosa	0.025	0.023	0.019
Arcilla	0.013- 0.029		

Tabla 1.25. Erodabilidad K (Martínez Ménez, 2005)

Cultivo	Nivel de productividad		
	Alto	Moderado	Bajo
Maíz	0.540	0.620	0.800
Maíz labranza cero	0.050	0.100	0.150
Maíz rastrojo	0.100	0.150	0.200
Algodón	0.300	0.420	0.490
Pastizal	0.004	0.010	0.100
Alfalfa	0.020	0.050	0.100
Trébol	0.025	0.050	0.100
Sorgo grano	0.430	0.550	0.700
Sorgo grano rastrojo	0.110	0.180	0.250
Soya	0.480		
Soya después de maíz con rastrojo	0.180		
Trigo	0.150	0.380	0.530
Trigo rastrojo	0.100	0.180	0.250
Bosque natural	0.001	0.010	0.100
Sabana en buenas condiciones	0.010	0.540	
Sabana sobrepastoreada	0.100	0.220	
Maíz- sorgo, mijo	0.400 a 0.900		
Arroz	0.100 a 0.200		
Algodón, tabaco	0.500 a 0.700		
Cacahuete	0.400 a 0.800		
Palma, cacao, café	0.100 a 0.300		
Piña	0.100 a 0.301		

Tabla 1.26. Factor C de cubierta vegetal (Martínez Ménez, 2005)

Práctica	Valor de <i>P</i>
Surcado al contorno	0.75- 0.90
Surcos rectos	0.80- 0.95
Franjas al contorno	0.60- 0.80
Terrazas (2%- 7% de pendiente)	0.50
Terrazas (7%- 13% de pendiente)	0.60
Terrazas (mayor de 13%)	0.80
Terrazas de Banco	0.10
Terrazas de Banco en contrapendiente	0.05

Tabla 1.27. Factor P de técnicas de conservación (Martínez Ménez, 2005)

1.3.4. Arrastre de sedimentos en el flujo de una cuenca hidrográfica

Una vez que se ha descrito cómo es que se pierde el suelo, es necesario relacionarlo con su movimiento en una cuenca hidrológica. Como se mencionó, el suelo que ha sido erosionado y es susceptible de pérdida sólo necesita una acción o una fuerza que lo arrastre.

Los ríos, que también se identificaron como motores de las cuencas, son los medios ideales para el arrastre del suelo en su flujo, y para ellos se presentan las características más importantes de éste fenómeno.

Origen y clasificación de los sedimentos

Los suelos se clasifican, de acuerdo a su origen, en residuales y transportados. Los residuales son los que se quedan cerca del lugar en que se formaron como productos de la roca madre meteorizada. Los transportados son los que han sido llevados por acción del agua y del viento lejos de las rocas o suelos de los que proceden.

Los suelos y sedimentos están constituidos por gran variedad de partículas que difieren en tamaño, forma y densidad. Estas partículas son las que originan otra clasificación: pueden ser suelos o sedimentos cohesivos o no cohesivos, y para identificarlos se analiza su comportamiento mecánico, es decir, su resistencia a esfuerzos tangenciales.

El primero, sedimento no cohesivo o friccionante, es un material granular, también denominado de granos gruesos o partículas sueltas, más comúnmente conocidos como arenas y gravas. El peso de estas partículas es la fuerza principal que las resiste a las fuerzas de arrastre y sustentación. Cuando disminuyen estas fuerzas ejercidas por la corriente, se depositan dejando vacíos entre ellas. Su comportamiento mecánico e hidráulico está definido por el grado de acomodo de las partículas y por su orientación.

Contrarios a los sedimentos friccionantes, los sedimentos cohesivos se describen con granos muy finos. Están compuestos por minerales de arcilla y sus partículas se mantienen unidas por la fuerza de cohesión. La fuerza de cohesión es mayor que el peso de la partícula, y con ésta es capaz de resistir el arrastre de la corriente; sin embargo, cuando la cohesión es vencida, las partículas se desprenden y son arrastradas por el flujo, con lo que consiguen comportamientos similares a las no cohesivas al viajar en suspensión. Cuando las fuerzas se detienen muchas se depositan mientras que otras permanecen mezcladas con el agua en forma coloidal, a menos que se genere la floculación⁸ por efecto de sales minerales.

Características de las partículas

Algunas propiedades que definen a las partículas son:

- **Densidad de la partícula:** Se define como la masa sólida de la partícula entre el volumen que ocupa. El granito, material ígneo intrusivo, cubre el 95 por ciento de la parte superior de la corteza terrestre; su desintegración mecánica lo convierte en un conjunto de fragmentos o granos sueltos de cuarzo y feldespatos. Las arcillas proceden de la acción química sobre el feldespatos.

⁸ Integración de partículas discretas en volúmenes mayores, con un peso suficiente para depositarse o decantarse.

- Densidad relativa de la partícula: Los sedimentos aluviales tienen un alto contenido de cuarzo, por tanto, se puede usar la siguiente relación de la ecuación 1.17.

$$S_s = \frac{\rho_s}{\rho} = 2.65 \quad (1.17)$$

Donde ρ es la densidad del agua. Las partículas de los sedimentos con materiales pesados poseen densidades relativas mayores de 4.5.

- Densidad de la partícula sumergida: En una partícula de sedimento que está dentro del agua, el empuje hidrostático vertical disminuye su peso, de manera que la materia sólida sumergida es igual al peso del volumen V_s de sólidos menos el peso del mismo volumen de agua desalojado por ellos ecuación 1.18.

$$W'_s = gV_s(\rho_s - \rho) \quad (1.18)$$

Un parámetro muy utilizado es el peso relativo de la partícula sumergida, que se expresa en la ecuación 1.19.

$$\Delta = \frac{gV_s(\rho_s - \rho)}{gV_s\rho} = \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \quad (1.19)$$

Que equivale a: $\Delta = S_s - 1$

Por ello también se conoce como densidad relativa de la partícula sumergida.

- Tamaño: Las partículas naturales tienen formas irregulares y nunca alcanzan a definirse como esferas, lo que dificulta su clasificación, pero se pueden ocupar los siguientes conceptos:
 - i) Diámetro nominal: Define una esfera de igual volumen que la partícula.
 - ii) Diámetro de cribado: Se usa para definir tamaños mayores de 0.062 milímetros como gravas y arenas. Las mallas para el cribado designan a las partículas usando aberturas con medidas exactas en milímetros. Las partículas pasan de la criba mayor a la menor.
 - iii) Diámetro de sedimentación o equivalente: El que tiene una esfera de igual densidad y velocidad de caída que la partícula que se tratando de clasificar, en el mismo líquido a temperatura conocida. El valor estándar se obtiene con una densidad relativa de 2.56, cayendo junto con la partícula en agua destilada a 24°C. Este parámetro se emplea para definir el tamaño de partículas muy finas, es decir, limos y arcillas. El tamaño 0.062 milímetros es el máximo que puede tener una

partícula para caer dentro del agua siguiendo la ley de Stokes; un tamaño mayor provoca turbulencias. Este valor corresponde un límite natural entre los limos y las arenas, y también se ocupa como frontera para diferenciar entre el material arrastrado y el transportado permanentemente en suspensión dentro del flujo. Por otro lado, un valor menor de 0.2 micras, se puede clasificar como ultra arcilla o coloide, pues permanece en suspensión indefinidamente, excepto si hay floculación. El proceso de una partícula de estas magnitudes tampoco sigue la ley de Stokes.

La Ley de Stokes se refiere a la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso en un régimen laminar de bajos números de Reynolds. Fue derivada en 1851 por George Gabriel Stokes tras resolver un caso particular de las ecuaciones de Navier-Stokes. En general la ley de Stokes es válida en el movimiento de partículas esféricas pequeñas moviéndose a velocidades bajas (Batchelor, 1967).

Otra definición se hace en función de las dimensiones triaxiales de la partícula (largo, ancho y espesor). En conclusión, las gravas y arenas se miden directamente, limos y arcillas mediante el proceso de sedimentación.

Un criterio de clasificación puede ser la propuesta por la *American Geophysical Union* que se muestra en la Tabla 1.28 (pág. 60).

- Forma: Describe el aspecto o apariencia de la partícula a través del parámetro llamado factor de forma (ecuación 1.20).

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (1.20)$$

Donde a, b y c son las dimensiones triaxiales de las partículas en orden de la mayor a la menor. En una esfera, $SF = 1$; para otras formas, $SF < 1$; en partículas naturales, $SF \cong 0.7$. El tamaño, densidad o composición mineralógica no influye en el factor de forma, pero éste afecta de modo importante el movimiento de las partículas.

- Esfericidad: Es el cociente de su diámetro nominal y la mayor de sus dimensiones triaxiales. Compara el volumen de la partícula con el de la mayor esfera que la circunscribe. El Valor promedio varía entre 0.6 y 0.85.
- Redondez: Trata de medir el deterioro que ha sufrido la partícula al moverse desde su sitio de origen. Se define como el cociente del radio promedio de curvatura del contorno de la superficie proyectada y el radio del círculo máximo inscrito en dicha superficie. En la esfera es igual a 1 y en partículas minerales varía entre 0.3 y 0.8; una partícula que muestra angulosidades ha viajado poco y no ha sufrido desgaste, y en consecuencia tiene poca redondez.

- Velocidad de caída: Es la velocidad máxima uniforme que alcanza una partícula al caer dentro del agua cuando se logra el equilibrio dinámico entre su peso sumergido y la fuerza de resistencia, acorde con dicha velocidad que el agua opone en su caída. La velocidad de caída depende del tamaño y forma de la partícula. La ecuación general para una forma esférica es la ecuación 1.21.

$$\omega = \left[\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} (S_s - 1)gd \right]^{1/2} \quad (1.21)$$

Dónde:

d : Diámetro de la partícula en mm

S_s : Densidad relativa de sólidos, sin dimensiones

ω : Velocidad de caída de la partícula, en m/s

C_D : Coeficiente de arrastre (ecuación 1.22), sin dimensiones. Depende del número de Reynolds: $R = \omega d/\nu$, donde ν es la viscosidad cinemática del agua en m^2/s^2 . En flujo laminar ($R_\omega < 1$), vale la ley de Stokes.

$$C_D = \frac{24}{R_\omega} \quad (1.22)$$

Con este valor, y para $d < 0.2mm$, la ecuación se convierte en:

$$\omega = \frac{1}{18\nu} [S_s - 1]gd^2$$

Cuando $R < 800$, C_D se estima de la ecuación de Schiller (ecuación 1.23).

$$C_D = \frac{24}{R_\omega} [1 + 0.15R_\omega^{0.687}] \quad (1.23)$$

Y cuando $1000 < R < 10,000$, $C_D = 4$.

La velocidad de caída de partículas naturales se determina en el laboratorio, pero existen ecuaciones empíricas para estimarla, como la de Rubey, que se usa cuando el factor de forma es cercano a 0.7 (ecuación 1.24).

$$\omega = \left[\frac{2}{3} g(S_s - 1)d + \left(\frac{6v}{d} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{6v}{d} \quad (1.24)$$

La ecuación de Rubey se puede encontrar como su representación gráfica (Figura 1.11, pág. 60) y, aunque está construida para granos de cuarzo, puede utilizarse con la mayoría de los sedimentos en la práctica. Y también, existe el gráfico de la *Inter-Agency Committee in Water Resources* (Figura 1.12, pág. 60), que toma en cuenta el factor de forma y la temperatura del agua.

Propiedades de un conjunto de partículas en una muestra

El material que caracteriza un tramo de canal o río lo determina el promedio de las diversas muestras tomadas en distintos puntos de los perfiles transversales y longitudinales del tramo en cuestión, siendo necesario conocer las propiedades representativas de cada muestra.

El volumen total V_T de una muestra de suelo se forma de una parte V_s de sólidos, otra V_w ocupada por agua y una V_v constituida por aire, lo que significa las fases sólida, líquida y gaseosa del suelo. En la Tabla 1.29 (pág. 61) se muestran las propiedades más importantes del suelo en una muestra.

Propiedades del agua con material en suspensión

Son las siguientes:

- **Concentración de partículas:** Cuantifica la cantidad de partículas de sedimento fino en suspensión contenido en una muestra de agua, sin incluir materia vegetal ni sólidos o minerales disueltos. La muestra se tiene que filtrar o decantar para separar el material sólido, ya que si el agua se evapora quedarían las sales disueltas.
- **Densidad de la mezcla:** Es la densidad de la mezcla agua- material en suspensión. En el laboratorio se determina con un hidrómetro.
- **Viscosidad de la mezcla:** Difiere de la del agua pura en la medida que aumenta la concentración.

En la Tabla 1.30 (pág. 63) se describe más ampliamente estas propiedades.

Grupos	Clase	Tamaño en mm
Bolos	muy grandes	2,048 - 4,096
	Grandes	1,024 - 2,048
	medianos	512 - 1,024
	pequeños	256 - 512
Cantos	Grandes	128 - 256
	pequeños	64 - 128
	muy gruesa	32 - 64
	gruesa	16 - 32
Grava	mediana	8 - 16
	fina	4 - 8
	muy fina	2 - 4
	muy gruesa	1 - 2
Arena	gruesa	0.5 - 1
	mediana	0.25 - 0.5
	fina	0.125 - 0.25
	muy fina	0.062 - 0.125

Tabla 1.28. Clasificación de los materiales sedimentarios de la *American Geophysical Union* (Sotelo Ávila, 2002)

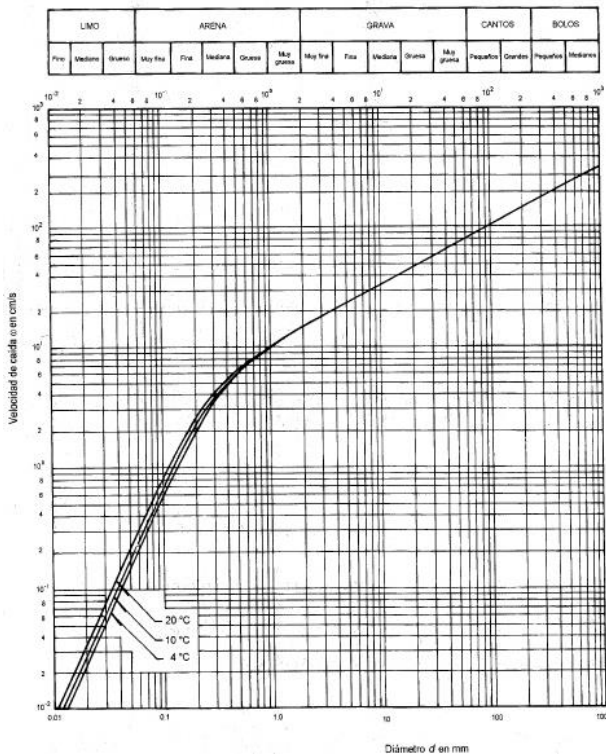


Figura 1.11. Velocidad de caída de partículas de cuarzo según Rubey (Sotelo Ávila, 2002)

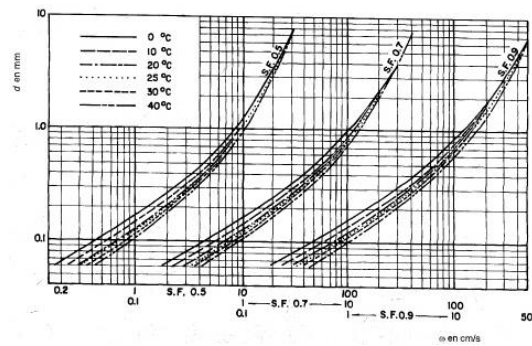


Figura 1.12. Velocidad de caída de partículas de cuarzo de acuerdo con su factor de forma (SF), según *Inter-Agency Committee in Water Resources* (Sotelo Ávila, 2002)

		Stokes		
Limo	grueso	0.031	-	0.062
	mediano	0.016	-	0.031
	fino	0.008	-	0.016
	muy fino	0.004	-	0.008
Arcilla	gruesa	0.002	-	0.004
	mediana	0.001	-	0.002
	fina	0.0005	-	0.001
	muy fina	0.00024	-	0.0005

Nota: Las partículas o fragmentos naturales de roca pueden ser angulosos o rodados, según el grado de abrasión o rodadura que hayan experimentado.

Continuación Tabla 1.28

Concepto	Definición	Ecuación	Comentarios
Densidad de sólidos	Masa de sólidos entre volumen de sólidos.	$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$	Es la densidad de las partículas contenidas en la muestra en $\frac{kg}{m^3}$ o en $\frac{Ns^2}{m^4}$.
Densidad relativa de sólidos	Densidad de sólidos entre densidad del agua.	$S_s = \frac{\rho_s}{\rho}$	ρ es la densidad del agua a 4°C.
Densidad del suelo en la muestra	Suma de la masa de sólidos y agua entre el volumen total de la muestra.	$\rho_m = \frac{\rho_s V_s + \rho V_w}{V_m}$	Cambia según la proporción entre sólidos y agua. En $\frac{kg}{m^3}$ o en $\frac{Ns^2}{m^4}$.
Densidad relativa del suelo en la muestra	Similar a S_s .	$S_m = \frac{\rho_m}{\rho}$	ρ es la densidad del agua a 4°C.
Porosidad	Volumen de vacíos entre volumen total de la muestra.	$n = \frac{V_v}{V_m} = \frac{e}{1+e}$	Es común expresarla en por ciento. e es la relación de vacíos.
Relación de vacíos	Volumen de vacíos entre volumen de sólidos.	$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1+n}$	También se conoce como índice de poros de un suelo. n es la porosidad. En la ecuación, $V_s = V_m - V_v$.
Grado de saturación de un suelo	Volumen del agua entre volumen de vacíos.	$G_w = \frac{V_w}{V_v}$	Se expresa en por ciento y varía de 0 en un suelo seco a 100 en uno totalmente saturado.
Contenido de agua o humedad de un suelo	Masa del agua entre masa de sólidos.	$w = \frac{\rho V_w}{\rho_s V_s} = \frac{V_w}{S_s V_s}$	Suele expresarse en por ciento.

Tabla 1.29. Propiedades del suelo en una muestra (Sotelo Ávila, 2002)

Densidad del suelo seco	El grado de saturación del suelo es cero, $G_w = 0$, es decir $V_w = 0$ y $\rho_m = \rho_d$.	$\rho_d = \rho_s \frac{V_s}{V_m}$ $\rho_d = (1-n)\rho_s$ $\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e}$	<p>Resulta de la ecuación ρ_m.</p> <p>Resulta al considerar $V_s = V_m - V_v$.</p> <p>Resulta con $V_m = V_s + V_v$ en la definición de relación de vacíos.</p>
Densidad de un suelo saturado	Es el valor de ρ_m cuando $G_w = 1$, (100 por ciento).	$\rho_{sat} = \frac{\rho_s V_s + \rho V_w}{V_m}$ $\rho_{sat} = \left[\frac{S_s + e}{1+e} \right] \rho$	<p>Resulta de la ecuación de ρ_m.</p> <p>Resulta con $V_m = V_v$ y la definición de relación de vacíos.</p>
Peso específico del suelo sumergido	El empuje hidrostático vertical reduce el peso específico del material sólido.	$g\rho'_s = g(\rho_s - \rho)$ $g\rho'_s = g\left(\frac{\rho_s}{1+e} - \rho\right)$	El empuje hidrostático neto es el peso del volumen de agua desalojado por los sólidos.
Peso específico relativo de la materia sumergida		$S'_s = S_s - 1$ $\Delta = S_s - 1$	<p>Esta expresión se usa más en mecánica de suelos.</p> <p>Se usa más en hidráulica fluvial.</p>

Continuación Tabla 1.29

Concepto	Definición	Ecuación	Comentarios
Concentración de volumen.	Volumen de sólidos en la muestra entre volumen total de la muestra.	$C_{s1} = \frac{V_s}{V_m}$	Se expresa en por ciento o en partes por millón (<i>ppm</i>): $1\text{ ppm} = \frac{1\text{ cm}^3}{1\text{ m}^3} = 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$ $n\% \times 10^4 = n(\text{ppm})$
Concentración en masa (o en peso). Hay dos variantes.	a) Masa (o peso) de las partículas de sedimento entre suma de las masas (o pesos) del agua y del sedimento (C_{s2}). b) Masa (o peso) de las partículas de sedimento entre la masa (o peso) de todo el volumen considerado como agua pura (C_{s3}).	$C_{s2} = \frac{\rho_s V_s}{\rho_s V_s + \rho V_w}$ $C_{s2} = \frac{S_s V_s}{S_s V_s + V_w}$ $C_{s3} = \frac{\rho_s V_s}{\rho(V_s + V_w)}$ $C_{s3} = \frac{S_s V_s}{V_s + V_w}$	En cualquier caso se expresa en por ciento. Cuando la concentración es muy baja, la masa (o peso) de la mezcla agua- sedimentos es casi igual a la del agua pura y $C_{s2} \cong C_{s3}$, siendo: $1\text{ ppm} = \frac{1\text{ mg}}{1\text{ kg}}$ $1\text{ ppm} = 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = 10^{-6} \frac{N}{N}$
Concentración en masa (o peso) por unidad de volumen de la muestra.	Masa (o peso) de las partículas de sedimento contenido en la muestra entre el volumen total de la muestra. Cuando se expresa en por ciento de la densidad de materia sólida coincide con C_{s1} .	En masa: $C_{s4} = \frac{\rho_s V_s}{V_s + V_w}$ En peso: $C_{s4} = \frac{g\rho_s V_s}{V_s + V_w}$	Tiene las dimensiones de la densidad (o del peso específico). Suele también expresarse en <i>ppm</i> : $1\text{ ppm} = \frac{1\text{ mg}}{1\text{ dm}^3}$ Cuando se conoce S_s : $\frac{n(\text{ppm}) \times 10^{-4}}{S_s} = n\%$

Tabla 1.30. Propiedades del agua con material en suspensión (Sotelo Ávila, 2002)

		$\rho_m = \rho + C_{s1}(\rho_s - \rho)$	
Densidad de la mezcla.	Depende de la densidad del agua, de las partículas suspendidas y de la concentración. Existen cuatro ecuaciones distintas para evaluarla, según cada definición de la concentración.	$\rho_m = \frac{\rho}{1 - C_{s2}\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}$ $\rho_m = \rho \left[1 + C_{s3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \right]$ $\rho_m = \rho + C_{s4} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)$	Todas las ecuaciones conducen al mismo resultado. En el laboratorio se mide con un hidrómetro.
Viscosidad de la mezcla.	Cambia con la concentración en volumen C_{s1} . Cuando $C_{s1} < 0.03 m^3/m^3$, vale la ecuación de Einstein (ecuación a). Cuando $C_{s1} > 0.03$ vale la ecuación de Ward (ecuación b).	$\mu_m = \mu(1 + 2.5C_{s1}) \quad (a)$ $\mu_m = \mu(1 + 4.5C_{s1}) \quad (a)$	μ_m es la viscosidad dinámica de la mezcla y μ la del agua. En ambos casos, la viscosidad cinemática es: $\nu_m = \frac{\mu_m}{\rho_m} \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$

Continuación Tabla 1.30

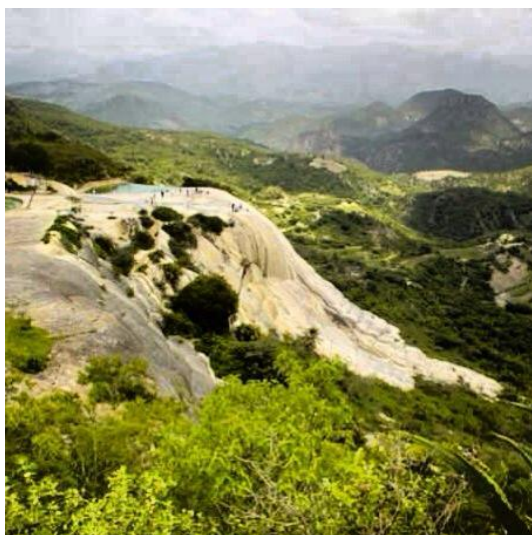


Imagen 1.9. Sedimentos depositados en forma de una cascada, Oaxaca.



Imagen 1.10. El río Usumacinta pintado en ocre por su carga de sedimentos, Tabasco.

1.3.5. Consecuencias de la pérdida de suelo

La consecuencia directa de la erosión del suelo es la desertificación, que implica la disminución de espacios de suelo fértil para cultivo y pastoreo, y de áreas naturales vírgenes, que significa la extinción de especies vegetales y animales.

Con suelos erosionados y compactados se reduce la capacidad de infiltración, extinguiéndose los mantos acuíferos. Los ríos y lagos tienden a desaparecer cuando no hay lluvia. Se alteran las corrientes de los mismos, modificando su batimetría, y derivando en inundaciones o en la pérdida de su eficiencia para el uso humano.

El arrastre de suelo mezcla fertilizantes químicos usados en el campo, susceptibles a lixiviación, así como desechos del ganado, que contaminan los cuerpos de agua deteriorando su calidad. Los organismos marinos, como peces o arrecifes, mueren, y el volumen de agua para uso humano es menor o más difícil de producir.



**Imagen 1.11. Campos de cultivo propensos a la erosión.
Chiapas.**



**Imagen 1.12. Campos de cultivo propensos a la erosión.
Puebla.**



Imagen 1.13. Campos de cultivo en suelo fértil. Puebla.

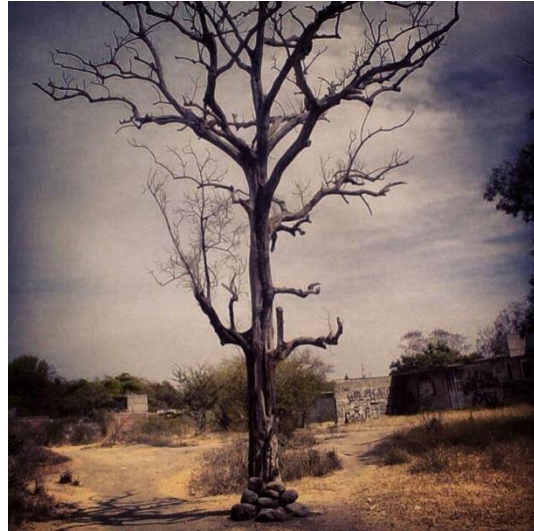


Imagen 1.14. Consecuencia de la desertificación. Puebla.

2. Marco de referencia

2.1. Caracterización de la cuenca Valle de Bravo- Amanalco

2.1.1. Geografía física

Localización

Valle de Bravo- Amanalco es en realidad una subcuenca que pertenece a la cuenca del río Tilostoc, que a su vez forma parte de la del río Cutzamala, y esta finalmente vierte sus aguas en la cuenca del río Balsas. Colinda con las cuencas de Tilostoc, Temascaltepec y Lerma- Toluca.

Las coordenadas geográficas extremas entre las que se distribuye el área de la cuenca son: 19°20'37" al norte, 19°5'45" al sur; 100°11'02" al oeste y 99°52'17" al este (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)).

Políticamente, pertenece al estado de México, en la región suroeste del mismo y de su capital, la ciudad de Toluca. La mayor parte de su superficie se encuentra en la región político-administrativa VII de Valle de Bravo, pero también le corresponde a las áreas de las regiones I de Toluca, IV de Tejupilco y V de Atlacomulco.

Los municipios del estado que tienen mayor influencia territorial sobre la cuenca son Valle de Bravo y Amanalco; Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria, Temascaltepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec también reparten una pequeña superficie municipal en la cuenca.

Una sección importante del área de la cuenca está ocupada por el vaso de la presa Valle de Bravo, que se ubica ligeramente hacia el suroeste.

Valle de Bravo- Amanalco se subdivide en 7 cuencas de quinto orden de tamaño relevante, o microcuencas: Amanalco, Los Hoyos- El Molino, San Diego, El Carrizal, La Yerbabuena, Las Flores o El Tizate y la cuenca cerrada del río San Simón. Todas tienen a su vez arroyos y pequeños afluentes que las subdividen.

El área total de la cuenca es de 61,593 hectáreas, es decir, 615 millones 930 mil metros cuadrados o 615.93 kilómetros cuadrados. Representa el 0.12% del territorio nacional, y el 0.031% del territorio continental e insular mexicano (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)).

Orografía

La cuenca Valle de Bravo- Amanalco se encuentra en la región fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal. El terreno es abrupto, es decir, sistemas montañosos cortados por amplias y profundas cañadas. Entre los elementos montañosos se forman valles con pendientes menores de 50%.

En la parte nororiental de la cuenca se encuentran los cerros y montañas que forman parte del sistema Xinantécatl, o Nevado de Toluca. Es aquí donde se encuentra la cota más elevada, alcanzando alrededor de los 3 mil 400 metros sobre el nivel del mar.

Conforme se desarrolla el territorio en dirección al sur poniente se forman pequeños valles en el camino de los ríos, y se encuentran encerrados por las sierras de Temascaltepec, al sur, y al norte por la sierra de Valle de Bravo. Algunos cerros importantes son: Los Reyes, San Bartolo, El Coyote, El Caballero, Colorado, etc.

El punto más bajo de la cuenca se encuentra en donde el río Amanalco se integra al río Tilostoc, a 1,700 metros sobre el nivel del mar.

Hidrografía

El río Amanalco y el río Los Hoyos son las principales corrientes de la cuenca. El primero nace en la parte norte derivado de los manantiales alimentados por las montañas del Xinantécatl; el segundo nace en la sierra de Temascaltepec, al sureste.

Dos cuerpos de agua son formados en el camino de estos ríos: la laguna Capilla Vieja es alimentada por el río Los Hoyos, mientras que en la unión de éste con el río Amanalco se encuentra la presa Valle de Bravo.

Algunas otras corrientes destacables son: el río Las Flores, que nace en el centro de la cuenca y entrega su caudal a la presa Valle de Bravo; La Garrapata, que inicia su recorrido en la parte norte y se integra al río Amanalco en la parte alta de la cuenca; en la parte sur se encuentra el río La Alameda, que se une a Los Hoyos en su parte más baja; y en la parte sur poniente, los ríos Peñas Altas y La Yerbabuena, aportadores de la presa Valle de Bravo.

Clima

Debido a su elevación y a su situación geográfica en el planeta, la cuenca goza de un clima templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media es de 16°C, con máximas de 32°C, y mínimas de 0.5°C; la mínima se presenta entre los meses de diciembre y enero, y la máxima entre mayo y junio.

La precipitación media que cae en la cuenca es de más de mil milímetros anuales. La región presenta lluvias extremas en los meses de junio a septiembre.

Existen algunas variaciones en el clima dependiendo de las elevaciones dentro de la cuenca, y se puede definir tres: semicálido, debajo de los 2,200 metros sobre el nivel del mar; arriba de esta cota y hasta los 3,000 metros, templado subhúmedo, que es el más apreciable en la región; a más altitud, aparece el clima semifrío subhúmedo.

Los ecosistemas que viven estos climas son variaciones de bosques de coníferas, en donde se encuentran oyameles, pinos, abetos y otros árboles y plantas de montaña. En cuanto a la fauna, predominan los pequeños mamíferos, como conejos y zorros, además de algunos reptiles, aves migratorias, de caza y de rapiña, águilas y zopilotes, especies piscícolas en los cuerpos de agua, truchas y tilapias.

Por la topografía y factores de población se ha conservado el bosque. Además, debido a que se presenta como una opción de turismo verde, la tendencia es a la conservación y reforestación del mismo (Tabla 2.1).

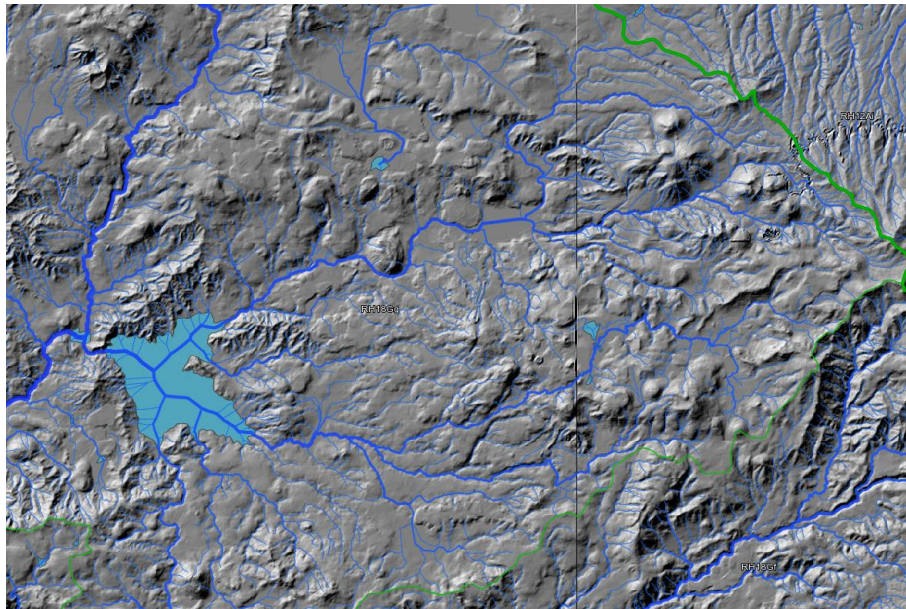


Figura 2.1. Orografía, ríos y cuerpos de agua en la Cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI))

Concepto	Valle de Bravo-Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatal
Árboles plantados 2010	102,300	6,586,300	1.55%
Superficie de cuerpos de agua (Kilómetros cuadrados) 2005	20	176	11.14%
Superficie reforestada (Hectáreas) 2010	116	6,077	1.91%

Tabla 2.1. Datos medio ambientales de la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto	Valle de Bravo-Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatal
Superficie de agricultura (Kilómetros cuadrados), 2005	180	10,352	1.74%
Superficie de pastizal (Kilómetros cuadrados), 2005	45	3,284	1.37%
Superficie de bosque (Kilómetros cuadrados), 2005	369	4,075	9.06%
Superficie de vegetación secundaria (Kilómetros cuadrados), 2005	31	3,123	0.99%
Superficie de áreas urbanas (Kilómetros cuadrados), 2010	17	2,370	0.73%

Tabla 2.2. Uso de suelo en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

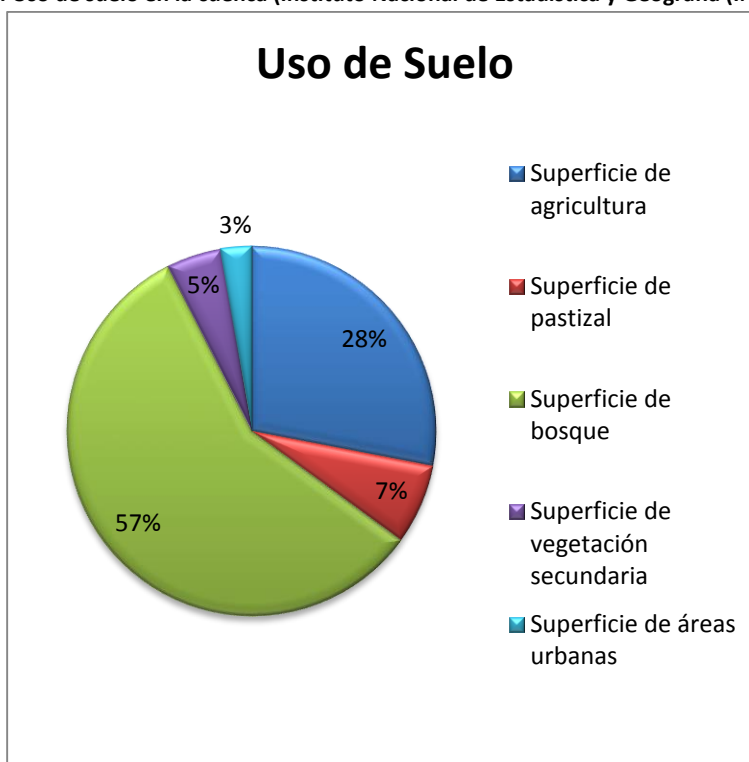


Figura 2.2. Porcentaje de uso de suelo en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

2.1.2. Geografía humana

Actividades Económicas

La región tiene un mediano desarrollo económico derivado de diversos factores. Por una parte, su clima la hace propicia para la agricultura, y la abundancia de agua durante todo el año, ya sea en forma de precipitación o de escurrimiento, contribuye a la eficiencia de esta actividad. Sin embargo, la orografía accidentada limita las superficies aprovechables no sólo para el cultivo, ya que limita la zona de pastizales para que el ganado pueda pastar.

Un factor importante es la ubicación de la cuenca como punto obligado de comunicación en el centro del país, lo que le da la posibilidad de comercio con otras regiones. Recientemente, la posibilidad de realizar actividades turísticas, además del sector de bienes raíces en la cuenca, le ha dado un impulso a la actividad terciaria para el ingreso de capital.

Actividades primarias

La agricultura sigue siendo la actividad con mayor presencia en la región (Tabla 2.3, pág. 74). Se plantan semillas, frutas y verduras en hortalizas para consumo casero y para comerciar. Además, la producción de forrajes impera en los volúmenes de producción regionales.

El cultivo del maíz repunta en la región, sin embargo, el volumen producido se dirige al autoconsumo; por otra parte, otros productos que ocupan menor superficie sí son comerciados fuera de la cuenca.

La superficie total sembrada es de 13 mil 645 hectáreas, es decir, 136 millones 645 mil metros cuadrados, y 136.45 kilómetros cuadrados (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010).

El 74 por ciento del territorio aprovechado en siembra, es decir, 10 mil 83 hectáreas, se trata de cultivos dependientes de la lluvia de temporal, mientras que el 26 por ciento restante necesita de un sistema de riego artificial. La avena para forraje resulta ser el producto con mayor producción (Tabla 2.4, pág. 74).

La superficie de siembra de avena forrajera es el 22 menor que la de maíz grano, pero produce 59 por ciento más de toneladas.

Para la ganadería, se tiene la crianza de especies bovinas, porcinas, ovinas y aves de corral, con los siguientes volúmenes de producción mostrados en la Tabla 2.5 (pág. 75), siendo la primera la más competitiva.

Los dos productos principales derivados de la ganadería para la región son la leche de bovino y el huevo para plato, que tienen una producción de mil 125 litros anuales, siendo el 0.24 por ciento de la cifra estatal, y 146 toneladas, representando el 1.04 por ciento del huevo mexicano.

Otros conceptos que repuntan dentro de las actividades primarias en la región se presentan en la Tabla 2.6 (pág. 76).

Se aprecia que la actividad que presenta mayor producción es la cosecha de avena forrajera, con un volumen de 61 mil 117 toneladas al año, pero estatalmente la silvicultura de maderas coníferas representa el 10 por ciento, es decir, es el que contribuye más para esta actividad dentro del Estado de México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010).

Actividades secundarias

Dentro de la producción de capitales dentro de la cuenca son las que representan menor ingreso. En la región, el único recurso que se transforma es el agua, que tiene un aprovechamiento en generación de energía eléctrica (Tabla 2.7, pág. 76, y se explicará a detalle en el subcapítulo 2.3.2).

Actividades terciarias

Son las que han tenido un repunte constante en la región desde hace algunas décadas, debido principalmente a integración en las comunicaciones y la difusión de la oferta económica. La puesta en escena de la infraestructura como motor de la economía local y nacional ha desarrollado al sector terciario.

Actualmente las poblaciones de la región cuentan con todos los servicios comerciales, lo que la hace un punto de intercambio interesante para el mercado. La autopista de conexión con la ciudad de Toluca y las carreteras hacia Ciudad Altamirano, Zitácuaro y Atlacomulco son parte del escenario que brindan las actividades terciarias.

La presa de Valle de Bravo ha dado otro importante impulso de la actividad turística: se ofrecen paseos en lancha, pesca deportiva, ecoturismo y actividades recreativas extremas; Valle de Bravo como 'Pueblo mágico' (nombramiento recibido en 2005) también es un foco de atracción para el turismo cultural.

Los servicios con los que cuenta la región con producción renombrada se muestran en la Tabla 2.8 (pág. 76).

Finalmente, resumiendo las tres actividades, primarias, secundarias y terciarias, no es posible definir de manera directa la que de más valor a la producción y que sirva como estandarte del desarrollo en la región, sin embargo, es posible medir la que tiene mayor impacto dentro del estado: con casi el 16 por ciento, la actividad turística, reflejada en el establecimiento de hoteles,

es la que repunta más dentro de la actividad económica de la cuenca, de tal forma que podemos considerar a las actividades terciarias como las más importantes para la región.

Población, sociedad y gobierno

El conteo de 2010 de INEGI reveló que la población total en la cuenca es de aproximadamente 84 mil 467 habitantes, que significa el 0.56 por ciento del total estatal, y se distribuyen como se muestra en la Tabla 2.9 (pág. 76).

Prácticamente la mitad de la población son mujeres, con el 51 por ciento. El tipo de población se presenta en la Figura 2.6 (pág. 78). Los datos de natalidad y mortalidad en 2010 fueron muy parecidos y menores del uno por ciento estatal (Tabla 2.10, pág. 76).

Como se mostró en la Tabla 2.8 (pág. 76), la actividad terciaria es la dominante y la que concentra el capital, sin embargo, la mayor parte de la población sigue siendo indígena (otomíes, mazahuas y nahuas) que se dedican a las actividades primarias, lo que significa una desigual distribución de los recursos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010).

Además, la población está dividida entre urbana y rural, y las actividades terciarias tienen mayor impacto en la urbana, otra forma de demostrar que la riqueza está desigual en la región. La población indígena representa el 10.48 por ciento del total en la cuenca, es decir, poco más de 8 mil 800 habitantes.

Las tres poblaciones más habitadas son Valle de Bravo, Avándaro y Amanalco de Becerra. La población total se distribuye en 20 mil 92 viviendas (información de vivienda y urbanización en la Tabla 2.11, pág. 77). En cuanto a los servicios básicos, las cifras de infraestructura para educación se muestran en la Tabla 2.12 y para la infraestructura para salud la Tabla 2.13 (págs. 77 y 77).

La cuenca abarca los municipios de Amanalco, Valle de Bravo, Donato Guerra, Villa Victoria, Villa de Allende, Temascaltepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec. Cada uno de ellos se divide en:

- a) Presidente municipal
- b) Síndico
- c) Regidores de mayoría relativa
- d) Regidores de representación proporcional

Cada uno tiene la comisión de atender las necesidades de la población: seguridad pública, desarrollo municipal, recaudación de impuestos, desarrollo urbano, obras públicas, fomento agropecuario y forestal, vivienda, agua potable y alcantarillado municipal, alumbrado público, preservación y restauración del medio ambiente, educación, salud, cultura, recreación y deporte, abasto de bienes básicos, empleo y espacios comunes.

Según la estadística, todo el dinero que ingresa como presupuesto es egresado en pagos de obra pública y servicios (Secretaría de Gobernación (SEGOB)).

Concepto (Hectáreas en 2010)	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatal
Superficie sembrada total	13,645	890,170	1.53%
Superficie sembrada de avena forrajera	1,946	68,362	2.85%
Superficie sembrada de frijol	17	12,541	0.14%
Superficie sembrada de maíz grano	8,920	562,496	1.59%
Superficie sembrada de pastos	5	86,311	0.01%
Superficie sembrada de tomate rojo (jitomate)	3	1,483	0.20%
Superficie sembrada de tomate verde	66	3,074	2.15%
Superficie sembrada del resto de cultivos nacionales	2,688	137,231	1.96%

Tabla 2.3. Superficies sembradas en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

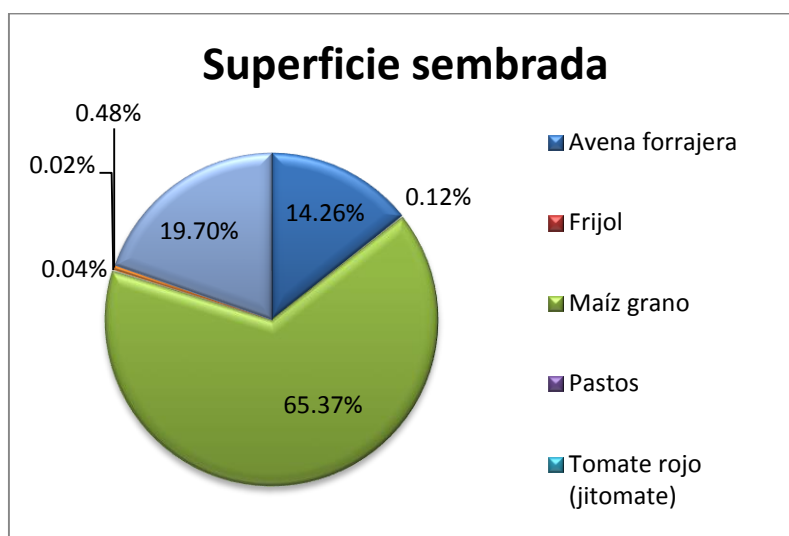


Figura 2.3. Porcentaje de productos sembrados en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto (Toneladas en 2010)	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatal
Volumen de la producción de avena forrajera	61,117	1,370,779	4.46%
Volumen de la producción de frijol	12	6,664	0.18%
Volumen de la producción de maíz grano	25,010	1,549,545	1.61%
Volumen de la producción de tomate rojo (jitomate)	188	81,712	0.23%
Volumen de la producción de pastos	40	2,645,546	0.00%
Volumen de la producción de tomate verde	519	52,138	1.00%

Tabla 2.4. Volumen de producción en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

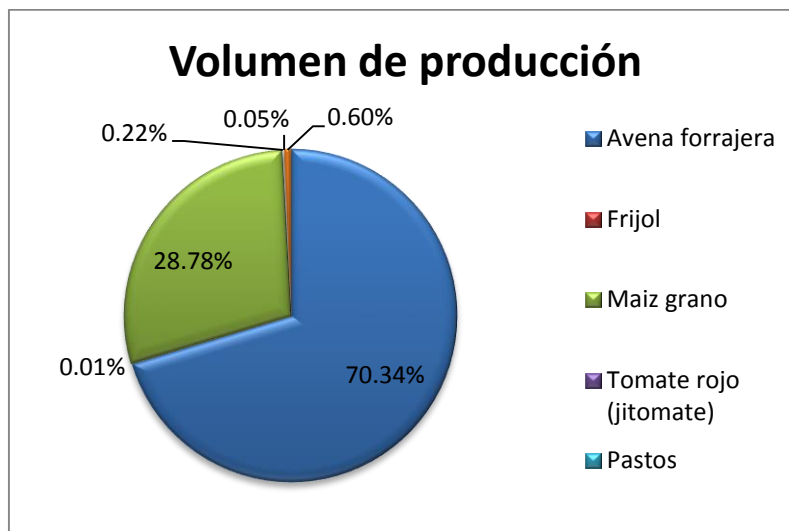


Figura 2.4. Porcentaje de producción en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto (Toneladas en 2010)	Valle de Bravo-Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatal
Volumen de la producción de carne en canal de bovino	377	42,989	0.88%
Volumen de la producción de carne en canal de porcino	183	19,950	0.92%
Volumen de la producción de carne en canal de ovino	169	8,297	2.04%
Volumen de la producción de carne en canal de gallináceas	198	99,518	0.20%
Volumen de la producción de carne en canal de guajolotes	41	2,504	1.64%

Tabla 2.5. Producción ganadera en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

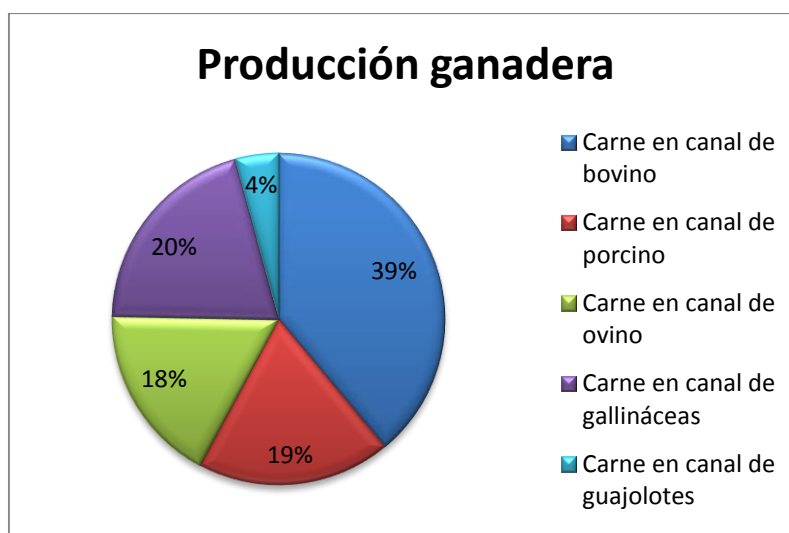


Figura 2.5. Porcentaje de producción ganadera en la cuenca.

Concepto	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatad
Volumen de la producción de miel (Toneladas), 2010	27	1,265	2.13%
Volumen de la producción de cera en greña (Toneladas), 2010	1	41	2.44%
Volumen de la producción forestal maderable (Metros cúbicos rollo), 2010	18,941	195,833	9.67%
Volumen de la producción forestal maderable de coníferas (Metros cúbicos rollo), 2010	17,424	173,260	10.06%

Tabla 2.6. Producciones varias en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaj e Estatal
Usuarios de energía eléctrica 2010	35,137	3,524,114	1.00%
Volumen de las ventas de energía eléctrica (Megawatts-hora), 2010	1,063,498	16,089,554	6.61%
Valor de las ventas de energía eléctrica (Miles de pesos), 2010	102,439	23,653,359	0.43%
Personal ocupado dependiente de la razón social. Manufactura, 2008	633	439,892	0.14%
Unidades económicas. Manufactura, 2008	220	48,357	0.45%

Tabla 2.7. Actividades secundarias en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcenta je Estatal
Tianguis, 2010	3	1,237	0.24%
Mercados públicos, 2010	4	659	0.61%
Oficinas postales, 2010	18	1,419	1.27%
Automóviles registrados en circulación (Automóviles), 2012	11,478	3,281,810	0.35%
Vehículos de motor registrados en circulación (excluye motocicletas), 2012	16,107	4,047,404	0.40%
Camiones de pasajeros registrados en circulación, 2012	8	16,520	0.05%
Cuartos registrados de hospedaje, 2010	1,404	22,862	6.14%
Establecimientos de hospedaje, 2010	105	657	15.98%
Longitud de la red carretera (kilómetros), 2010	325	14,216	2.29%
Sucursales de la banca comercial, 2010	7	1,284	0.55%

Tabla 2.8. Actividades terciarias en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto (2010)	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatal
Población total	84,467	15,175,862	0.56%
Población total hombres	41,520	7,396,986	0.56%
Población total mujeres	42,947	7,778,876	0.55%

Tabla 2.9. Población en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatal
Nacimientos, 2012	2,218	326,412	0.68%
Defunciones generales, 2012	473	72,001	0.66%

Tabla 2.10. Natalidad y fecundidad en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto (2010)	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatad
Total de viviendas particulares habitadas	20,092	3,749,106	0.54%
Promedio de ocupantes en viviendas particulares habitadas	9	4	
Viviendas particulares habitadas que disponen de agua de la red pública en el ámbito de la vivienda	17,720	3,383,410	0.52%
Viviendas particulares habitadas que disponen de drenaje	17,189	3,472,355	0.50%
Viviendas particulares habitadas que disponen de energía eléctrica	19,269	3,646,743	0.53%
Tomas domiciliarias de agua entubada	19,608	3,309,436	0.59%
Tomas instaladas de energía eléctrica	35,137	3,524,114	1.00%

Tabla 2.11. Datos de vivienda en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto (2010)	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatad
Total de escuelas en educación básica y media superior	277	20,997	1.32%
Escuelas en preescolar	111	8,254	1.34%
Escuelas en primaria	98	7,761	1.26%
Escuelas en secundaria	55	3,585	1.53%
Escuelas en bachillerato	13	1,297	1.00%
Escuelas en formación para el trabajo	1	338	0.30%

Tabla 2.12. Infraestructura para educación en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto (2010)	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatad
Unidades médicas	10	101	9.90%
Unidades médicas en la Secretaría de Salud del Estado	16	1,200	1.33%
Unidades médicas en el ISSSTE	1	42	2.38%

Tabla 2.13. Infraestructura para salud en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

Concepto	Valle de Bravo- Amanalco	Estado de México	Porcentaje Estatad
Ingresos brutos de los municipios (Miles de pesos), 2012	482,664	34,378,101	1.40%
Egresos brutos de los municipios (Miles de pesos), 2012	482,664	34,378,101	1.40%

Tabla 2.14. Finanzas públicas en la cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

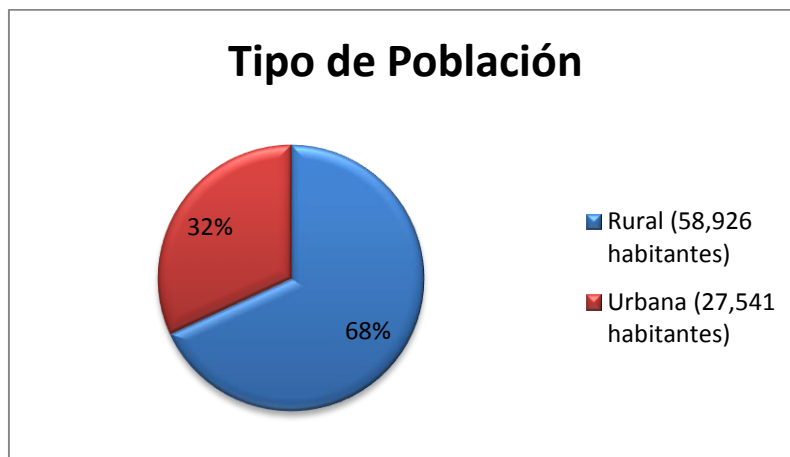


Figura 2.6. Tipo de población en la Cuenca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)



Figura 2.7. Población indígena que habla español (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010)

2.1.3. Historia

La Cuenca Valle de Bravo-Amanalco ha sido ancestralmente poblada debido a la existencia de agua en abundancia; muchos de los pueblos que se fundaron aquí tienen nombres que hacen referencia al vital líquido, como el mismo Amanalco, que significa “lugar donde se guarda el agua”.

La región fue habitada desde la prehistoria, y se han encontrado vestigios de pueblos nómadas que transitaban con especies como el mamut aproximadamente hace 15 mil a 20 años. Sin embargo, los primeros asentamientos humanos, establecidos como aldeas, datan de entre 12 mil a 7 mil años.

Fue hasta el llamado periodo Clásico mesoamericano que se estableció un grupo más numeroso y con una cultura más definida: los otomíes, llamados matlatzincas por los mexicas. Este pueblo convivió con tarascos, chichimecas y mexicas, sin embargo, para el Postclásico, los matlatzincas

estaban dominados por los mexicas y se tienen registros de tributos a Tenochtitlán desde el año de 1476, cuando la región se consideraba dentro del señorío de Metepec.

La conquista española sobre el imperio azteca hizo caer a la región matlatzinca sobre su dominio en 1521, con las batallas ganadas por Gonzalo de Sandoval y Andrés de Tapia. El territorio de la cuenca pasó a manos de Hernán Cortés y se agregó al Marquesado del Valle de Oaxaca.

Durante los años consecuentes, los frailes franciscanos comenzaron la inmensa labor de evangelización de los pueblos de habla otomí, para lo que se construyeron numerosos conventos por toda la región.

Durante la colonia se establecieron encomiendas españolas para la producción agrícola y artesanal en las haciendas regadas por toda la cuenca, y que ocuparon la mano de obra de los pueblos de Matlatzinco, además de los mazahua, vecinos de la región que son originarios de tierras más al norte y colindantes con el actual Michoacán.

El final de la colonia en la cuenca vino en 1810 con el levantamiento independentista de Miguel Hidalgo, al cual se unieron los habitantes de la región, quienes lucharon contra el ejército realista comandado por Juan Bautista de la Torre.

En el inicio del México independiente, la región se mantuvo en la tarea de reconstrucción debido a los estragos dejados por la campaña bélica. Sin embargo, con la guerra de Reforma, hubo más levantamientos armados en la cuenca, donde la lucha de Lucas Alamán fue la que motivó a los pobladores para unirse a la gesta.

A finales del siglo XIX, la cuenca, que en su mayoría se dedicaba a la producción agrícola de riego intensivo, se encontraba en procesos de cacicazgos permitidos por el gobierno del general Porfirio Díaz, que al igual que en muchas regiones de México, estaban sometidos a injusticias sociales y laborales.

Debido a eso, para el inicio de la Revolución se contaba con muchos simpatizantes del ejército de Emiliano Zapata, y campesinos de la cuenca se unieron al levantamiento armado contra el ejército de Díaz.

Los gobiernos que emergieron del movimiento revolucionario de 1910 formalizaron el carácter municipal del territorio, logrando la actual división política y la pertenencia a la entidad política conocida como Estado de México.

La creciente industria que se comenzó a desarrollar en el Valle de Toluca desde principios del siglo pasado necesitó de una mayor cantidad de energía, y debido a que la tendencia mundial era la de crear infraestructura que modernizara los métodos de producción existentes, el Gobierno Federal decidió la creación de un sistema de presas hidroeléctricas escalonadas, para las que se tomó en consideración la cuenca Valle de Bravo- Amanalco.

Desde la época prehispánica hasta hoy, la región de la cuenca Valle de Bravo- Amanalco fue lugar de intercambio cultural de los pueblos de los Altiplanos Centrales con los de la región de la llamada 'Tierra Caliente' (Michoacán y Guerrero en la zona del Balsas), y debido a sus características favorables para la explotación de recursos fue primordial su desarrollo para los gobiernos.

El Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán

A partir del año 1917 los recursos primordiales para la nación, como el agua, fueron administrados por el gobierno. Con el mandato de crear a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en 1933 se cierra un capítulo en el que la generación de electricidad era controlada por capitales privados.

En el año de 1937 los primeros ingenieros enviados por la CFE arriban a Valle de Bravo para realizar los estudios del proyecto hidroeléctrico Ixtapantongo, después llamado Miguel Alemán, que consistía en 6 presas generadoras a lo largo de 60 kilómetros desde la ciudad de Toluca y las cuencas aprovechadas, como la de Valle de Bravo- Amanalco.

La CFE expropió los terrenos necesarios para el proyecto entre los años de 1946 y 1954, e indemnizó a los afectados de los ejidos inundados. Para la presa Valle de Bravo, en 1947, se habían anegado ya 2 mil 900 hectáreas de antiguas tierras de cultivo para la construcción del vaso (Sierra López & et al, 2012).

Con 18 unidades de operación distribuidas a lo largo de la línea de producción eléctrica, el sistema Miguel Alemán consiguió la generación de 458 mil 775 kilowatts por hora.

El 16 de octubre de 2003 se constituyó la Comisión de Cuenca Valle de Bravo- Amanalco, que pertenece al Consejo de Cuencas Aguas del Valle de México, y su función es administrar los recursos hídricos que escurren por la región así como los recursos naturales asociados a ella.



Imagen 2.1. Iglesia de Valle de Bravo*



Imagen 2.2. Población indígena en la cuenca*



Imagen 2.3. Actividades económicas de la cuenca*

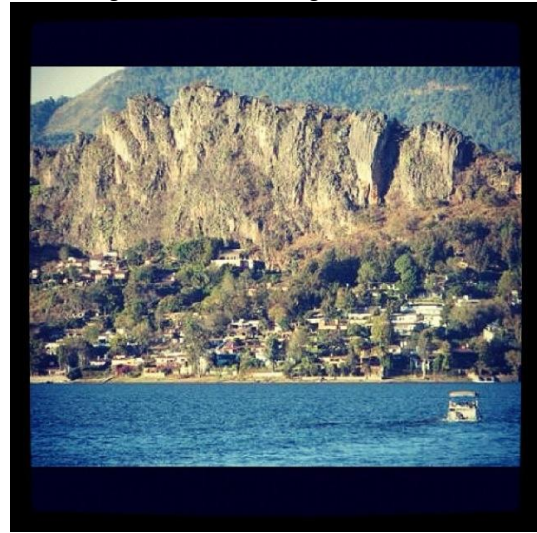


Imagen 2.4. Orografía e Hidrografía de la cuenca*



Imagen 2.5. Población urbana en la cuenca*



Imagen 2.6. Sociedad de la cuenca*

*Imágenes públicamente compartidas en Instagram®

2.2. Diagnóstico hidrológico, hidrométrico, de uso de suelo y pérdida

Agua y vegetación

El fenómeno de erosión y pérdida de suelo en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco está relacionado a su situación hidrológica, hidrodinámica y ambiental (como se definió al proceso en el subcapítulo 1.3.1). Es necesario presentar un resumen de los principales datos que inciden o participan para atacar al suelo en la región.

El agua en circulación dentro de la cuenca se medirá con los volúmenes que circulan respecto al tiempo en las cuencas, incluido su arribo a la región en forma de lluvia. Existen cinco estaciones hidrométricas que miden el caudal que fluye en las corrientes principales de las subcuencas que integran Valle de Bravo - Amanalco. Cada una de ellas tiene diferentes años de operación además de distintos lapsos en los que la información no está completa, sin embargo, en la Tabla 2.15 se muestra un promedio basado en los datos existentes de los caudales registrados: en la primer columna se encuentran los gastos medios anuales, en la segunda los mínimos y en la tercera los máximos.

Estación	Promedio de 25 años, en $\frac{m^3}{s}$		
	Q_m	Q_{Min}	Q_{Max}
El Carrizal	0.36	0.05	0.96
El Molino	2.35	0.08	4.48
El Salto	3.9	1.82	9.33
Santa Mónica	0.16	0.09	0.24
Vertedor González	0.89	0.37	1.1

Tabla 2.15. Caudales registrados por corriente de subcuenca (Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, 2006)

La información sobre precipitación se genera por las estaciones meteorológicas con las que cuenta la región. Cuatro puntos miden la altura de lluvia que cae, todas con diferentes años de trabajo, pero con una temporalidad de 30 años cuasi continuos, aproximadamente. Los datos se encuentran en la Tabla 2.16, donde aparecen las alturas promedio en milímetros. Se aprecia que los niveles de agua y de temperatura media anual no varían de manera abrupta, seguramente por las escasas variaciones climáticas presentadas en la cuenca (subcapítulo 2.1.1).

Otro factor influyente en el proceso de erosión y pérdida de suelo es el uso que se le da, particularmente la modificación a la cubierta vegetal. En este caso, se sabe que los ecosistemas originales en la región son el bosque de coníferas y las praderas, su crecimiento o decremento en superficie, gestado en su aprovechamiento silvícola, agrícola o ganadero, determinará el grado de descubrimiento para el ataque por la intemperie.

Estación	Promedio de 30 años	
	Precipitación	Temperatura
	(<i>mm</i>)	anual ($^{\circ}C$)
Amanalco de Becerra	1,185	14.5
Presa Valle de Bravo	1,116	18.8
Valle de Bravo	865	18.2
Palo Mancornado	1,130	11.6

Tabla 2.16. Precipitación y temperatura (Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, 2006)

En la Tabla 2.17 se muestra su evolución (Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, 2006). Como se puede apreciar, de 1986 a 2001 se incrementó poco menos del 10% el uso de suelo agrícola, mientras que el pastizal se redujo casi un 38%. Posteriormente, de 2001 a 2004 se reduce drásticamente la superficie agrícola (poco más del 14%), mientras que la mancha urbana en la cuenca aumenta a más del 18% de su tamaño anterior.

Uso	Superficie (<i>ha</i>)			Incremento o decremento			
	Año			En 15 años		En 3 años	
	1986	2001	2004	Superficie		Superficie	
				(<i>ha</i>)	%	(<i>ha</i>)	%
Agricultura	17,439.40	19,370.78	16,655.62	Incremento	1,931.38	11.07%	Reducción
Agua	1,456.49	1,593.44	1,656.96	Incremento	136.95	9.40%	Incremento
Bosque	30,569.60	31,105.54	33,012.61	Incremento	535.94	1.75%	Incremento
Pastizal	7,063.95	4,414.27	4,972.90	Reducción	-2,649.68	37.51%	Incremento
Zona urbana	795.94	841.34	1,027.29	Incremento	45.40	5.70%	Incremento

Tabla 2.17. Evolución del uso de suelo (Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, 2006)

Este uso y su modificación temporal deriva de políticas de manejo del territorio, es decir, decisiones gubernamentales, ejidales, comerciales y un largo etcétera meramente antropogénico.

Geología y edafología

Más del 90 por ciento de la cuenca Valle de Bravo- Amanalco es de origen volcánico. Existen numerosas estructuras ígneas esparcidas por toda la cuenca, que representan sus partes más altas y que finalmente dan forma al parteaguas.

La superficie volcánica se constituye por conos en diferentes niveles de degradación, cenizas, derrames de lava, basaltos y granitos.

La morfología correspondiente a los valles aluviales se integra por rellenos de azolves de las laderas circundantes, naturalmente, todas de origen volcánico. Algunas fueron lagunas que debido

al taponamiento por lenguas de lava, como es el Valle de Amanalco y el Valle y Laguna de Capilla Vieja, depositaron sus azolves.

Los únicos relieves diferentes se encuentra alrededor de la presa Valle de Bravo: esquistos, estructuras de origen metamórfico, localizados en el límite norte del vaso y en el lomerío al norte de la ciudad de Valle de Bravo, que forma el parteaguas entre los ríos Amanalco y Las Flores, al poniente del poblado de Rincón de Estrada. La distribución en la cuenca se muestra en la Tabla 2.18.

Unidad geomorfológica	Superficie en la cuenca (ha)
Cono cinerítico	998.87
Depresión volcánica	8,652.78
Derrames basálticos tipo lengua	5,284.32
Derrames lávicos basálticos tipo mesa	3,248.82
Laderas metamórficas	139.17
Laderas y lomeríos riolíticos	1,715.80
Lomeríos basálticos	7,610.19
Pie de monte volcánico	4,678.04
Planicie volcánica	3,760.35
Superficies complejas de lavas y piroclásticos	3,085.40
Valles erosivos y taludes muy inclinados	1,149.10
Volcanes y laderas andesíticas	12,606.16
Volcanes y laderas basálticas	4,390.65
Total	57,319.65

Tabla 2.18. Distribución de las formas geológicas en la cuenca (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008)

En lo que respecta a la edafología de la cuenca, los suelos que se presentan son los que se muestran en la Tabla 2.19 (pág. 87).

Las unidades de suelo encontradas en la cuenca se describen a continuación:

- Acrisol órtico:** Los acrisoles son suelos con acumulación aluvial de arcilla y muy baja saturación de bases. Presenta un horizonte órtico, de color oscuro, con un contenido alto de carbono orgánico de 1% o más, y una saturación de bases de 50% o más, como resultado del cultivo y fertilización intensa o una continua aplicación de desechos humanos o animales u otros residuos orgánicos. Son suelos con un nivel de fertilidad bajo lo cual se hace evidente en los rendimientos de los cultivos que en ellos se establecen. Debido a la acidez requieren de encalado y pueden presentarse minerales aluminosilicatados que fijan el fósforo y limitan su aprovechamiento. El uso recomendable es bajo praderas permanentes con adiciones fertilizantes de nitrógeno, fósforo y potasio acompañado con encalado. Al igual que los acrisoles húmicos, pueden presentar

problemas de fertilidad, acidez y fijación de fósforo. Se recomiendan para pastoreo y producción de forraje.

- **Cambisol crómico:** Connotativo de suelos en los cuales se han llevado a cabo cambios en el color, estructura y consistencia como resultado del proceso de intemperismo *in situ*. Los cambisoles presentan un horizonte B cámbico que muestra evidencias de alteración relativa y un contenido de arcilla mayor que el del horizonte subyacente y la estructura esta moderadamente desarrollada. Con los sistemas tradicionales de labranza estos suelos dan cosechas moderadas de maíz. Cuando se presenta fase lítica pueden utilizarse para cultivos arbóreos, con aplicaciones de fosfatos a intervalos regulares. Debajo de los árboles deberán utilizarse cultivos de cobertera.
- **Cambisol dístrico:** Presentan un horizonte B Cámbico o un horizonte A úmbrico mayor de 25 centímetros. La saturación de bases es menor de 50% (NH_4OAc), al menos en una parte del horizonte B. Debido a su naturaleza generalmente se encuentra asociado a fases líticas por lo que no son de gran valor para la agricultura y se deben dedicar a la preservación de la vida silvestre y bajo las mejores condiciones dedicarse a la producción frutícola.
- **Feozem háplico:** Connotativo de suelos ricos en materia orgánica y que tienen una superficie de color oscuro. Tienen un horizonte A mólico y posiblemente un B cámbico, pero carece de concentraciones de caliza pulvurenta suave, y tampoco muestran un aumento con la profundidad de la saturación de sodio y potasio dentro de los primeros 125 centímetros de la superficie o dentro de los 50, debajo de la base del horizonte B (si se encuentra presente). No presenta horizonte cálcico o gypsic dentro de los primeros 100 centímetros de la superficie.
- **Litosol:** Suelos con piedra dura a una profundidad muy superficial. Están limitados en profundidad por una roca dura, continua y coherente dentro de los 25 centímetros de la superficie. Dada su profundidad, no son susceptibles de ser usados en la agricultura, se recomiendan para reforestación o para preservación de la cubierta vegetal natural ya existente.
- **Luvisol crómico:** De acumulación aluvial de arcilla. Suelos que tienen un horizonte A pálido o sómbrico (a menos que estén erosionados), el cual se endurece cuando está seco y tiene un horizonte B argilúvico café fuerte a rojo; carecen de un horizonte plíntico dentro de los primeros 125 centímetros de la superficie. En estos suelos se puede tener una variedad más amplia de cultivos, con producción aceptable, en la agricultura tradicional puede haber beneficios si se aplica fertilización con fósforo y nitrógeno, pero puede presentar fases líticas o petrocálcicas o presentar en su superficie piedras o cantos rodados, que limiten el uso de la tecnología. Cuando este último es el caso su aprovechamiento se puede reducir al aprovechamiento de pastos o cultivos arbóreos.
- **Andosol húmico:** Suelos formados a partir de materiales ricos en vidrio volcánico y que comúnmente presenta un horizonte superficial oscuro. Las propiedades húmicas se refieren a suelos con alto contenido de carbono orgánico en la superficie del suelo. El material tiene al menos 1.4% de carbono orgánico en los primeros 100 centímetros de

suelo superficial. Presentan en su fracción arcillosa una elevada proporción de material coloidal amorfo, el cual es el responsable de la fijación de fósforo y debido a su baja disponibilidad los rendimientos en el cultivo de maíz son bajos. Esta fijación puede disminuirse con la aplicación de cal agrícola. Como parte del manejo de estos suelos, si son dedicados a la agricultura, con el tiempo y aplicaciones frecuentes de cal y fertilizaciones fosfatadas se pueden tener buenos rendimientos de maíz y de otros cultivos básicos. Por encontrarse en estado suelto se debe mantener una cubierta vegetal permanente y con esto evitar que sean erosionados.

- **Andosol mólico:** Presentan un horizonte superficial mólico (suave) de color oscuro con una alta saturación de bases, bien estructurado y un contenido de materia orgánica de alto a moderado. Por sus características son dedicados a la agricultura y alcanzan su mayor éxito cuando son fertilizados con un balance adecuado de fertilizantes fosfatados, nitrogenados y potásicos. Aunque las necesidades de encalado no son tan frecuentes, son necesarias para mantener sus niveles de fertilidad. Es necesario tomar medidas para combatir la erosión en este tipo de suelos, tales como mantener vegetación permanente y evitar el sobrelaboreo.
- **Andosol ócrico:** Su densidad aparente es menor de $0.8 \frac{g}{cm^3}$ y el complejo de intercambio es dominado por materiales amorfos o 60% o más de vidrio volcánico u otro material piroclástico en el limo, arena o fracciones de grava. Su consistencia es friable o presenta una textura limosa o más fina en todos los horizontes dentro de los 100 centímetros superficiales. Su uso se encuentra entre el de los andosoles mólico y húmico, y presentan los mismos problemas en cuanto a la fijación de fósforo. Las medidas para su conservación son las mismas para los otros andosoles presentes.
- **Rankers:** (de Australia, Rank, pendiente inclinada; connotativa de suelos superficiales que provienen de materiales silicios). Presenta un horizonte A úmbrico que se encuentra inmediatamente arriba de un material no calcáreo; no debe presentarse un estrato de roca dentro de los primeros 25 centímetros de suelo. No presenta otros horizontes de diagnóstico.
- **Vertisol pélico:** Suelos que se encuentran en constante movimiento. Se encuentran mezclados después de los 20 centímetros superficiales, tienen 30% o más de arcilla en todos los horizontes al menos hasta los 50 centímetros. En algunos periodos presenta grietas de al menos 1 centímetro de ancho a una profundidad de medio metro (a menos que esté bajo riego) y tiene alguna de las siguientes características: microrelieve de gilgai, caras de deslizamiento, agregados estructurales paralelepípedos a una profundidad entre 25 y 100 centímetros de la superficie. Son suelos compactos y adherentes en la estación lluviosa pero se contraen y endurecen, agrietándose en la estación seca. Las oquedades que se abren pueden ser perjudiciales para las raíces de los árboles. Aunque son suelos fértiles presentan problemas para su manejo agrícola.
- **Vertisol Crómico:** Además de presentar las características del vertisol pélico, este vertisol tiene un chroma en húmedo menor de 1.5 dominante en la matriz del suelo en los 30

centímetros superiores. Varían igual que los vertisoles pélicos dependiendo la estación lluviosa.

- **Regosoles dístrico:** Capa de material suelto que se encuentra arriba de la corteza terrestre; suelos no desarrollados o débilmente desarrollados. Suelos que no presenta otro horizonte diagnóstico, a menos que se encuentre enterrado a más de 50 centímetros del nuevo material, un horizonte A ocrico. Presenta una saturación de bases menor de 50%, al menos en una parte del suelo entre 20 y 50 centímetros de su superficie. Generalmente no son utilizados para la producción de cultivos anuales, su aprovechamiento puede ser par la producción de pastos o para preservación de la vegetación natural ahí desarrollada.
- **Feozem lúvico:** mismas características que el Feozem háplico.
- **Cambisol éútrico:** Los cambisoles presentan un horizonte A úmbrico y un horizonte B cámbico, el cual tiene una saturación de bases de 50% o mayor cuando menos en algún horizonte, que muestra evidencias de alteración relativa y un contenido de arcilla mayor que el del horizonte subyacente y la estructura esta moderadamente desarrollada. En cultivos tradicionales como el maíz, en estos suelos pueden tener rendimientos aceptables, sin embargo hay que realizar algunas prácticas para mantener su fertilidad y evitar la erosión. Un uso adecuado es la producción de especies arbóreas y pastos.
- **Feozem calcárico:** Suelos que tienen un horizonte A mólico. muestra una fuerte efervescencia al HCl en la mayoría de la fracción fina, contiene más de 2% de CaCO₃ equivalente.

Suelo			Área (ha)	Porcentaje
Acrisol órtico			4,298.97	7.50%
Acrisol órtico	+	Andosol húmico	3,897.74	6.80%
Acrisol órtico	+	Andosol ócrico	458.56	0.80%
Acrisol órtico	+	Cambisol dístrico	171.96	0.30%
Acrisol órtico	+	Litosol	401.24	0.70%
Acrisol órtico	+	Vertisol pélico	57.32	0.10%
Andosol húmico			12,266.41	21.40%
Andosol húmico	+	Acrisol órtico	2,120.83	3.70%
Andosol húmico	+	Andosol ócrico	4,356.29	7.60%
Andosol húmico + Andosol ócrico + Acrisol órtico			515.88	0.90%
Andosol húmico	+	Cambisol crómico	6,591.76	11.50%

Tabla 2.19. Tipos de suelos en la cuenca (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008)

Andosol húmico	+	Feozem háplico	114.64	0.20%
Andosol húmico	+	Feozem lúvico	630.52	1.10%
Andosol húmico	+	Litosol	5,445.37	9.50%
Andosol húmico	+	Vertisol pélico	114.64	0.20%
Andosol ócrico			1,203.71	2.10%
Andosol ócrico	+	Andosol húmico	8,139.39	14.20%
Andosol ócrico	+	Cambisol crómico	171.96	0.30%
Andosol ócrico	+	Feozem lúvico	229.28	0.40%
Andosol ócrico	+	Litosol	515.88	0.90%
Cambisol dístrico	+	Andosol húmico	859.79	1.50%
Cambisol dístrico + Litosol + Andosol ócrico			57.32	0.10%
Cuerpo de Agua (San Simón)			802.48	1.40%
Feozem háplico			114.64	0.20%
Feozem háplico	+	Andosol húmico	802.48	1.40%
Feozem háplico	+	Feozem lúvico	0.00	0.00%
Feozem háplico	+	Vertisol pélico	57.32	0.10%
Litosol	+	Acrisol órtico	57.32	0.10%
Litosol	+	Feozem háplico	0.00	0.00%
Litosol	+	Ranker	171.96	0.30%
Luvisol crómico	+	Andosol húmico	515.88	0.90%
Luvisol crómico	+	Cambisol éutrico	171.96	0.30%
Luvisol crómico	+	Feozem calcárico	1,089.07	1.90%
Ranker	+	Litosol	343.92	0.60%
Vertisol crómico			343.92	0.60%
Vertisol pélico			57.32	0.10%
Vertisol pélico	+	Vertisol crómico	171.96	0.30%
Total			57,319.65	100.00%

Continuación Tabla 2.19

Pérdida de suelo

La información que se presenta a continuación muestra dos tipos de significados: el primero significa el volumen de suelo por unidad de hectárea que anualmente se encuentra en peligro de pérdida por efectos hidrológicos, (pérdida potencial de suelo, subcapítulo 1.3.3); el segundo es la condición en la que se encontraba la cuenca en el año de 2008 para efectos de volumen de suelo en riesgo de ser transportado, considerando los factores de vegetación y técnicas de conservación que puedan existir en la región.

En la Tabla 2.20 se muestran la superficie de suelo en potencial pérdida, en donde se aprecia que casi el 80 por ciento de la cuenca es de un material altamente modificable y en riesgo de ser erodado (aproximadamente 45 mil hectáreas catalogadas como suelo en el que se pierden anualmente 200 toneladas del mismo) (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008).

También la Figura 2.8 ilustra el porcentaje. Por otra parte, la clasificación superficial de la cuenca de acuerdo a la masa de suelo que se puede perder que realmente ocurre en la cuenca, al menos hasta 2008, es la que se muestra en la Tabla 2.21, y en su correspondiente gráfico mostrado en la Figura 2.9.

En ellos se puede analizar que se pierden anualmente hasta 5 toneladas por hectárea como mayoría, siendo esta superficie casi el 50 por ciento del total (29 mil hectáreas se encuentran en esta condición). La zona de mayor vulnerabilidad, la que se cataloga como de más de 200 toneladas anuales, sólo representa poco menos del 15 por ciento (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008).

La Figura 2.10 y la Figura 2.11 muestran la distribución de superficies dentro de la cuenca y la forma en la que pierden el suelo anualmente.

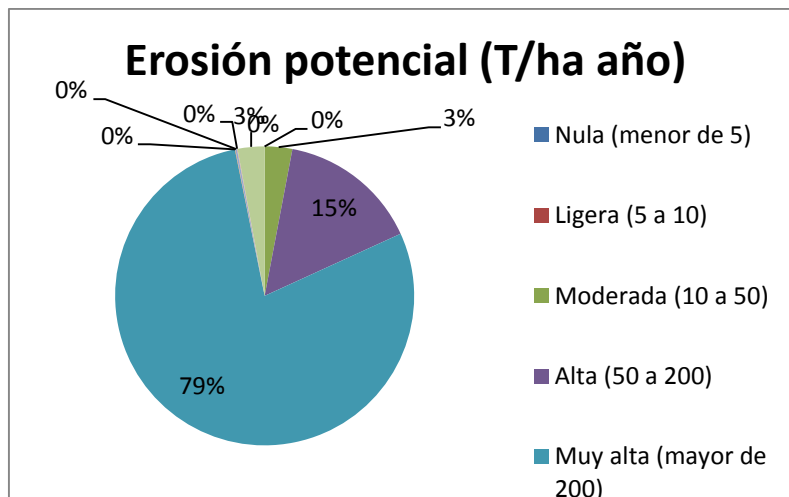


Figura 2.8. Intervalo de erosión potencial (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008)

Intervalo de erosión potencial $\left(\frac{T}{ha\ año}\right)$	Superficie (ha)	Porcentaje
Nula (menor de 5)	0.00	0.00%
Ligera (5 a 10)	0.00	0.00%
Moderada (10 a 50)	1,708.13	2.98%
Alta (50 a 200)	8,712.59	15.20%
Muy alta (mayor de 200)	45,064.71	78.62%
Laguna San Simón	28.66	0.05%
Laguna Capilla Vieja	103.18	0.18%
Presa Corral de Piedra	34.39	0.06%
Presa Valle de Bravo	1,668.00	2.91%

Tabla 2.20. Erosión potencial (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008)

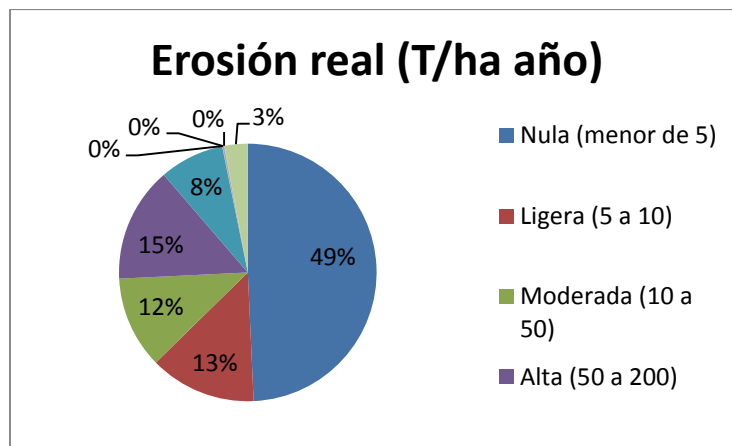
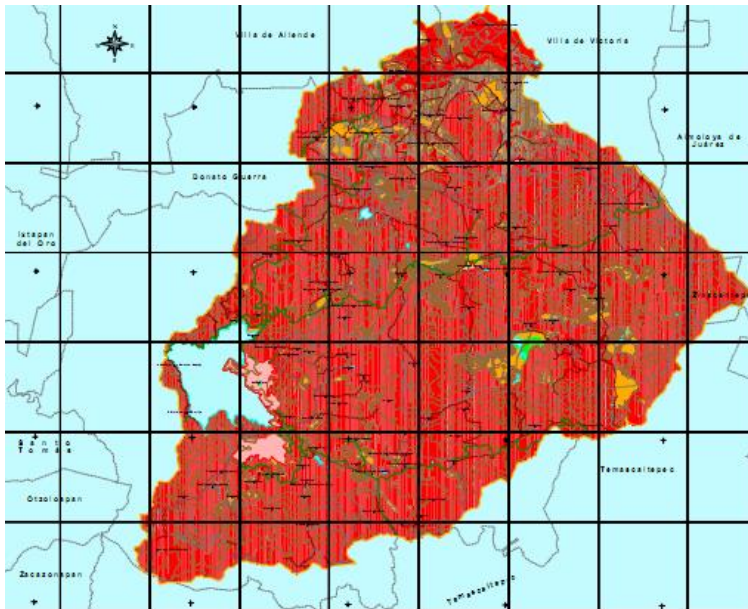


Figura 2.9. Intervalo de erosión real (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008)

Intervalo de erosión real $\left(\frac{T}{ha\ año}\right)$	Superficie (ha)	Porcentaje
Nula (menor de 5)	28,247.12	49.28%
Ligera (5 a 10)	7,669.37	13.38%
Moderada (10 a 50)	6,637.62	11.58%
Alta (50 a 200)	8,288.42	14.46%
Muy alta (mayor de 200)	4,648.62	8.11%
Laguna San Simón	28.66	0.05%
Laguna Capilla Vieja	103.18	0.18%
Presa Corral de Piedra	34.39	0.06%
Presa Valle de Bravo	1,668.00	2.91%

Tabla 2.21. Erosión real (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008)



SIMBOLOGÍA

**EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL
EN TONELADAS POR HECTÁREA
POR AÑO**

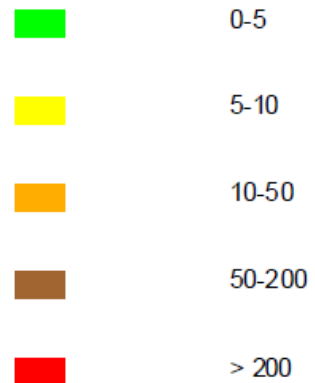


Figura 2.10. Erosión potencial (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008)

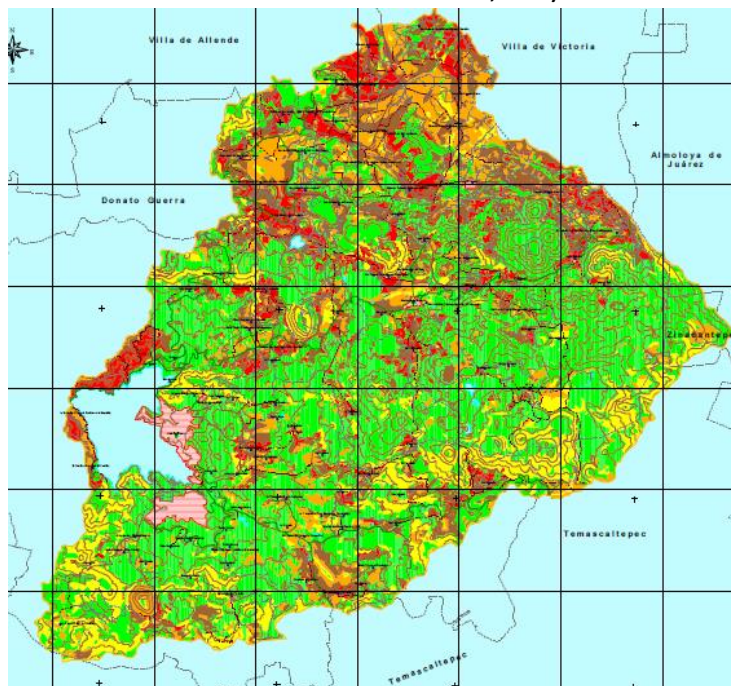


Figura 2.11. Erosión real (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008)

2.3. Importancia de la cuenca Valle de Bravo- Amanalco en México

Valle de Bravo- Amanalco es una región que repercute nacionalmente por dos razones: es una de las piezas de enorme rompecabezas de la Región Hidrológica del río Balsas, y con ella tiene una importante interacción; los índices que se presentarán en este capítulo la engloban y le repercuten.

Por otra parte, la cuenca pertenece al Sistema Cutzamala, un gigantesco proyecto de interacción con otras cuencas y dentro del cual juega un rol muy importante: abastecimiento de agua potable a una creciente población.

2.3.1. Región Hidrológica del Río Balsas

México se divide en 37 regiones hidrológicas que obedecen al flujo de los principales ríos y al escurrimiento debido a la topografía. La región del Balsas es una de ellas y se ubica al sur del país, donde se extiende entre los paralelos 17° y 20° Norte, y los meridianos 97°30' y 103°15'00 Oeste, aproximadamente (Figura 2.12, pág. 96).

Tiene una superficie de 124 mil 223 kilómetros cuadrados aproximadamente, lo que significa el 6% del territorio nacional. El curso del río Balsas cubre casi 800 kilómetros de longitud, mientras que de norte a sur, la cuenca mide entre 150 y 200 kilómetros (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA).

Se suele dividir en tres subregiones: Alto Balsas con 50,409 kilómetros cuadrados, Medio Balsas con 31,951 y Bajo Balsas con 35,046 (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA).

Administrativamente, la cuenca abarca 8 estados, que son Guerrero, Jalisco, México, Michoacán de Ocampo, Morelos, Oaxaca, Puebla y Tlaxcala. La distribución del territorio es la que se muestra en la Tabla 2.22.

Estado	Territorio Total (Km ²)	Porcentaje en la Cuenca	Territorio en la Cuenca (Km ²)
Guerrero	64,281	63%	40,497
Jalisco	80,386	4%	3,215
México	22,499	36%	8,100
Michoacán de Ocampo	59,928	62%	37,155
Morelos	4,950	100%	4,950
Oaxaca	93,952	9%	8,456
Puebla	34,251	55%	18,838
Tlaxcala	4,016	75%	3,012
Total	364,263		124,223

Tabla 2.22. Distribución territorial estatal de la cuenca del Balsas (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA)

En el área se involucra a 421 municipios de los que 332 se encuentran en el Alto Balsas, 51 en el Medio y 38 en el bajo.

La región del Balsas limita al norte con las cuencas del Lerma- Santiago, Pánuco y Tuxpan- Nautla; al sur con las de la Costa Grande de Guerrero y Costa Chica- Río Verde; al oeste con las cuencas de la Costa de Michoacán de Ocampo y de Armería; y al este con la cuenca del río Papaloapan.

Orográficamente se pueden reconocer tres sistemas de relieve que se desarrollan longitudinalmente. Resalta al norte el Eje Neovolcánico Transversal, con elevaciones fluctuantes desde los miles de metros hasta la máxima elevación de la cuenca: el volcán Popocatepetl, con 5 mil 426 metros sobre el nivel del mar (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA).

En la banda central de la cuenca se encuentra la Depresión del río Balsas, con una elevación media de mil metros sobre el nivel del mar. Finalmente, la Sierra Madre del Sur cierra el parteaguas de la cuenca en la región más austral, con sistemas montañosos de hasta 2 mil metros de elevación.

La zona de menor elevación en la cuenca es la desembocadura en el Océano Pacífico, entre los estados de Guerrero y Michoacán de Ocampo, en donde el Balsas ha creado un delta de 13 kilómetros aproximadamente de depósitos.

Tanto la Depresión del Balsas como la Sierra Madre del Sur se conforman geológicamente por materiales sedimentarios y metamórficos, como calizas de diferentes periodos y composiciones minerales, e intrusiones de granito. Estos sistemas tienen un origen tectónico debido a la subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana.

El Eje Neovolcánico Transversal es de reciente formación y cubre de materiales ígneos extrusivos las zonas septentrionales de la cuenca, como basaltos y andesitas de diferente composición mineralógica.

En la región del Balsas, los meses en que se presentan las lluvias son entre junio y septiembre, y se reporta un volumen de precipitación media anual de 108 mil 370 milímetros cúbicos. Además, se sabe que la evaporación media anual es de mil 750 milímetros (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA).

En el Alto Balsas la lluvia anual promedio es de 927 milímetros, en el Medio es de 873 y en el Bajo de mil 19. Las temperaturas promedio en el Alto Balsas varían entre los 18° y 20° centígrados, 20° y 22° en el Medio y 24° y 26° en el Bajo (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA).

Los climas que se presentan en la región varían de acuerdo a la elevación y la situación geográfica, además de factores como la temperatura, presión atmosférica y precipitación. De acuerdo a la clasificación de Köppen, en la cuenca del Balsas se presenta el *Cw*, templado con inviernos secos, en las zonas donde la elevación supera los 1,500 metros sobre el nivel del mar. Los lugares donde se presentan estas condiciones son en general zonas serranas o pequeñas mesetas y valles; los

ecosistemas que se manifiestan involucran bosques de alta montaña y pastizales varios. En la cuenca, el Alto Balsas es el que presenta en mayor medida este tipo de clima.

Para las subregiones Medio y Bajo Balsas, el tipo de clima predominante se considera Aw, es decir, tropical con inviernos secos, en donde se pueden desarrollar selvas de árboles caducifolios en épocas de sequías y matorrales. Las llanuras y depresiones de elevación menor a mil metros sobre el nivel del mar tienen este tipo de ecosistemas.

Actualmente, debido a la actividad humana, los ecosistemas originales se encuentran reduciendo su área para dar paso a superficies de cultivo o ecológicamente degradadas. En 1980, la cubierta forestal de la cuenca era de 960 mil 340 hectáreas, y en 16 años se redujo a 219 mil (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA).

Hidrográficamente, además de la división en subregiones, la cuenca del Balsas también es dividida en subcuencas creadas por los ríos tributarios. INEGI tiene contempladas 10 de un tamaño y caudal considerable vertiendo sus aguas en la región: Atoyac, Balsas- Mezcala, Balsas- Zirándaro, Balsas- Infiernillo, Tlapaneco, Amacuzac, Cutzamala, Tacámbaro, Alto Tepalcatepec y Bajo Tepalcatepec. La Cuenca del río Atoyac es la más extensa y está subdividida en 3 subcuencas, que son el cauce principal, el río Mixteco y el Nexapa.

Las aguas superficiales que escurren por los ríos de la cuenca tienen una disponibilidad anual de 24 mil 484 millones de metros cúbicos. Estos se distribuyen en 6 mil 851 en el Alto Balsas, 7 mil 463 en el Medio y 9 mil 959 en el Bajo (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA).

Son tres destinos para el volumen de agua en la cuenca: generación hidroeléctrica, para el que se destinan 12 mil 699 millones de metros cúbicos anuales distribuidos en las centrales Caracol, Tingambato, Ixtapantongo, Santa Bárbara, Infiernillo, La Villita, Cupatitzio, Cobano y Texolo; y para producción agrícola en los distritos de riego se utilizan 790 mil 972 millones de cúbicos anuales. El resto del agua es drenada al Pacífico o distribuida a la población como agua potable, debido a que la región tiene una población en constante crecimiento (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA).

Como cualquier cuenca del país, la del Balsas cuenta con un Organismo administrativo que media entre la disponibilidad del agua y la demanda humana y agrícola. Este también lleva la planeación de las obras necesarias para aprovechar el agua, y además, controlar catástrofes derivadas de fenómenos meteorológicos. La sede del organismo es en la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

Esta región aporta en promedio el 7 por ciento del Producto Interno Bruto, del cual, el sector primario aporta el 12 por ciento, el secundario el 29 y el terciario el 59 (Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA).

La población en la cuenca del Balsas es de 10 millones 646 mil 100 habitantes, y se distribuyen estatalmente como se muestra en la Tabla 2.23.

Estado	Población en la Cuenca	Porcentaje	Población Total	Porcentaje por Estado
Guerrero	1,074,704	10.27%	3,388,768	31.71%
Jalisco	18,000	0.17%	7,350,682	0.24%
México	891,257	8.52%	15,175,862	5.87%
Michoacán de Ocampo	1,621,961	15.50%	4,351,037	37.28%
Morelos	1,777,227	16.99%	1,777,227	100.00%
Oaxaca	259,605	2.48%	3,801,962	6.83%
Puebla	3,749,313	35.84%	5,779,829	64.87%
Tlaxcala	1,069,033	10.22%	1,169,936	91.38%
Total	10,461,100			

Tabla 2.23. Población por estado en la cuenca (Comisión Nacional del Agua (A), 2010)

En el Alto Balsas se concentran más de un millón 359 mil habitantes aproximadamente, siendo el 13 por ciento de la población, mientras que en el Medio son más de un millón 464 mil, es decir el 14 por ciento, y más de 7 millones 636 mil en el Bajo, lo que representa el 73 por ciento.

Los principales centros urbanos en la región son: Puebla de Zaragoza, Cuernavaca, Iguala de la Independencia, Uruapan, Cuautla y Tlaxcala de Xicotécatl.

La población se concentra en los valles y altiplanos formados entre la depresión y los sistemas montañosos, dejando despobladas las montañas, que son además zonas de marginación extrema, en donde se presentan algunos de los índices de analfabetismo y extrema pobreza más representativos de México, particularmente en la Sierra Madre del Sur.

Si bien es una región en la que el agua se puede tener en relativa abundancia, la población no siempre tiene acceso a ella de manera eficiente.

Por otra parte, la infraestructura de comunicación consigue unir las ciudades importantes con el resto del país y del mundo: las ciudades como Puebla de Zaragoza, Cuernavaca, Uruapan, Lázaro Cárdenas, entre otras, cuentan con aeropuertos que reciben vuelos nacionales; Lázaro Cárdenas es un puerto de altura que exporta al pacífico.

La red carretera en la región se compone por caminos federales y estatales, y destacan por su importancia estratégica como ejes troncales las autopistas: Cuernavaca- Acapulco y su ramal a Iguala, México- Puebla y su ramal a Cuautla, Cuernavaca- Cuautla y Lázaro Cárdenas- Morelia.



Figura 2.12. La región del Balsas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI))



Figura 2.13. Subcuencas del Balsas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI))



Figura 2.14. Distribución administrativa de las cuencas de México (Comisión Nacional del Agua (A), 2010)



Figura 2.15. Cuenca Cutzamala. Se aprecia la cuenca Tilostoc, a la que pertenece Valle de Bravo- Amanalco (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI))

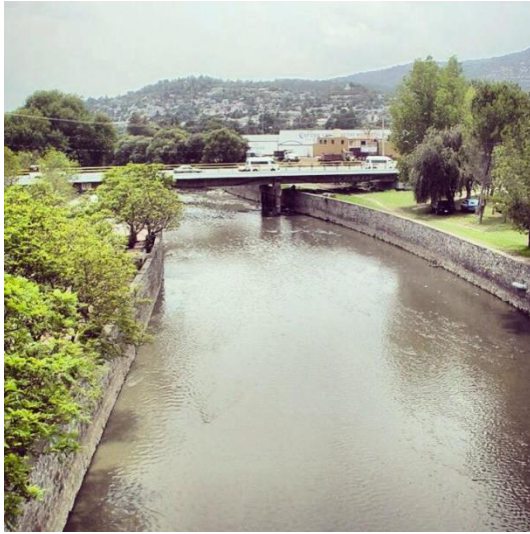


Imagen 2.7. Río Zahuapan, aguas arriba del Balsas, en su paso por Tlaxcala de Xicoténcatl



Imagen 2.8. Río Mezcala- Balsas



Imagen 2.9. Río Nexapa en su paso por Izúcar de Matamoros



Imagen 2.10. Río Mezcala- Balsas

2.3.2. Sistema Cutzamala

Se trata de un ambicioso proyecto para el abastecimiento de agua potable en la Zona Metropolitana del Valle de México, es decir, la Ciudad de México y comunidades del Distrito Federal, así como los municipios vecinos del estado de México: Huixquilucan, Naucalpan, Tlalnepantla, Atizapán, Cuautitlán, Tepotzotlán, Coacalco, Ecatepec y Nezahualcóyotl, entre otros.

El Valle de México es una cuenca naturalmente endorreica: antiguamente se encontraba un lago que se formaba con los escurrimientos de las sierras de las Cruces, Chichinautzin, Nevada y los sistemas montañosos del norte.

La población se asentó en el Valle desde tiempos prehistóricos, sin embargo, hasta finales del periodo clásico mesoamericano se comenzó a poblar densamente, como ejemplo la ciudad prehispánica de Teotihuacán. Los mexicas fundaron en los islotes que se formaban en el centro del lago su capital, la ciudad de Tenochtitlán, y se expandieron con el uso de chinampas, es decir, un sistema constructivo que formaba islas artificiales con tierra de relleno extraída del fondo del lago, en donde se podía cultivar, y fue así como le fueron ganando terreno firme al agua.

A la llegada de los españoles, el trazo urbano mexica prevaleció y la nueva Ciudad de México continuó con su expansión sobre el lago.

A mediados del siglo XX, la población en el Valle de México aumentó de manera drástica y con ello el incremento de áreas urbanas e invasión de terrenos de cultivo o de ecosistemas vírgenes; además, un problema de mayor índole comenzó a aparecer: la demanda de agua potable y su evacuación como agua residual.

El abastecimiento de agua potable que se hace en el Valle de México proviene principalmente de la captación de aguas subterráneas a través de pozos. Sin embargo, debido a la naturaleza arcillosa derivada del pasado lacustre de la cuenca, el suelo ha sufrido importantes deformaciones resultantes del efecto de consolidación, es decir, hundimientos debidos a la extracción de agua.

Los gobiernos locales y federales tenían la disyuntiva de dotar a la población con necesidad de volúmenes cada vez mayores de agua potable sin agravar el problema de hundimientos, así como evacuar la residual; y debido a ser la zona más poblada del país, se gestionaron programas con los que se intervendría el funcionamiento de la cuenca.

Fue así como surgió la necesidad de traer agua potable y sacar el agua residual en el Valle de México desde y hacia otras cuencas: la del río Cutzamala como dotador de agua potable, y la del río Tula como receptor de aguas residuales. En esta sección analizaremos la del Cutzamala.

Antecedentes

Fue necesario analizar todas las variables que intervienen para diseñar una red de abastecimiento de agua potable y finalmente determinar a la cuenca del río Cutzamala como la mejor opción: caudal disponible, topografía, longitud del recorrido, desnivel entre la captación y el punto de entrega, disposición de energía eléctrica, calidad del agua, tenencia de la tierra, repercusiones económicas en la región, y muchas más.

Las cuencas de los ríos Cutzamala, Tecolutla y Amacuzac eran las opciones más viables debido a la factibilidad técnica, económica, financiera, social y política. Al hacer un análisis del costo por metro cúbico en cada una de las opciones, la cuenca alta del río Cutzamala resultó ser la mejor, en parte, por la existencia de infraestructura previa con el Sistema de generación hidroeléctrico Miguel Alemán, y el túnel del Acueducto Lerma (Comisión Nacional del Agua (C), 1994).

Los retos que presentaba el proyecto era: subir el agua a casi mil metros de elevación, cruzar el Valle de Toluca o la cuenca alta del río Lerma y atravesar la Sierra de las Cruces. Estudiando estas problemáticas se llegó a analizar hasta 18 rutas, donde se incluían la ubicación de las obras de toma, las plantas de bombeo y la planta de potabilización, todo en función de la topografía y las vías de comunicación.

Se consideró además los tiempos de bombeo, que variaban entre 20 y 24 horas, y los gastos por conducir, de aproximadamente 11, 20 y 24 metros cúbicos por segundo (Comisión Nacional del Agua (C), 1994).

El proyecto resultante fue uno de los más grandes de su tipo en el mundo por el gasto transportado, el desnivel vencido, y la longitud recorrida; y todo fue logrado con un 95 por ciento de ingeniería mexicana.

No funcionaría sin el monitoreo constante de variables como la calidad del agua, el estado de deterioro del sistema y la atención a problemas incidentales, como los frecuentes sismos e inundaciones.

Además, el proyecto debe funcionar sin afectar a los ecosistemas y poblaciones locales, y es un compromiso que la Comisión Nacional del Agua, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Comisión Federal de Electricidad, así como los organismos que gestionan el agua en el Valle de México tienen presente en su operación del sistema.

El sistema Cutzamala presenta muchos retos a futuro: el incremento en la población del Valle de México continúa, y será necesario el aumento en el caudal entregado, ya sea por este sistema de abastecimiento, o la creación de otro más eficiente o complementario. El proyecto del río Temascaltepec, cuenca vecina a la del río Cutzamala, presenta una posible opción y ya se encuentra en gestión por parte de los responsables.

Sin embargo, la población en la cuenca también presenta una tasa de crecimiento y pedirá la disminución del agua que por derecho de origen le pertenece.

Funcionamiento del Sistema Cutzamala: Captación y conducción

El funcionamiento del sistema de abastecimiento inicia en la captación y en este caso proviene de aguas superficiales almacenadas en presas. Algunos datos de los almacenamientos que componen el sistema Cutzamala se recopilan en la Tabla 2.24 (pág. 105).

Se tiene contemplada una etapa futura para atender el crecimiento de la demanda de agua en el Valle de México, que involucraría aprovechar el río Temascaltepec.

No toda el agua disponible en estas presas puede usarse para abastecer agua potable. La Comisión Federal de electricidad exige un gasto de 3 metros cúbicos de agua por segundo para continuar

con la generación de energía eléctrica en el sistema Miguel Alemán en sus centrales Ixtapango, Santa Bárbara y Tingambato. Además, se deben de abastecer las actividades de la región, tales como abastecimiento a las poblaciones y riego a los cultivos (Comisión Nacional del Agua (C), 1994).

Las líneas, o recorridos que sigue el agua en las diferentes subcuencas para integrarse al sistema son las siguientes:

a) Línea de Colorines

El vaso de Colorines es abastecido por un canal desde la presa El Bosque, la que también recibe agua por parte de la presa Tuxpan, y en su camino, la presa Ixtapan del Oro también aporta caudal. Este sistema interconectado de presas también forma parte del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

Se trata del aprovechamiento de la infraestructura de este antiguo sistema de generación con una longitud de 73.5 kilómetros, divididos entre canales, túneles y sifones (Tabla 2.25, pág. 105).

En la presa Colorines se integró un canal de llamada, revestido con concreto, además de una estructura vertedora de ocho compuertas deslizantes. Una vez que el agua comienza su recorrido en la obra de toma, dos tuberías de concreto preesforzado la transportan por gravedad hasta la torre de sumergencia de la Planta de bombeo No. 1. Entre esta planta y su torre de oscilación se vence una carga de 157 metros usando una tubería de acero.

A partir de aquí, el agua es conducida por gravedad dentro de dos tuberías de concreto preesforzado hasta el portal de entrada del túnel El Durazno, de 2.3 kilómetros de longitud, y su destino final es la presa Valle de Bravo.

b) Línea de Valle de Bravo

En la obra de toma de la presa Valle de Bravo, construida en 1985, el agua es transportada por una tubería de concreto preesforzado, que trabaja por gravedad, hasta la torre de sumergencia de la Planta de Bombeo No. 2. Posteriormente, es elevada en una doble tubería de acero venciendo un desnivel de 122 metros hasta una torre de oscilación.

Por gravedad, el agua viaja en una tubería de concreto a la torre de sumergencia de la Planta de Bombeo No. 3, que la sube 350 metros a la torre de oscilación, desde donde vuelve a fluir por gravedad a la torre de sumergencia de la Planta de Bombeo No. 4, y es bombeada otros 350 metros hasta otra torre de oscilación.

A partir de aquí, el agua fluye por gravedad en una tubería de concreto preesforzado hasta la caja distribuidora del Vaso Regulador Donato Guerra, donde parte del gasto se va a éste y parte al canal de nombre homónimo.

El canal Donato Guerra es de sección trapecial, está revestido con concreto, tiene una pendiente de 0.0002 y está diseñado para un gasto de 24 metros cúbicos por segundo. Por su parte, el vaso Donato Guerra tiene una capacidad de 770 mil metros cúbicos de los cuales son útiles 300 mil. Su cortina es de sección homogénea con protección de enrocamiento y una altura de 17 metros. La longitud de su corona es de 410 metros y su ancho es de 8 metros. La operación del vaso Donato Guerra es de 20 horas diarias.

El canal transporta el agua hasta el túnel Agua Escondida, que tiene sección de herradura y diámetro de 3.85 metros revestidos con concreto, recorriendo una longitud de 3 kilómetros, y en cuya terminación se dividen dos tuberías de concreto, conectándose más adelante con la tubería proveniente de la presa Chilesdo, y terminando conjuntamente en el tanque de aguas crudas de la Planta potabilizadora Los Berros.

c) Línea de Chilesdo

La presa Chilesdo se construyó para aprovechar el caudal del río San José Malacatepec, y entró en operación en 1993.

Desde la obra de toma de Chilesdo, el agua es conducida por gravedad en una tubería de concreto de 12 kilómetros hasta la torre de sumergencia de la Planta de Bombeo No. 6. Desde aquí, es bombeada a 275 metros hasta una torre de oscilación en una tubería de acero de 1.22 metros de diámetro en una longitud de 8.5 kilómetros, para que después viaje en una tubería de concreto preesforzado, que se conecta con la conducción proveniente de Valle de Bravo, y que terminan en la entrada del tanque de aguas crudas de la Planta potabilizadora Los Berros. Esta tubería tiene entre 1.52 y 2.51 metros de diámetro y una longitud de 3.5 kilómetros.

d) Línea de Villa Victoria

El agua captada en la presa Villa Victoria es conducida por gravedad en el canal Héctor Martínez de Meza, con una longitud de 13 kilómetros, hasta la Planta potabilizadora de Los Berros, debido al desnivel de aproximadamente 500 metros entre la toma y el tanque de aguas crudas de la planta. Villa Victoria abastece de agua al sistema desde 1982 y el vaso formó parte del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

Plantas de bombeo

Cinco centrales de bombeo se encargan de darle la carga necesaria al agua para vencer el desnivel natural del terreno: las Plantas de bombeo 1, 2, 3, 4 y 6. Albergan equipos motor- bomba, válvulas de mariposa en la succión, válvulas esféricas en la descarga, juntas de compensación, conexiones, piezas especiales, tableros de control, compensadores estáticos, grúas viajeras, subestaciones eléctricas y múltiples de succión y descarga (Tabla 2.26, pág.106).

La superestructura y la cimentación fueron construidas con elementos metálicos prefabricados, así como techos y muros.

La capacidad unitaria de los equipos de bombeo es de entre 4 y 1.7 metros cúbicos por segundo. Son bombas centrífugas horizontales de doble succión, algunas de un paso y otras de dos, y están acondicionados con motores eléctricos de inducción de 13.8 y 4.16 kilovatios.

El suministro de energía eléctrica proviene de la interconexión de los sistemas Miguel Alemán e Infiernillo, ubicado entre Guerrero y Michoacán, y el voltaje es proporcionado desde la subestación Nopala, del cual pasa a la estación reductora Donato Guerra, en el que pasa de 400 a 115 kilovatios, dando la energía al sistema en dos anillos independientes (Tabla 2.27, pág. 106).

Además, cada planta de bombeo tiene una subestación eléctrica reductora, que baja de 115 a 13.8 kilovatios el voltaje, y tienen las características enlistadas en la Tabla 2.28 (pág. 106).

Torres de sumergencia y oscilación

Las torres de oscilación son estructuras cilíndricas de concreto reforzado, y su función es minimizar los efectos transitorios del agua, propiamente el fenómeno llamado golpe de ariete, que se origina al arrancar o parar los equipos de bombeo, y que produce variaciones en las presiones de trabajo sobre las tuberías, haciéndolas sensibles de efectos de deformación o colapsos.

Por otra parte, las torres de sumergencia sirven para darle a la planta de bombeo el nivel mínimo en la succión necesario para que los equipos funcionen.

Se construyeron con estructura de concreto reforzado, colado monolíticamente con cimbra deslizante. La cimentación también consiste en una zapata de concreto reforzado, pero se le dieron tratamientos con lechadas de concreto al suelo para resistir las descargas y repartirlas uniformemente (tablas Tabla 2.29 y Tabla 2.30, pág. 107).

Planta Potabilizadora

El proceso de potabilización inicia con la recepción del agua en la planta Los Berros, ubicada en Villa Victoria, México. La planta tiene la capacidad de tratar 24 metros cúbicos de agua por segundo. Debido a que no hay suficientes efluentes de aguas residuales a lo largo de su camino hasta este punto, además de que su recorrido ha quitado algunos contaminantes naturalmente, el agua tiene una calidad tal que facilita su proceso de potabilización, sin embargo, no es suficiente para considerarla apta para el consumo humano.

La primera estructura en la que ingresa el agua es el tanque de aguas crudas, que son dos cámaras de concreto armado, en donde se mezclan todos los caudales provenientes de las diferentes líneas de conducción y captación.

A continuación pasan por los canales Parshall donde se afora el caudal y, gracias a la turbulencia generada por el cambio de régimen, se dosifica el sulfato de aluminio y el cloro como coagulante y desinfectante, respectivamente.

Después, seis módulos de potabilización reciben el caudal y tienen la capacidad de tratar 4 metros cúbicos por segundo. El agua pasa por un laberinto de mamparas que sirven como tanque de sedimentación. La precipitación de las partículas al fondo del tanque ocurre en su camino hacia el final del laberinto, y al depositarse, se forman lodos que son succionados a la superficie y extraídos por un flotador que los descarga a un canal lateral y, posteriormente, son transportados al módulo de tratamiento de lodos.

El agua clarificada es filtrada en ocho tanques que en el fondo tienen una cama de grava y arena sílica. Estas camas son mantenidas constantemente para evitar la saturación de impurezas en los materiales filtrantes a través de retrolavados.

Un tanque de aguas claras, dividido en dos cámaras, con capacidad para 48,000 metros cúbicos cada una, almacena el agua que ya tiene la calidad necesaria para considerarse potable según las normas de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

La alimentación eléctrica de las instalaciones es satisfecha por la subestación eléctrica de la Planta de Bombeo No. 5, y el funcionamiento total se logra con 3 mega watts.

Adicionalmente, la planta cuenta con un edificio de dosificación de químicos, un complejo sistema de tratamiento y recirculación de lodos y un laboratorio para hacer las pruebas que certifiquen la calidad física, química y bacteriológica del líquido. El control de calidad se logra con muestreos cada 3 horas en cada proceso.

Para su construcción, la Planta Los Berros requirió de un gran estudio de mecánica de suelos, lo que dio como respuesta la cimentación de los tanques a base de losas de concreto aperaltadas y aligeradas con casetones de poliuretano, lo que le da rigidez y poco peso, útiles para en un terreno con poca capacidad de carga. El resto de las estructuras se construyó con concreto reforzado, y algunas con elementos de patente, como canales y mamparas.

Distribución a la Zona Metropolitana del Valle de México

Cuando el agua se considera potable y para consumo humano, ya puede entregarse a su destino final, sin embargo, una serie de estructuras y sistemas son necesarios para que esa meta sea cumplida.

El tanque de aguas claras de la planta Los Berros sirve como tanque de sumergencia para la Planta de Bombeo No. 5 y llega al nivel de sumergencia gracias a una tubería de acero. Con el bombeo de los equipos, el agua es enviada a la torre de oscilación, que se encuentra a 174 metros sobre el nivel de la planta, siendo este el punto más elevado de todo el sistema.

La Planta de Bombeo No. 5 fue construida con concreto reforzado y elementos prefabricados de techos y muros. La cimentación también es de concreto y está resuelta con zapatas.

De aquí en adelante ya no será necesaria potencia pues el agua fluye por gravedad hacia su destino final. Este acueducto tiene como retos la barranca de Los Berros, que la cruza con un tubo puente de acero con una longitud de 210 metros, y el río Lerma, de 63 metros de longitud, en donde fue necesaria la construcción de un terraplén de materiales granulares.

Adicionalmente, en el trazo se ubican cajas rompedoras de presión y de distribución a las comunidades locales, como los tanques Santa Isabel y Pericos. Este último tiene una capacidad de 200 mil metros cúbicos y tiene una derivación hacia la ciudad de Toluca.

El último obstáculo viene al terminar de cruzar el valle de Toluca, y se trata de la Sierra de las Cruces, parteaguas entre la cuenca de Lerma y la del Valle de México. Para ello es necesario el túnel Analco- San José, obra construida en 1976 que tiene casi 17 kilómetros de longitud. Este túnel es de tipo portal, está revestido de concreto y tiene 4.6 metros de diámetro y 4.25 de altura, su pendiente es de 0.00067 y es capaz de conducir un gasto de 34 metros cúbicos por segundo.

El portal de entrada se ubica en Atarasquillo y su salida es en Dos Ríos, en donde se conecta con el tanque Dolores y distribuye el agua que ha traído desde Cutzamala entre el Macrocircuito Norte y el Acuaférico Sur.

En su recorrido, el Sistema Cutzamala utiliza 90.5 kilómetros de tuberías de concreto preesforzado de diámetro interior de 2.5 metros, 8 kilómetros de tubería de acero de entre 1.3 y 3.5 metros de diámetro, que utiliza en líneas de presión y succión y descarga de plantas de bombeo. En total, las tuberías en el Sistema Cutzamala tienen una longitud de 98.5 kilómetros.

Estas tuberías soportan en promedio 150 metros columna de agua de presión. El acero usado en las rampas de bajada y subida de presión fue de calidad de importación A514, y nacional A229, A516 y A285.

En los tramos en los que la tubería debe ir enterrada se usaron retroexcavadoras para la excavación de las zanjas, y en algunos tramos fue necesario el uso de explosivos. Las zanjas se rellenaron con material compacto.

En los ramales superficiales se colocaron silletas de acero con base de concreto, y algunos atraques y codos fue necesario cubrirlos con muertos de concreto simple.

El resto del trazo principal tiene 7.5 kilómetros de canales y 21 de túneles. La longitud del trazo es de 127 kilómetros desde la obra de toma de Colorines hasta el portal de salida del túnel Analco-San José.

Los túneles fueron construidos con el método tradicional de barrenación, voladura, carga y rezaga. Para el tratamiento de fallas geológicas fue necesaria la instalación de marcos de acero con tornapuntas como ademe, y anclaje con barras de acero y concreto neumáticamente lanzado como estabilizador de muros. El concreto era fabricado en plantas en el sitio.

El retiro del material de rezaga se hizo con cargadores frontales, góndolas de ferrocarril y camiones de volteo, y en algunos casos se hizo con malacates instalados en las lumbreras.

Presa	Ubicación	Elevación de la corona (msnm)	Elevación NAME (msnm)	Capacidad útil (millones de m3)	Año de Terminación
Villa Victoria	México	2,562.04	2,560.37	214.30	1944
Valle de Bravo	México	1,788.11	1,785.61	403.00	1944
Colorines	México	1,630.31	1,629.21	1.60	1944
Tuxpan	Michoacán	1,764.00	1,762.00	20.00	1957
El Bosque	Michoacán	1,745.00	1,743.00	201.00	1954
Ixtapan del Oro	México		1,635.00	5.00	1954
Chilesdo	México	2,359.20	2,359.05	0.80	1992

Tabla 2.24. Datos de los cuerpos de agua en el Sistema Cutzamala (Comisión Nacional del Agua (C), 1994)

Original Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán	
Estructura	Longitud (m)
Obra de toma de la presa Tuxpan	22,000.00
Obra de toma de la presa El Bosque	39,500.00
Presa Ixtapan del Oro	12,000.00
Total	73,500.00

Tabla 2.25. Longitud de las obras ya construidas para habilitar la presa Colorines en el Sistema (Comisión Nacional del Agua (C), 1994)



Imagen 2.11. Ramal de alta presión entre la Planta potabilizadora y la Planta de bombeo No. 5

Planta de Bombeo	1	2	3	4	5	5A	6	Total	
Elevación descarga (msnm)	1,571.30	1,723.00	1,833.95	2,177.75	2,497.00	2,497.00	2,323.13		
Gasto por unidad (m3/s)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	1.70	1.70		
Número de unidades	5	6	6	6	6	3	3		
Gasto por planta (m3/s)	20.00	24.00	24.00	24.00	24.00	5.10	5.10		
Carga (m)	157.30	121.80	349.30	349.30	174.20	*174.20	*275	1,151.90	
Potencia Unitaria	(KW)	7,960	5,550	16,500	16,500	7,960	3,170	4,200	
	(HP)	10,670	7,440	22,118	22,118	10,670	4,249	5,630	
Potencia de Planta	(KW)	39,800	33,300	99,000	99,000	47,760	9,510	12,600	340,970
	(HP)	53,350	44,640	132,708	132,708	64,020	12,747	16,890	457,063

Tabla 2.26. Características de los equipos de bombeo en las plantas (Comisión Nacional del Agua (C), 1994)

Anillo de alimentación 1		
Tramo		Longitud (Km)
Donato Guerra	P. B. 5	14.50
P. B. 5	P. B. 6	10.50
P. B. 6	Donato Guerra	7.80
Anillo de alimentación 2		
Tramo		Longitud (Km)
Donato Guerra	P. B. 1	17.00
P. B. 1	P. B. 2	12.00
P. B. 2	Donato Guerra	8.00
Líneas independientes		
Tramo		Longitud (Km)
Donato Guerra	P. B. 3	85.00
Donato Guerra	P. B. 4	85.00

Tabla 2.27. Recorrido de la electricidad en los anillos (Comisión Nacional del Agua (C), 1994)



Imagen 2.12. Bombas de la Planta No. 5

Demanda total de motores							
Planta	Grupo/ planta	Tensión (KV)	Velocidad (R.P.M.)	Potencia (MW)	Eficiencia motores	Factor potencia	DTM MVA
1	5	13.80	1,200.00	7,960.00	97.20	90.00	45.50
2	6	13.80	1,200.00	5,550.00	97.00	90.00	38.20
3	6	13.80	1,200.00	16,500.00	97.50	90.00	112.90
4	6	13.80	1,200.00	16,500.00	97.50	90.00	112.90
5	6	13.80	1,200.00	7,960.00	97.20	90.00	54.70
5ª	3	4.20	1,800.00	3,170.00	97.00	90.00	10.90
6	3	13.80	1,800.00	4,200.00	97.00	90.00	14.40
Total							389.50 - 390.00

Tabla 2.28. Demanda de energía en los motores (Comisión Nacional del Agua (C), 1994)

Torre de Oscilación	1	2	3	4	5	6
Diámetro interior (m)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	2.50
Espesor de pared (m)	2.25	1.60	1.20	1.20	1.50	
Altura total (m)	62.00	51.00	37.00	37.00	45.80	45.00
Elevación de la plantilla de la torre (msnm)	1,740.00	1,855.00	2,200.00	2,528.00	2,665.00	2,524.00

Tabla 2.29. Características de las torres de oscilación (Comisión Nacional del Agua (C), 1994)

Torre de Sumergencia	1	2	3	4	5	6
Diámetro interior (m)	10.00	10.00	10.00	10.00		6.00
Espesor de pared (m)	0.65	1.50	1.50	1.00	Tanque aguas claras	0.45
Altura total hasta corona (m)	20.00	47.00	47.00	32.00		19.00
Elevación de la plantilla de la torre (msnm)	1,620.24	1,751.00	1,862.00	2,206.00		2,349.00

Tabla 2.30. Características de las torres de sumergencia (Comisión Nacional del Agua (C), 1994)

Adicional Sistema Cutzamala	
Estructura	Longitud (m)
Obra de toma de la presa Colorines	8,381.66
Planta de bombeo 2	3,947.98
Planta de bombeo 3	2,891.37
Planta de bombeo 4	5,775.00
Canal Donato Guerra	7,586.52
Túnel Agua Escondida	3,000.00
Portal de salida túnel Agua Escondida	3,131.96
Planta potabilizadora Los Berros	76,095.00
Túnel Analco- San José	16,052.00
Obra de toma de la presa Chilesdo	12,031.52
Obra de toma de la presa Villa Victoria	12,951.24
Total	151,845.38

Tabla 2.31. Longitud de las obras construidas para el sistema Cutzamala (Comisión Nacional del Agua (C), 1994)



Imagen 2.13. Planta potabilizadora Los Berros

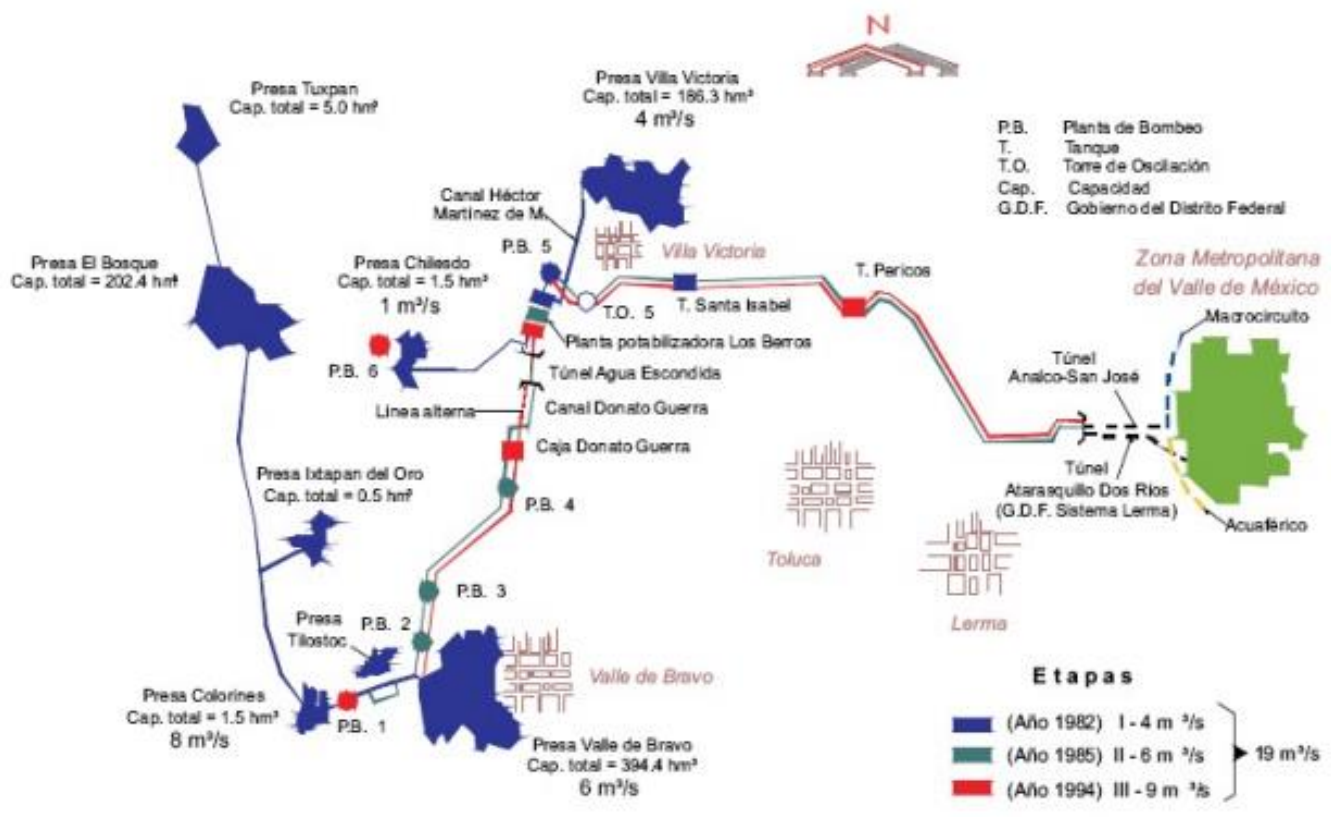


Figura 2.16. Plano del Sistema Cutzamala (López- Morales, 2012)

3. Desarrollo

Como se explicó en el subcapítulo 1.3, una de las principales causas de pérdida de suelo por erosión es el cambio de uso. En el caso de la cuenca Valle de Bravo- Amanalco este cambio se centra en el paso de suelo forestal a otro.

Este capítulo está dividido en dos partes: La primera estima un valor de pérdida de suelo potencial en la cuenca con el método *USLE* aplicado en la República Mexicana (subcapítulo, 1.3.3).

En la segunda parte se hará un análisis de la transformación del tipo de cobertura vegetal en la cuenca, lo que nos daría una idea de la pérdida real de suelo. Esta sección se construyó con el apoyo de la Percepción remota, la que también tiene su semblanza agregada, y que puede arrojar información en el tiempo.

Combinando ambas partes, la pérdida potencial de suelo y la cobertura vegetal como mitigador de la misma, se podrá presentar resultados y comparar con los valores que reporta Conagua (subcapítulo 2.2).

3.1. Estimación de la pérdida potencial de suelo en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco

A continuación, se hará una estimación de la pérdida potencial de suelo en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco. Atendiendo a la información presentada en el subcapítulo 2.2 (Tabla 2.20, Figura 2.8 y Figura 2.10), se sabe que la cuenca es altamente susceptible a la pérdida de suelo (más de 200 Ton/ha año) en un 80 por ciento de su superficie; debido a este dato tan cercano al 100 por ciento, y para fines de una estimación gruesa, se considerará como superficie en alto riesgo a la totalidad de la cuenca.

Con la consideración del párrafo anterior, se aplicará la ecuación 1.14 (subcapítulo 1.3.3). La información con la que se llegó a cada factor ocupado por esta expresión para el cálculo de erosión potencial se explica a continuación.

Erosividad de la lluvia

Para el factor por precipitación (R), se utiliza la Tabla 1.24 que depende de la Figura 1.10 (subcapítulo 1.3.3). En la Figura 3.1, basada en la Figura 1.10, se aprecia que la cuenca Valle de Bravo- Amanalco se puede asociar dentro de la región IV. Tomando éste criterio, se usará la ecuación 3.1.

$$R = 2.8559P + 0.002983P^2 \quad (3.1)$$

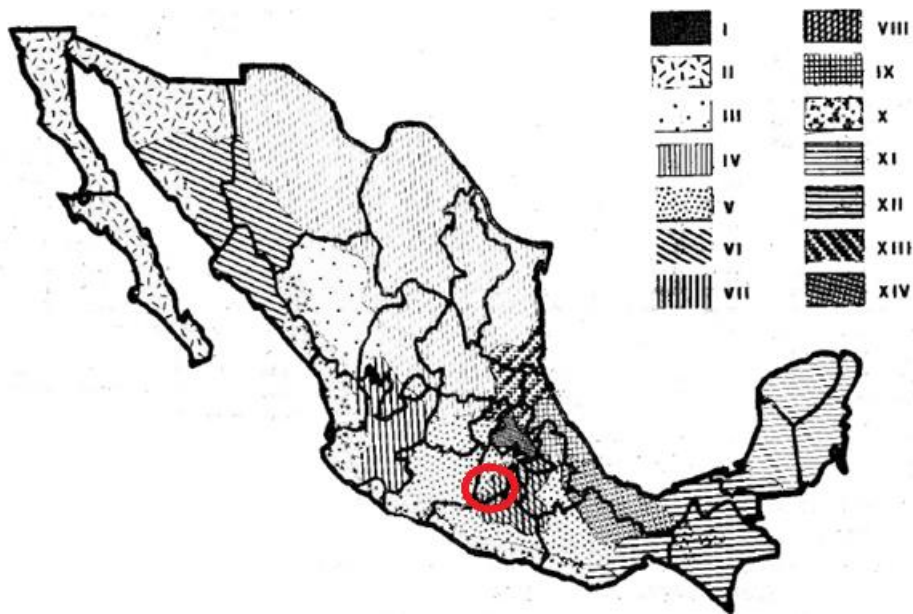


Figura 3.1. Región en la que se agrupa a la cuenca

El valor de la precipitación P que se empleará fue tomado de la Tabla 2.16, como el promedio de los valores proporcionados (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008).

Estación	Precipitación (mm)
Amanalco de Becerra	1,185
Presa Valle de Bravo	1,116
Valle de Bravo	865
Palo Mancornado	1,130
Promedio	1,074

Tabla 3.1. Precipitación promedio

El valor calculado para P es de 1,074 milímetros (Tabla 3.1). Con ésta precipitación se opera la ecuación.

$$R|_{\text{Región IV}} = 2.8559(1,074) + 0.002983(1,074)^2 = 6,508.06 \frac{MJ}{mm*ha/hr}$$

Resulta que poco más de 6 mil 500 $\frac{MJ}{mm*ha/hr}$ inciden sobre la cuenca Valle de Bravo-Amanalco.

Erodabilidad del suelo

Para el factor K se tiene que hacer una relación entre los suelos que se presentan en la cuenca, sus propiedades y su contenido de humedad, que se presentaron en la Tabla 2.19, con las características usuales de este tipo de suelos en cuanto a su textura para poder aplicar un valor medio

Se ocupó la información edafológica del subcapítulo 2.2 para comparar con la Tabla 1.25 (subcapítulo 1.3.3). La Tabla 3.2 muestra la K propuesta para cada suelo en la cuenca, la cual se usará en el cálculo como un promedio de los coeficientes. El valor es 0.018.

Suelo	Textura	% materia orgánica	K propuesta
Acrisol órtico	Arcilla	1.00%	0.020
Andosol húmico	Arcilla	1.40%	0.024
Andosol ócrico	Limo	1.00%	0.052
Cambisol dístrico	Arena	0.50%	0.005
Feozem háplico	Arcilla limosa	2.00%	0.019
Litosol	Arena	0.10%	0.003
Luvisol crómico	Arcillo arenosa	1.00%	0.013
Ranker	Arena	0.20%	0.005
Vertisoles	Migajón arcillo arenosa	0.50%	0.025
K promedio			0.018

Tabla 3.2. Factor K promedio

Longitud y pendiente

Ahora, para la longitud y grado de pendiente (LS), se aplica la ecuación 1.16. La información de la máxima y mínima altura y longitud de arrastre se calcularon a partir del software *Google Earth™*. A continuación se explica la metodología:

- i. Con la herramienta 'Ruta' (aparece en el menú 'Añadir', como en la Figura 3.2) se traza una línea que corresponda con una sección de la cuenca. Se considera la mostrada en la Figura 3.2 como una buena representación del perfil de la cuenca por ser la máxima longitud (aproximadamente 30 kilómetros transversales a la región).
- ii. En las opciones de este comando se puede solicitar un perfil de elevación como el mostrado en color rosa (Figura 3.2). Se hace un recorrido longitudinal reportando las elevaciones inicial y final así como la distancia desplazada.
- iii. Ahora se calculan las pendientes por tramo (ecuación 3.2). También se calculan las longitudes de arrastre: si se considera a la elevación del relieve y al recorrido longitudinal como un triángulo rectángulo, la longitud será su hipotenusa (ecuación 3.3). Los tramos y su cálculo se muestran en la Tabla 3.3, y su representación en la Figura 3.3.

$$s_i = \frac{|y_{\text{final}} - y_{\text{inicial}}|}{x_{\text{final}} - x_{\text{inicial}}} \quad (3.2)$$

$$L_{\text{arrastre}_i} = \sqrt{(x_{\text{final}} - x_{\text{inicial}})^2 + (y_{\text{final}} - y_{\text{inicial}})^2} \quad (3.3)$$

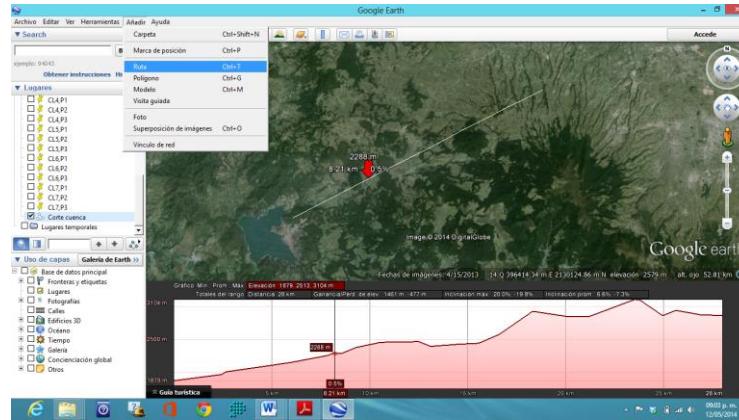


Figura 3.2. Comando aplicado en Google Earth (TM)

Tramo	$x_{\text{inicial}} (m)$	$x_{\text{final}} (m)$	$y_{\text{inicial}} (m)$	$y_{\text{final}} (m)$	$L_{\text{arrastre}_i} (m)$	s_i
1	0.00	4,240.00	1,795.00	2,113.00	4,251.91	0.0750
2	4,240.00	8,570.00	2,113.00	2,192.00	4,330.72	0.0182
3	8,570.00	9,730.00	2,192.00	2,294.00	1,164.48	0.0879
4	9,730.00	9,960.00	2,294.00	2,286.00	230.14	0.0348
5	9,960.00	10,900.00	2,286.00	2,425.00	950.22	0.1479
6	10,900.00	13,000.00	2,425.00	2,606.00	2,107.79	0.0862
7	13,000.00	14,500.00	2,606.00	2,611.00	1,500.01	0.0033
8	14,500.00	16,100.00	2,611.00	2,489.00	1,604.64	0.0762
9	16,100.00	16,600.00	2,489.00	2,603.00	512.83	0.2280
10	16,600.00	17,300.00	2,603.00	2,556.00	701.58	0.0671
11	17,300.00	18,200.00	2,556.00	2,670.00	907.19	0.1267
12	18,200.00	21,000.00	2,670.00	2,773.00	2,801.89	0.0368
13	21,000.00	22,900.00	2,773.00	2,706.00	1,901.18	0.0353
14	22,900.00	28,400.00	2,706.00	2,707.00	5,500.00	0.0002
15	28,400.00	29,200.00	2,707.00	2,686.00	800.28	0.0263

Tabla 3.3. Cálculo del perfil de elevación

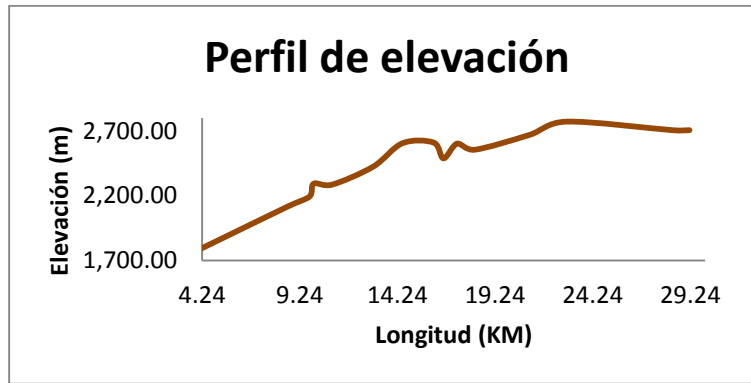


Figura 3.3. Perfil de elevación

- iv. Se promedia la longitud de arrastre y se calcula la pendiente media con la ecuación 1.15, en la que m será igual a 15 tramos. La pendiente es del 1.05 por ciento y la longitud de arrastre de poco más de un kilómetro.

$$s = \left(\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{s_1}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_m}}} \right)^2 = 0.0105 \Rightarrow s = 1.05\%; \quad L_{\text{arrastre}} = 1,946.67m$$

- v. A continuación, se aplica la ecuación 1.16, siendo 1.12 el resultado.

$$LS = (L_{\text{arrastre}})^{0.5} (0.0138 + 0.00965(s) + 0.00138(s)^2)$$

$$LS = (1,956.67)^{0.5} (0.0138 + 0.00965(1.05) + 0.00138(1.05)^2) = 1.12$$

Estimación final

Ya se puede aplicar la ecuación 1.14 con los valores propuestos.

$$E_p = R K LS$$

$$E_p = (6,508.06)(0.018)(1.12) = 134.82 \text{ T/ha año}$$

Esto quiere decir que anualmente son susceptibles de perderse casi 135 toneladas de suelo por cada hectárea a causa de la erosión. Considerando la totalidad de la cuenca (como se especificó al inicio de este capítulo) se estimaría una pérdida de más de 7 millones 500 mil toneladas anuales.

Considerando un peso volumétrico de suelo de 1.5 toneladas por metro cúbico (valor promedio entre varios pesos volumétricos de suelos y haciendo referencia a un cantidad superior a la del agua), se trata de una lámina de suelo de casi 1 centímetro el que se perdería anualmente.

Para determinar la evolución y el desarrollo real de este problema, considerando la existencia de vegetación y quizá técnicas de conservación de suelo, se propone el estudio con percepción remota desarrollado en el siguiente subcapítulo.

3.2. Estimación de la pérdida de cubierta vegetal del suelo en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco, utilizando métodos de Percepción remota

3.2.1. Generalidades de la Percepción remota

La percepción remota es la ciencia que permite obtener información de un objeto o un fenómeno sin tener contacto físico directo, es decir, a distancia. Involucra un conjunto de métodos, instrumentación y técnicas de observación que generan una colección de información sobre el objeto o fenómeno de estudio (Meliá & Gandía, 1991).

Una fotografía es un ejemplo para definir percepción remota, pues contiene datos que sirven como fuente de información para el desarrollo de algún tema, sin estar precisamente en el momento en el que se tomó la imagen.

La superficie terrestre se puede estudiar con percepción remota, lo que implica la obtención de imágenes tomadas a partir de una distancia vertical, es decir, desde el cielo. Sin embargo, necesita de todo un proceso para poder llevar a cabo este análisis y así obtener resultados.

La vista humana es capaz de apreciar el mundo en tres dimensiones, por tanto, pierde la capacidad de asimilar información de una fotografía al privarla de la profundidad. Por otra parte, los humanos somos seres terrestres, lo que presenta otro obstáculo: no estamos familiarizados con la vista en planta, o en otras palabras, desde arriba. Además, las fotografías aéreas manejan una escala diferente debida a su distancia con la tierra y muchas veces los objetos son más pequeños o invisibles. Todos estos factores influyen en el desconocimiento de objetos capturados en las alturas.

Principios físicos en los que se basa la Percepción remota

La captura de imágenes es posible por la existencia de la radiación electromagnética. Ésta puede ser considerada como una forma de energía, consistente en campos electromagnéticos, que se propagan mediante ondas, transportando cantidades discretas de energía. Los humanos la percibimos si tiene interacción con los objetos, de lo contrario es indetectable sin instrumentos capaces (Meliá & Gandía, 1991).

El espectro electromagnético es el conjunto de ondas eléctricas y magnéticas ordenadas y continuas en función de su longitud, desde los rayos gamma hasta las microondas. Se puede dividir entre siete diferentes regiones, como se aprecia en la Figura 3.4. Las regiones de mayor interés son las que involucran a la luz visible, reflejada o emitida, infrarroja y la de las regiones

microondas. La medida de esta radiación se conoce como bandas espectrales. La banda es un segmento de longitud de onda y está definido por el diseño del sensor.

Las fuentes de radiación electromagnética pueden ser naturales o artificiales. Los materiales que generan cambios de temperatura son capaces de emitir energía electromagnética: el fuego, la luz eléctrica o el sol.

Interacción objeto- radiación electromagnética

La radiación electromagnética choca con los objetos y, dependiendo sus propiedades, puede ser transmitida, absorbida o reflejada. En percepción remota se mide la radiación que fue reflejada como una función de la longitud de onda y se llamada reflectividad espectral. En otras palabras, es el brillo o la luminosidad de una superficie en un intervalo específico de longitud de onda, comúnmente expresada como porcentaje. Los materiales absorben y reflejan la energía con longitudes de onda diferente.

El objetivo de la percepción remota consiste en estudiar la radiación emitida o reflejada por objetos. Existen modelos de percepción remota, y las longitudes de onda de energía detectada y el propósito del estudio dependen de ellos.

La forma más simple graba la energía del sol reflejada por la superficie de los objetos, requiere de instrumentos especiales que midan el espectro infrarrojo visible y el cercano. La segunda involucra a la radiación emitida por los objetos y el equipo que se utilice debe detectar las microondas.

Firma de reflectividad espectral

A las propiedades espectrales de los objetos se les conoce como firma espectral. Todos los cuerpos en la naturaleza tienen una firma espectral distinta, es decir, su respuesta a la energía electromagnética o su patrón espectral (Cambell & Wynne, 2011).

El espectro de reflectividad de un material está construido con una fracción de la radiación solar reflejada como función de la incidencia de longitud de onda; se presenta de manera única en un material, por lo que se puede identificar con un sistema de sensibilidad con suficiente resolución espectral.

Condiciones externas que afectan la reflectividad

Dependiendo de la claridad atmosférica, las propiedades espectrales del reflejo del objeto, el ángulo y la intensidad de la longitud de onda, se pueden estudiar procesos y objetos sobre la superficie terrestre estudiando la radiación emitida o reflejada. En la práctica se reconoce que ésta puede cambiar dependiendo las condiciones de tiempo o distancia (De Jong & Van der Mier, 2005).

Antes que la radiación del sol choque con la superficie terrestre, la atmósfera influye sobre ella, así como la que ha sido reflejada por la superficie. La atmósfera contiene nitrógeno y oxígeno molecular, vapor de agua, partículas como polvo o tizne y agua en fases líquida y sólida, lo que significan obstáculos en el camino de la radiación.

El zenit solar también es determinante en la dirección de la radiación solar. Todos estos factores absorben o dispersan la energía. Las partes donde el espectro electromagnético tiene una alta transmisión se llama ventana atmosférica.

La forma de la tierra también es determinante: no es una esfera, es un elipsoide, ya que el Ecuador tiene forma de elipse. Además, la conformación topográfica distorsiona su superficie. El campo gravitatorio, causado por la diferente densidad de las rocas al interior de la tierra que afecta también la superficie del mar, genera diferencias en los estudios de percepción remota.

Generalidades del proceso de la percepción remota

Para la observación de la tierra desde el cielo, y su posterior memoria, se necesita de los sensores y de las plataformas. Los sensores son los dispositivos por los que pasará la energía electromagnética para su análisis: cámaras o lentes. Dependiendo la altura de vuelo, las imágenes pueden tener variedad de escalas.

Un sensor es un aparato que mide y graba la energía electromagnética. Los satélites son los más ocupados debido a su disposición continua en la atmósfera.

Existen dos tipos de sensores: los pasivos, que dependen de una fuente externa de energía, mientras que los activos tienen una fuente propia y generan su propia radiación.

Un satélite es una nave construida para que se mueva alrededor de la tierra. Es llevada a su posición a través de cohetes espaciales y una vez que su vida útil ha concluido, continúa trasladándose como basura espacial.

La función de la mayoría de los satélites es coleccionar información sobre la radiación reflejada por la superficie terrestre a lo largo de su camino. El área más pequeña captada por el satélite se llama campo de visión instantáneo, que también se puede expresar como un ángulo vertical entre la superficie y la línea de visión extrema. El punto directamente debajo perpendicular a la posición se llama nadir.

El camino que sigue un satélite se denomina órbita, es decir, su trayectoria o dirección de desplazamiento. Los que ven la misma parte de la tierra se llaman geoestacionarios. Hay los que siguen orbitas norte sur y los sincronizados con el sol, que cubren parte de la tierra cada cierto tiempo en el día.

Los satélites usados en percepción remota, como el Landsat y el NOAA de muy alta resolución radiométrica, pueden medir el infrarrojo visible, el cercano, y el termal en el espectro electromagnético (Figura 3.4, pág. 120).

Tipos de resolución de un sensor

- Resolución espacial: Es el tamaño del área del campo de visión instantáneo. Está relacionado con las características que definen la vista del espacio, como el ángulo de visión del sensor. La distancia entre el objetivo y la plataforma determina el grado de detalle. Por ejemplo, plataformas que están muy lejos del objetivo ven un área grande pero no dan gran detalle, y viceversa.

La resolución espacial se refiere al menor tamaño posible que puede ser detectado por la plataforma. El tamaño de un área vista está determinado por multiplicar el campo de visión instantánea por la distancia desde el suelo hasta el sensor; el resultado se llama celda de resolución.

Las fotografías obtenidas de la percepción remota consisten de una matriz de píxeles, que son las unidades más pequeñas de imagen, generalmente son cuadrados y representan cierta área de la imagen.

- Resolución temporal: Se refiere al periodo de tiempo en que un sensor hace una visita sobre una zona fija en la tierra, con las mismas condiciones de ángulo de visión. La resolución temporal usualmente es de varios días.
- Resolución radiométrica: Describe la información contenida en la imagen, es decir, la habilidad de escoger muy escasas diferencias de energía. Entre más fina sea la resolución, más sensitivamente detecta pequeñas variaciones de reflectividad. El rango corresponde al número de bits usados para codificar números en formato binario. Cada bit significa un exponente a la dos; el máximo número de iluminación disponible depende del número de bits usados para representar la energía.
- Resolución espectral: Significa el número de bandas espectrales y su ancho a las que es sensible el sensor. Una imagen pancromática consiste de una sola banda, muestra la imagen en escala de grises, mientras que las multispectrales e hiperespectrales consisten en varias bandas. La resolución espectral describe la habilidad de un sensor para definir intervalos más finos de longitudes de onda. Mientras más fina, más escaso será el rango de longitud de onda para un canal o una banda.

Proceso de percepción remota

El estudio de percepción remota inicia cuando la fuente de la radiación electromagnética se abre camino en la atmósfera, interactúa con el objeto estudiado, reflejando la energía, que es grabada en el sensor.

Después, la información se transmite a una estación de procesamiento en tierra, donde se recibe para su pre procesamiento, interpretación y análisis, y así, la creación del producto final de acuerdo a los fines buscados.

El pre procesamiento incluye correcciones radiométricas generadas por el sensor o la plataforma (variaciones en la iluminación, condiciones atmosféricas adversas y ruido en el sensor), así como distorsiones geométricas (medidas precisas de distancias o áreas y la conversión a coordenadas geográficas coincidentes).

Las coordenadas usadas son las UTM, basadas en la Proyección de Mercator, donde se divide a tierra en 60 zonas iguales. También se usan las derivadas de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que proporciona la posición de un punto en la Tierra en 3 dimensiones (latitud, longitud y altura).

Se debe hacer un realce de la imagen para mejorar su apariencia y aumentar los tonos para distinguir diferencias. Posteriormente, se transforma la imagen, que es casi lo mismo que el realce, sólo que se hace a varias bandas: se utilizan procesos aritméticos para convertirlas en nuevas, con el objetivo de obtener una nueva imagen que muestre mejor los píxeles que necesitamos de ella.

En este caso es importante mencionar que los colores de una imagen están compuestos por tres colores primarios (rojo, verde, azul), y se pueden formar toda la gama conocida por la vista humana. En una imagen multispectral el color mostrado no tiene nada que ver con el color que vemos, este se llama falso color compuesto. Cuando se muestra un color natural compuesto, las bandas espectrales se combinan de manera que aparece un color parecido a un color de la imagen, los colores simulan ser los que vemos normalmente.

Análisis e interpretación

La interpretación de imágenes obtenidas con percepción remota involucra la identificación y medición de los elementos contenidos en ellas.

La interpretación se puede hacer visualizando a través de un intérprete humano, si la imagen es análoga. Si es digital, lo que significa un arreglo de píxeles, en donde cada píxel corresponde a un valor digital de luminosidad, se pueden mostrar en la pantalla de una computadora. Puede ser monocromática (blancos y grises) o a color, combinando diferentes canales o bandas que representan diferentes longitudes de onda.

La interpretación manual requiere de casi ningún equipo especializado, mientras que la digital sí, requiere de software, pero el grado de detalle puede ser mayor. En la mayoría de los casos, la mezcla de ambos métodos de análisis se emplea para obtener mejores análisis.

Los elementos que se pueden reconocer varían desde puntos, líneas o áreas. Para su oportuna visualización se necesitan distinguir las siguientes características (Canada Centre of Remote Sensing, 2009):

- Tono: se refiere a la luminosidad del objeto.
- Forma: es el perímetro del objeto. Las formas geométricas generalmente son producidas por el hombre. Las irregulares son de la naturaleza.
- Tamaño: está en función de la escala y se refiere a las dimensiones del objeto.
- Textura: arreglo en la frecuencia de tonos o formas.
- Patrón: el arreglo espacial que lo hace diferente a otros objetos, es decir, tonos o texturas similares.
- Sombra: ésta provee una idea de la altura de los objetos.
- Asociación: es la relación entre elementos diferentes cercanos, en donde conocemos o tenemos familiaridad con uno de ellos, lo que hace más reconocible al de interés.

Finalmente, el uso de las herramientas de un Sistema de Información Geográfica (GIS) ayuda en la colección de objetos para su asociación con distintas capas de datos o su almacenamiento para su posterior análisis.

Aplicaciones

La percepción remota tiene muchas aplicaciones debido a su facilidad de recopilar información de áreas muy grandes de la tierra periódicamente. Actualmente ha cobrado importancia y se está ocupando en muchas áreas.

Los forestales pueden clasificar especies, detectar cambios en las condiciones ambientales y en las extensiones de vegetación y hacer diagnósticos respecto a su salud.

Los gases de efecto invernadero se registran en las fotografías aéreas cotidianamente así como la degradación de los ecosistemas y de suelos.

En Geología, la explotación de recursos minerales y petroleros, el mapeo geomorfológico y el monitoreo de volcanes también se auxilia de la percepción remota, como también lo hacen la Oceanografía y la Meteorología.

Sin embargo, para analizar las propiedades ópticas del suelo presenta algunos problemas: es un proceso complicado pues se debe conocer la proporción de su composición y la forma de las partículas, que es muy variada, lo que arroja errores en la medición en los índices de refracción (Lian, 2008).

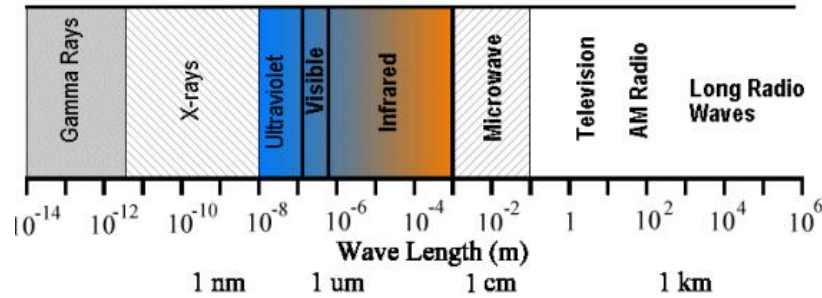


Figura 3.4. Espectro electromagnético (Sanderson, 2010)

Satélites comunes			
Nombre	Bandas espectrales	Resolución espacial	Resolución temporal
GOES	5	1- 41 km	Geoestacionario
NOAA AVHRR	5	1.1 km	1 día
Landsat TM	7	30 m	16 días
MODIS	Múltiples	250- 1000 m (depende del número de bandas)	1 día
IKONOS	4	4 m	5 días

Tabla 3.4. Características de los satélites comunes (Sanderson, 2010)

3.2.2. Generalidades de las imágenes *Landsat*

Se trata de una plataforma enviada por Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. Su primer nombre fue *ERTS- 1 (Earth Resources Technology Satellite)*. Su antecesor fue el satélite *Nimbus*, cuya finalidad era el monitoreo meteorológico; Landsat está formado por una constelación de 8 satélites, y es administrado por la *National Space and Space Administration (NASA)*, en tanto que la producción y comercialización de la información que genera está a cargo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS*).

El lanzamiento del *ERTS- 1* fue el 23 de julio de 1972, y cerró operaciones el 5 de enero de 1978. Las efemérides de las plataformas *Landsat* se muestran en la Tabla 3.5. El peso promedio del satélite es de 2 toneladas, con 4 metros de largo por casi 3 de diámetro (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012).

Características de la información arrojada por Landsat

Las plataformas *Landsat 1, 2 y 3* tomaban una imagen de 185 kilómetros mientras volaban a 920 kilómetros sobre la tierra, aproximadamente; tardaban 103 minutos con 27 segundos en dar una órbita a la Tierra. La resolución temporal era de 18 días y la radiométrica de 8 bits (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012).

Para *Landsat 4 y 5*, el tamaño de la imagen y la resolución temporal no cambian, sin embargo, se disminuye la altura de vuelo a 705 kilómetros y el tiempo de órbita a 98 minutos y 54 segundos.

La resolución espacial del *Landsat 1* y *2* era de 80 metros, mientras que para *Landsat 3* era de 40 metros. Estaban diseñados para trabajar con modos multispectrales con la resolución mostrada en la Tabla 3.6.

En *Landsat 4* la resolución espacial era de 80 metros, con modo espectral, mientras que para *Landsat 5* era también Termal, con resoluciones de 30 y 120 metros, respectivamente. Las resoluciones espectrales se aprecian en la Tabla 3.7.

La resolución temporal para *Landsat 7* fue de 16 metros para el modo espectral pancromático y de 30 para el multispectral, conservando la misma resolución radiométrica de las anteriores versiones. La resolución espectral se muestra en la Tabla 3.8.

Para la más reciente plataforma, *Landsat 8*, el espacio de la imagen sigue siendo de 185 kilómetros por lado, la resolución temporal de 16 días, y la resolución radiométrica aumenta a 12 bits. La resolución espectral (mostrada en Tabla 3.9) consta de la pancromática, de 15 metros de resolución espacial, y la multispectral, con 30 metros.

Satélite	Lanzamiento	Fin de operación
<i>ERTS 1</i>	23 de Julio de 1972	5 de Enero de 1978
<i>Landsat 2</i>	22 de Febrero de 1975	27 de Julio de 1983
<i>Landsat 3</i>	5 de Marzo de 1978	7 de Septiembre de 1993
<i>Landsat 4</i>	16 de Junio de 1982	5 de Junio de 1995
<i>Landsat 5</i>	1 de Marzo de 1984	2011
<i>Landsat 6</i>	3 de Octubre de 1993	3 de Octubre de 1993
<i>Landsat 7</i>	20 de Junio de 1999	en operación
<i>Landsat 8</i>	11 de Febrero de 2013	en operación

Tabla 3.5. Efemérides de la tecnología *Landsat* (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012)

Resolución espectral en <i>Landsat 1, 2, 3 y 4</i>			
Banda	Color	del (μm)	al (μm)
4	azul	0.5	0.6
5	verde	0.6	0.7
6	rojo	0.7	0.8
7	infrarrojo cercano 1	0.8	1.1

Tabla 3.6. Resolución en *Landsat 1, 2, 3 y 4* (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012)

Resolución espectral en <i>Landsat 5</i>				
Modo espectral	Banda	Color	Del	Al
Multiespectral	1	Azul	0.45	0.52
	2	Verde	0.52	0.6
	3	Rojo	0.63	0.69
	4	infrarrojo cercano 1	0.76	0.9
	5	infrarrojo cercano 2	1.55	1.75
Termal	6	infrarrojo medio	2.08	2.35
	7	infrarrojo térmico	10.4	12.5

Tabla 3.7. Resolución en *Landsat 5* (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012)

Resolución espectral en <i>Landsat 7</i>				
Modo espectral	Banda	Color	del (μm)	al (μm)
Pancromática	8	Pancromática	0.52	0.9
	1	Azul	0.45	0.52
	2	Verde	0.53	0.61
	3	Roja	0.63	0.69
	4	infrarrojo cercano 1	0.78	0.9
Termal	5	infrarrojo cercano 2	1.55	1.75
	6	infrarrojo medio	2.09	2.35

Tabla 3.8. Resolución en *Landsat 7* (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012)

Resolución espectral en <i>Landsat 8</i>			
Banda	Color	del (μm)	al (μm)
1	aerosol costero	0.43	0.45
2	azul	0.45	0.51
3	verde	0.53	0.59
4	rojo	0.64	0.67
5	infrarrojo cercano 1	0.85	0.88
6	infrarrojo cercano 2	1.57	1.65
7	infrarrojo medio	2.11	2.29
8	Pancromático	0.5	0.68
9	Cirrus	1.36	1.38
10	Infrarrojo térmico 1	10.6	11.19
11	Infrarrojo térmico 2	11.5	12.51

Tabla 3.9. Resolución en *Landsat 8* (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012)

Banda espectral (μm)	Aplicaciones
0.45- 0.52 (azul)	Mapeo de aguas costeras
	Diferenciación entre suelo y vegetación
	Diferenciación entre vegetación conífera y caducifolia
0.52- 0.60 (verde)	Mapeo de vegetación
	Calidad del agua
	Absorción de la clorofila
0.63- 0.90 (rojo)	Diferenciación de especies vegetales
	Áreas urbanas y uso de suelo
	Agricultura
0.76- 0.90 (infrarrojo cercano)	Calidad del agua
	Delimitación de cuerpos de agua
	Mapeo geomorfológico y geológico
	Identificación de áreas de incendios y áreas húmedas
	Agricultura y vegetación
	Uso del suelo
1.55- 1.75 (infrarrojo termal)	Medición de la humedad en la vegetación
	Diferencia entre nubes y nieve
	Agricultura
2.08- 2.35 (infrarrojo medio)	Vegetación
	Mapeo de estrés térmico en plantas
	Corrientes marinas
10.40- 12.50 (infrarrojo termal)	Propiedades termales del suelo
	Identificación de minerales
2.08- 2.35 (infrarrojo medio)	Mapeo hidrotermal

Tabla 3.10. Descripción de las bandas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012)

Clasificación	Combinación de bandas	Aplicaciones	
		Color	Interpretación
A	verde, rojo, infrarrojo cercano1	Azul	áreas urbanas y suelos expuestos
		Rojo	Vegetación
B	rojo, infrarrojo cercano 1, infrarrojo cercano 2	verde y rosa	Vegetación
		Rosa	áreas urbanas y suelo expuesto
C	rojo, infrarrojo cercano 2, infrarrojo cercano 1	marrón, verde y amarillo	Vegetación
		azul claro	áreas urbanas y suelo expuesto
D	infrarrojo cercano 1, rojo, verde	Morado	Vegetación

Tabla 3.11. Combinaciones de bandas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012)

3.2.3. Generalidades del software *IDRISI Selva*

IDRISI Selva es un software con GIS integrado y procesamiento de imágenes que ofrece más de 300 módulos para el análisis y presentación de información espacial digital. Se incluyen

herramientas para planificación de territorios, soporte para toma de decisiones y análisis de riesgo con poderosas aplicaciones de estadística espacial, análisis de superficies y modelaje espacial.

La edición 17, lanzada en enero del 2009 es la decimosexta edición del software *IDRISI Selva* desde 1987. Es utilizado por investigadores y profesionales de las industrias de más de 175 países del mundo.

Clark Labs, creadores del software, está dedicado a la investigación y el desarrollo de tecnologías geo-espaciales para la toma responsable y efectiva de decisiones en el campo de administración ambiental, desarrollo de recursos sostenibles y localización de recursos igualitarios. Esta empresa es conocida principalmente por su producto bandera, el software IDRISI GIS y Procesamiento de Imágenes.



Imagen 3.1. Portada de *IDRISI Selva*

Clark Labs trabajó con *Conservation International* por un periodo de varios años para desarrollar un ambiente de modelaje que puede ser utilizado en una variedad de contextos y de escenarios geográficos. Esta herramienta de última generación, la *Land Change Modeler for Ecological Sustainability* (Modelador de Cambios de Terreno para Sostenibilidad Ecológica), fue integrada al software IDRISI en el 2006. En el 2007, Clark Labs desarrolló el Modelador de Cambios de Terreno como una extensión para ArcGIS, ampliando la accesibilidad de esta herramienta para usuarios interesados en cambios de terrenos, conservación ecológica y biodiversidad.

3.2.4. Procedimiento de análisis

A continuación se enuncia paso a paso cómo se hizo el análisis con Percepción remota para estimar la pérdida de superficie vegetal.

- i. Se necesita obtener imágenes satelitales. Como ya se explicó en el subcapítulo 3.2.2,

se ocupó la tecnología *Landsat*, que se puede descargar del sitio *Glovis*.

Sitio web del USGS: *Glovis*

Las imágenes *Landsat* provienen se pueden descargar de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (*USGS*)⁹, a través de su página llamada *Glovis*, quien se encarga de la gestión del satélite.

La cuenca Valle de Bravo- Amanalco, como ya se dijo, se encuentra en las coordenadas N19°20'37" al norte, N19°5'45" al sur, W100°11'02" al oeste y W99°52'17" al este. Esta sección geográfica está contenida en la escena *Landsat* con latitud 18.8 y longitud -100.7; en las coordenadas de la página web se trata de la sección 26 en el rango horizontal y 47 en el vertical (*WRS 2, Path/Row*) (Figura 3.5).

- ii. Para seleccionar el material con el que se hizo el análisis se hicieron varias consideraciones:
 - a) El intervalo de análisis para hacer las comparaciones pertinentes. Se fijó en 5 años a partir de 2014 en periodos descendientes.
 - b) Debido a que la lluvia es el principal motor de la pérdida de suelo, se consideró que en la época de estiaje es cuando el proceso se mantiene relativamente estático, como un resumen del movimiento del suelo en la época de lluvias. El periodo se cerró entre los meses de diciembre y junio.
 - c) La información disponible: para evitar problemas de procesamiento y falta de información se seleccionaron imágenes en las que la visibilidad fuera la adecuada, con nubosidad mínima o puntual, en especial en el área que corresponde a la cuenca.
 - d) La información arrojada por la plataforma *Landsat*. En *Landsat 7*, por ejemplo, un error arrojó un bandeo que representa la pérdida de una franja de 200 por 200 metros; en *Landsat 3* se modifican las coordenadas de la zona capturada, moviendo la posición de la cuenca dentro de la imagen, o se pierde en el desfase entre dos escenas. Es por eso que en algunos casos fue necesario variar hasta por un año el periodo de 5 que se había propuesto.

El resultado fue la elección de las imágenes mostradas en la Tabla 3.12.

⁹ United States Geological Service <http://glovis.usgs.gov>

Año	Mes	Día	Plataforma
1986	enero	25	Landsat 5
1989	diciembre	27	Landsat 4
1994	marzo	20	Landsat 5
1999	abril	3	Landsat 5
2003	febrero	17	Landsat 7
2008	mayo	29	Landsat 5
2014	marzo	11	Landsat 8

Tabla 3.12. Información de las imágenes elegidas

Para poder descargar imágenes del sistema *Glovis* del *USGS* se debe crear una cuenta, a través de un correo electrónico, con la finalidad de certificar el uso que se le dará a la información. No todas las escenas que captura el *Landsat* están disponibles para su obtención inmediata, deben ser solicitadas y esperar por la autorización, lo que también libera el uso para el público general.

Obtención de las imágenes

Para mostrar el método de análisis paso a paso, se utiliza la escena del 27 de diciembre de 1989. Una vez autorizada para su descarga, se selecciona en la resolución 240, como se muestra en la Figura 3.6.

Y la descarga se inicia cuando se agrega al menú de descargas con las opciones 'Add' y 'Send to Cart', como se muestra en la Figura 3.7.

Se despliega un menú de descarga como el de la Figura 3.8, se debe seleccionar la opción que se encuentra junto a la 'X'.

Se abrirán cuatro opciones de descarga, se utilizará la última, 'Level 1 Product (148.8 MB)', como en la Figura 3.9. El archivo que se obtiene de este proceso viene en formato ZIP, por tanto, debe ser descomprimido.

Se abrirán 12 archivos, de los que 8 (para el caso de *Landsat 4*) son imágenes. Éstos son las bandas que capta el sensor (Figura 3.10).

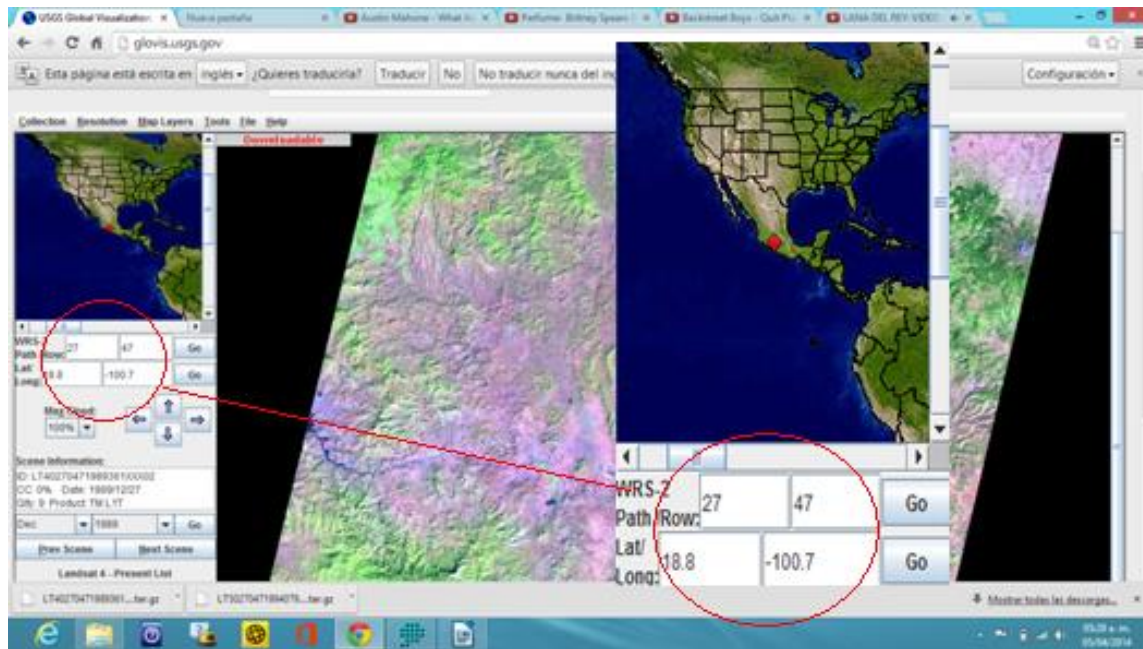


Figura 3.5. Sitio *Glovis*: Ubicación de la imagen

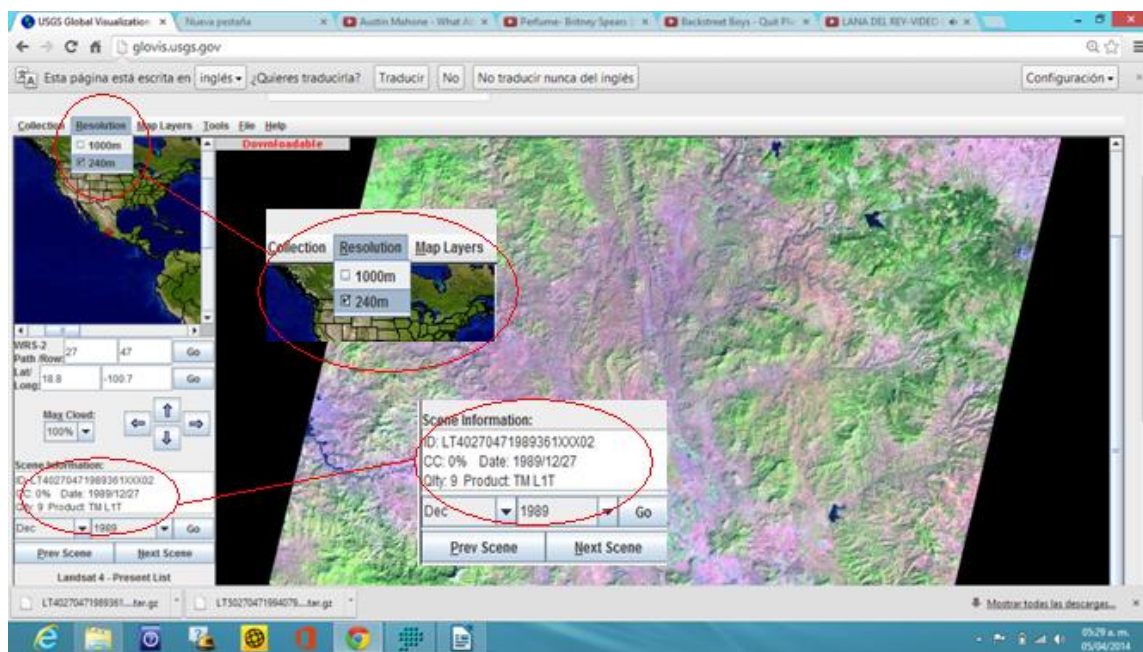


Figura 3.6. Sitio *Glovis*: Información de la imagen

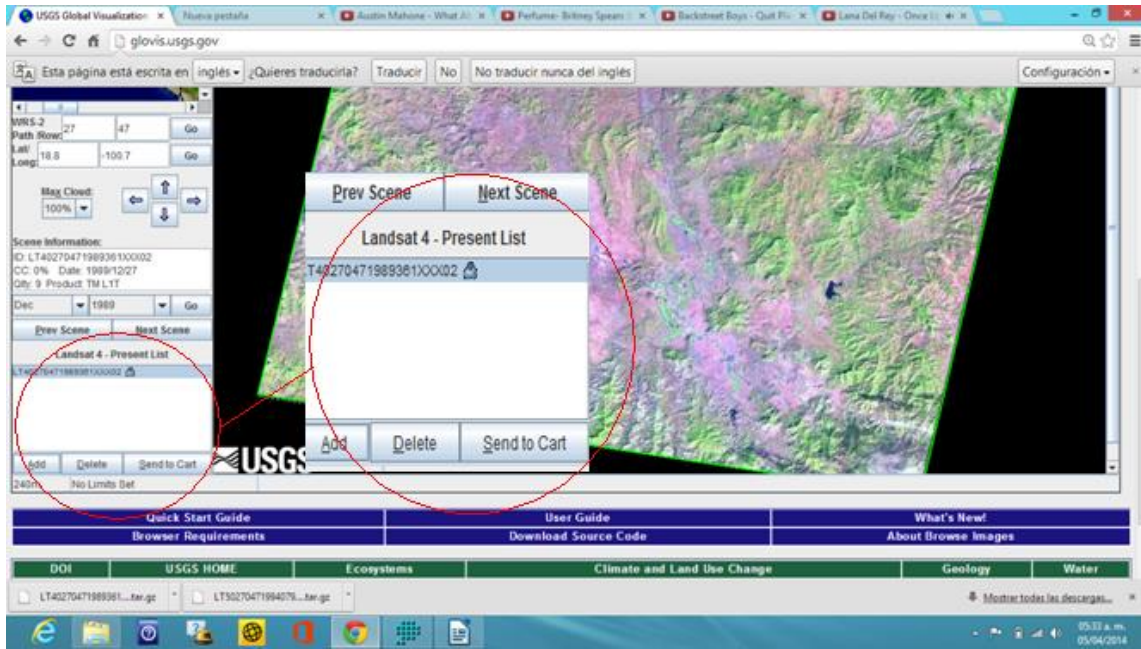


Figura 3.7. Sitio *Glovis*: Solicitud de la imagen

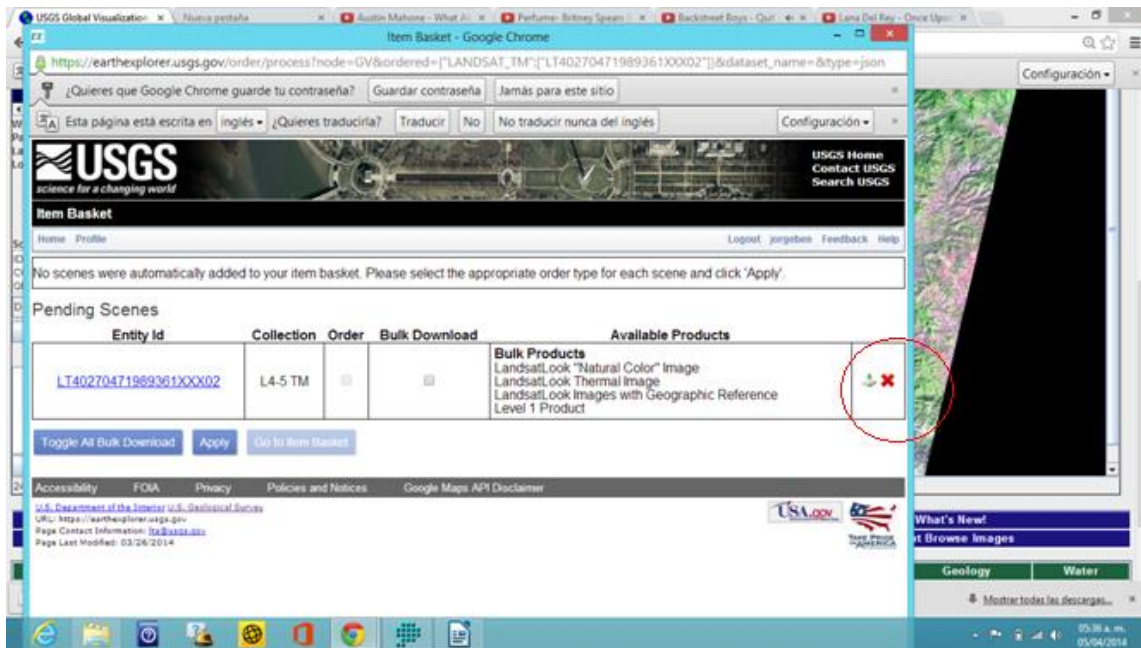


Figura 3.8. Sitio *Glovis*: Descarga de la imagen

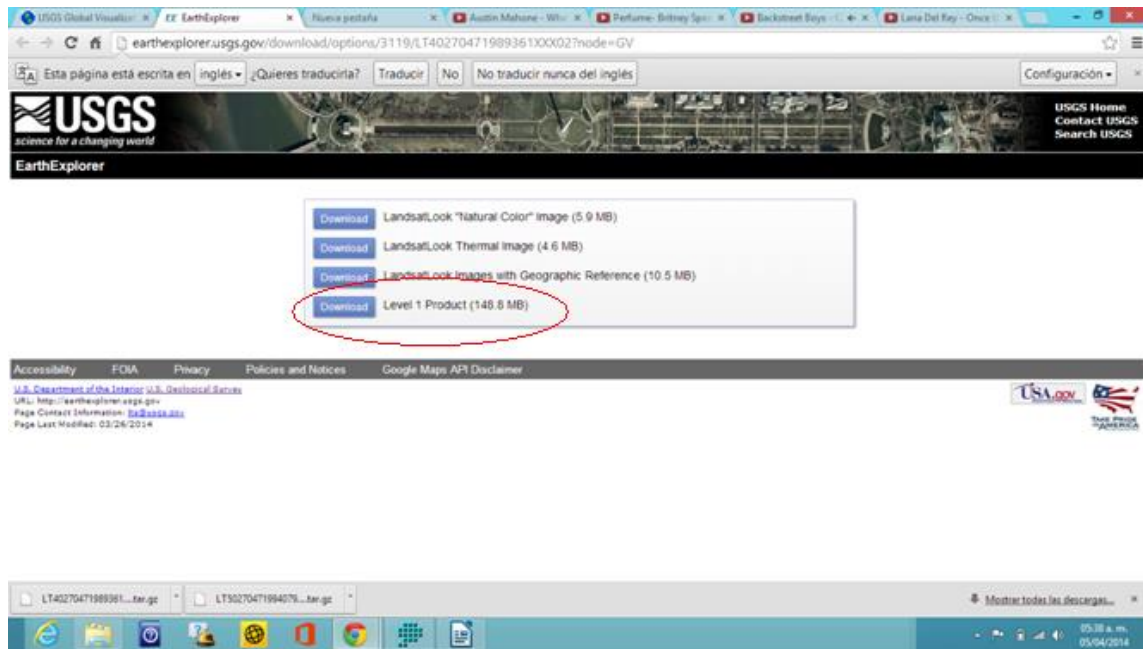


Figura 3.9. Sitio *Glovis*: Descompresión de la imagen

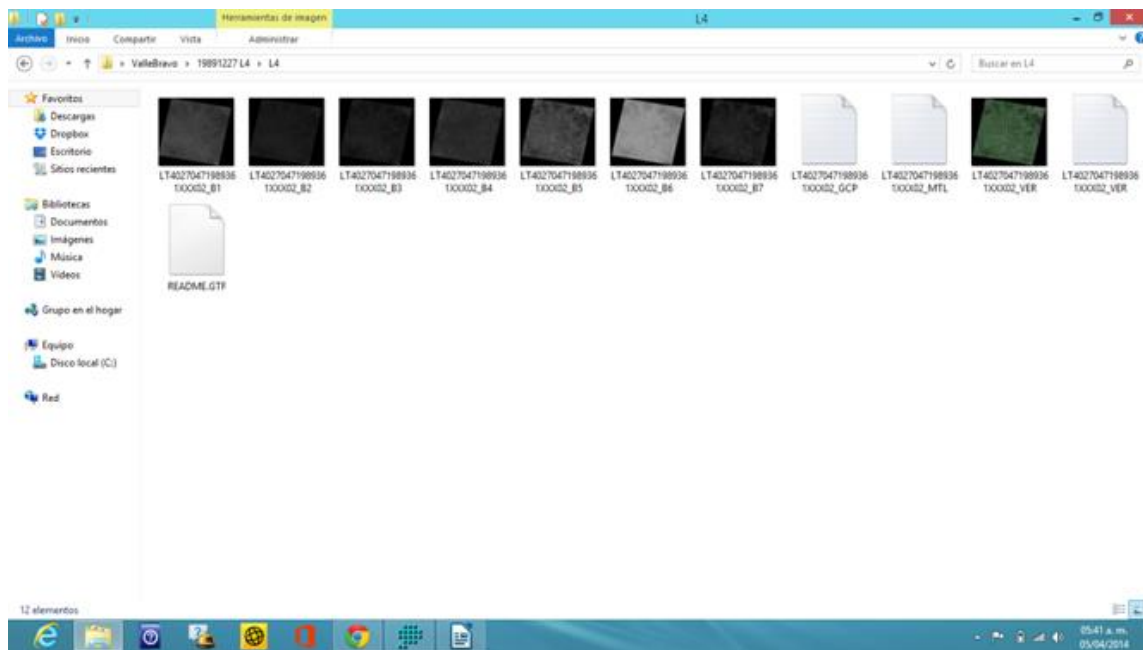


Figura 3.10. Sitio *Glovis*: Bandas en archivos *geotiff*

Ajustes previos en *IDRISI Selva*

- iii. Con los archivos descargados se puede aplicar el software *IDRISI Selva* en su análisis. Primero se debe crear un proyecto nuevo, como se muestra en la Figura 3.11, dando *click* derecho en los ficheros de la derecha. Inmediatamente se crea una carpeta de trabajo, en

la cual se direccionarán todos los archivos creados por el software. También se deben agregar las carpetas de trabajo (misma Figura 3.11). Se recomienda nombrar a las carpetas con la fecha y la plataforma a la que pertenecen para facilitar su ubicación.

- iv. Ahora se debe convertir los archivos a un formato conocido por IDRISI, que es la terminación *.RST* (documento *raster*), con el menú 'File', como se muestra en la Figura 3.12. Se desplegará un fichero como el de la Figura 3.13. En ésta sección se cargan las bandas, que se encuentran en formato *'geotiff'*, como se aprecia en la misma figura. Se recomienda, nuevamente, nombrar de acuerdo a la fecha de la información y la banda correspondiente. Verificar que en el fichero de trabajo y en la carpeta se generen los archivos.
- v. Ahora, se deben recortar la imagen para ajustarla a la información que involucra a la cuenca. Para eso se usará el comando 'WINDOW', ubicado en el fichero que se muestra en la Figura 3.14. Se desplegará un menú, como el de la Figura 3.15, en el que se escoge el número de bandas que se desea cortar, cómo se llamarán estos nuevos archivos, en qué medida se mostrarán los títulos y las coordenadas de corte. Para este caso serán las mostradas en la Tabla 3.13.

Mínima X:	368505
Máxima X:	407235
Mínima Y:	2110275
Máxima Y:	2143725

Tabla 3.13. Coordenadas extremas (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008)

- vi. Ahora para hacer un recorte del área específica de la cuenca se utiliza un archivo tipo *vector*¹⁰ que se importará como se muestra en la Figura 3.16. Con el archivo importado tipo vectorial del parteaguas de la cuenca, mostrado en la Figura 3.17, se utiliza el comando 'DIGITIZE' para crear un polígono sobre la imagen. Se construye el polígono como vector nuevo con el valor que se requiera, siempre y cuando sea mayor que 0. Elegimos el que viene de manera predeterminada. Para convertir este vector en *raster*, primero se debe hacer uso del comando 'RECLASS', como se muestra en la Figura 3.18, fijando los intervalos de valor de tal forma que al ejecutarse se muestren como positivo y negativo (valores de 0 en el fondo y 1 en la superficie de la cuenca). Finalmente, para crear el documento *raster* del parteaguas se utiliza el comando 'RASTERVECTOR', mostrado en el menú de la Figura 3.19, en donde se fijarán los parámetros de columnas y renglones.
- vii. Con este documento se puede hacer el recorte, usando el ícono de la calculadora y seleccionando los archivos (matrices) que se van a multiplicar. Como el valor del parteaguas está cerrado a 0 y 1, la operación conseguirá el perfil deseado, como se muestra en la Figura 3.20. Se repite la operación para todas las bandas.
- viii. Se debe aplicar una corrección atmosférica debida a las variaciones registradas por el sensor. El método es muy sencillo: Con el comando 'HISTO' se presenta el histograma de cada uno de las bandas, como se muestra en la Figura 3.21.

Se ubican los valores mínimos en los que la frecuencia de pixeles sea cero. Con la calculadora se hace la resta de una matriz menos un número. Esto genera valores negativos en la imagen. Se hace una reclasificación (comando 'RECLASS') en donde se anulen o se hagan cero los valores negativos.

A partir de aquí se cuenta con el material listo para ocuparse en el análisis. Se crearán las composiciones mostradas en la Tabla 3.11. Se tomará la *B* como la útil por pintar en verde la vegetación.

- ix. Para obtener la información se deben combinar las bandas, como se describió anteriormente. Para ello se utiliza el comando 'COMPOSITE', que se obtiene del menú mostrado en la Figura 3.22. Aquí se ingresan las combinaciones recomendadas. Las opciones extra que contiene, como el realce o el tipo de archivo, serán las mostradas también en la Figura 1.1.

¹⁰ Generado con Autocad de Autodesk (Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, 2008).

Clasificación no supervisada

La clasificación no supervisada implica intuir lo que ocurre en la realidad basándose en la información de nivel de colores, reflejo de luz o reconocimiento de algún patrón en la imagen satelital.

Para iniciar con el análisis se utilizará la respuesta digital de cada pixel y su clasificación según el *IDRISI Selva*. Esto significa que el software hará una clasificación automática de todos los valores que considere similares o agrupables.

- x. Se aplicará el comando 'CLUSTER', cuya función es el agrupamiento. Se procede como se muestra en la Figura 3.23. Para efectos de un análisis grueso, se consideran 7 familias únicamente y las 7 bandas de la imagen.
- xi. Para cada familia se especificarán 3 puntos que se crearán como vectores (Figura 3.24). Éstos puntos también se sobre pondrán a las imágenes compuestas (Figura 3.25).

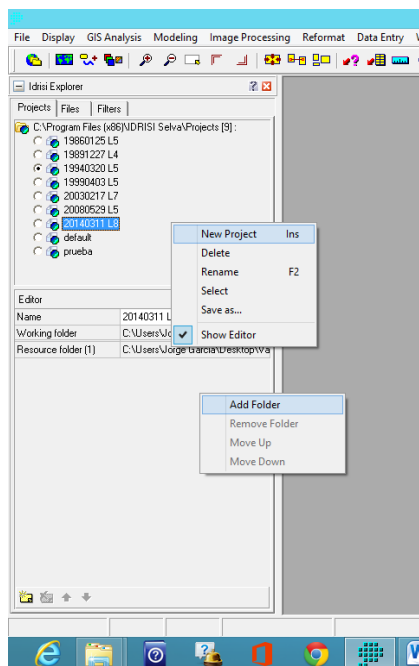


Figura 3.11. *IDRISI Selva*: Creación de carpetas de trabajo

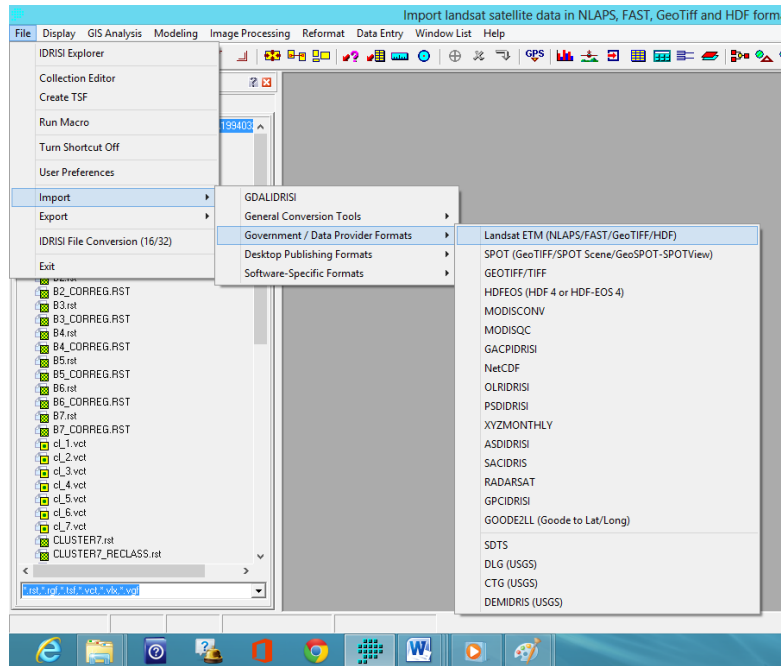


Figura 3.12. IDRISI Selva: Importación de archivos tiff

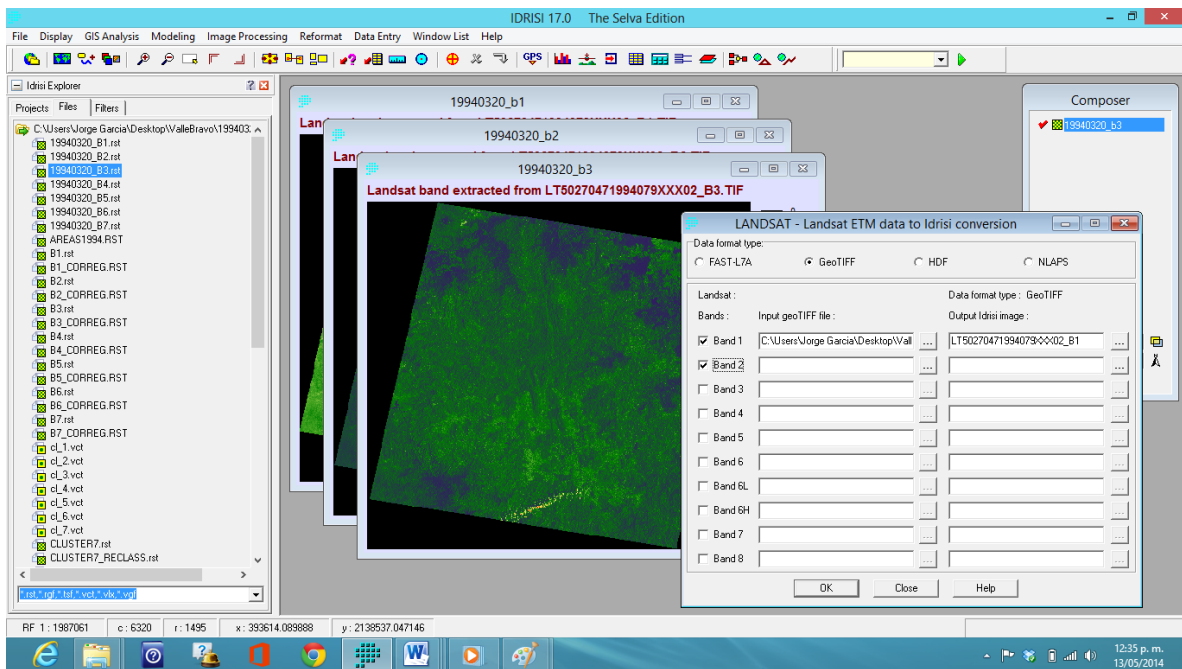


Figura 3.13. IDRISI Selva: Importar archivos de geotiff a raster

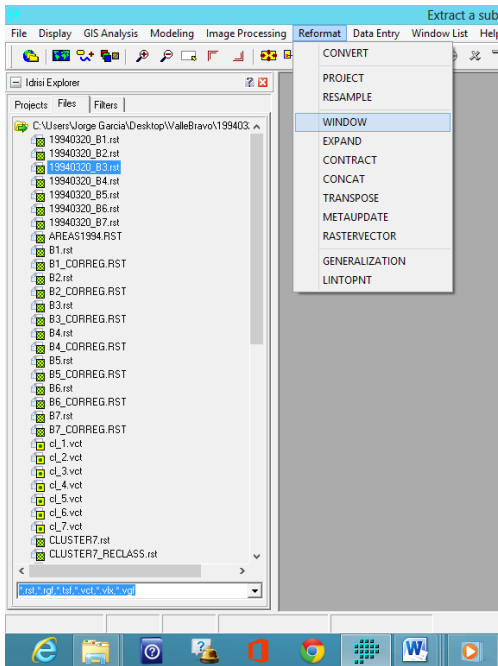


Figura 3.14. IDRISI Selva: Recorte de imágenes (Paso 1)

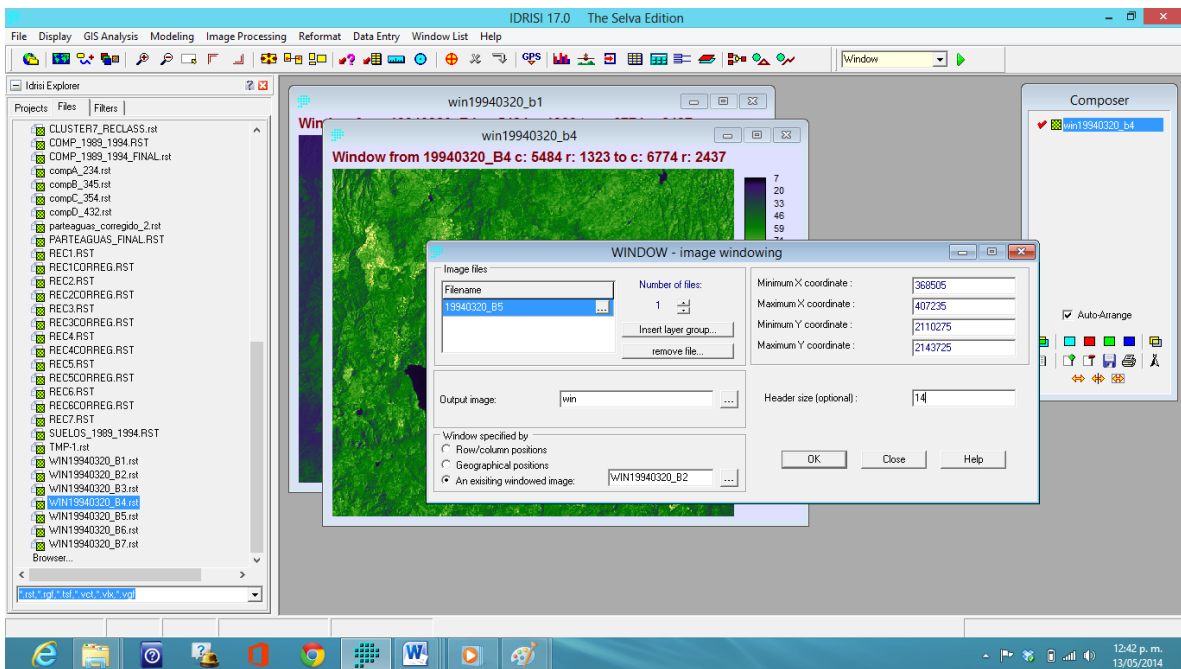


Figura 3.15. IDRISI Selva: Recorte de imágenes (Paso 2)

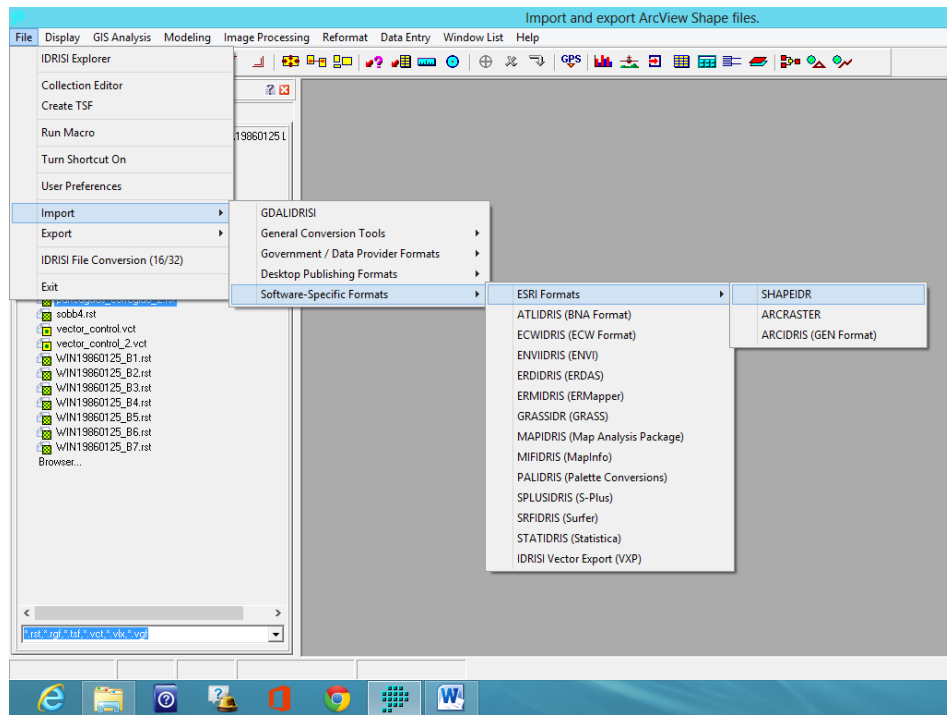


Figura 3.16. IDRISI Selva: Importar archivos shape

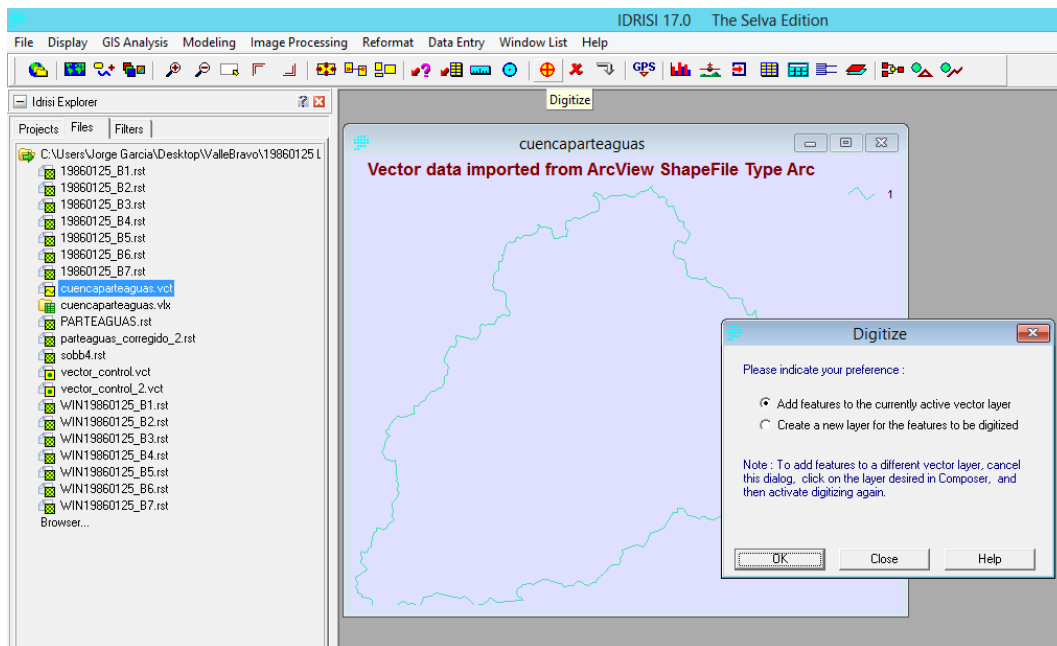


Figura 3.17. IDRISI Selva: Creación de polígonos

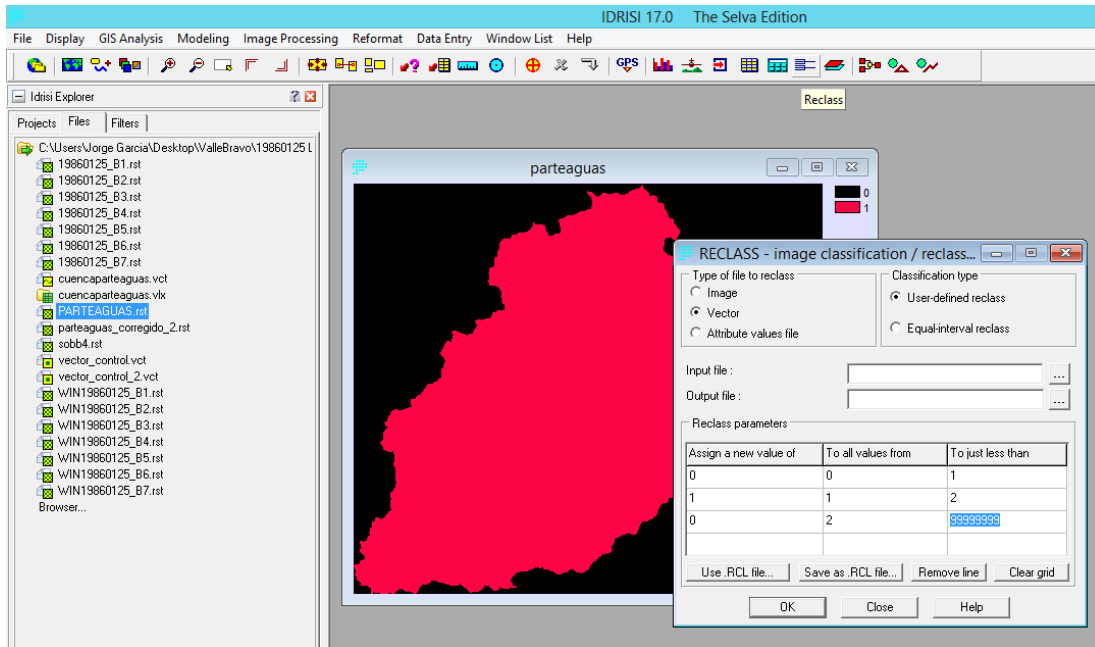


Figura 3.18. IDRISI Selva: Uso del comando *Reclass*

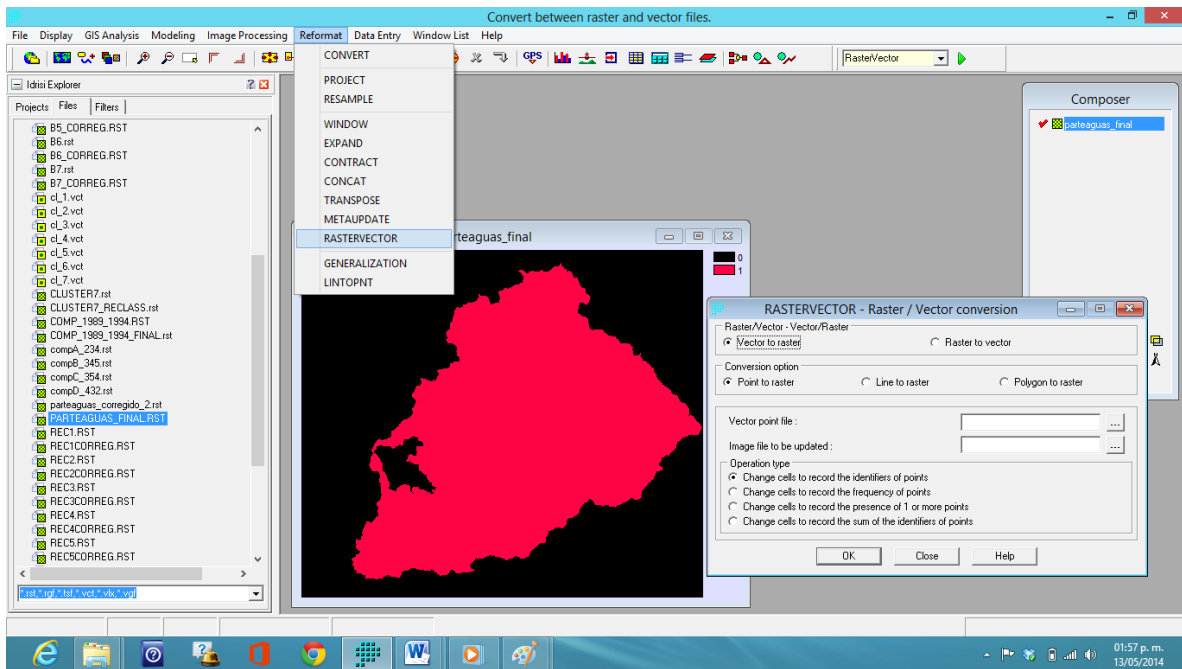


Figura 3.19. IDRISI Selva: Conversión de vector a raster

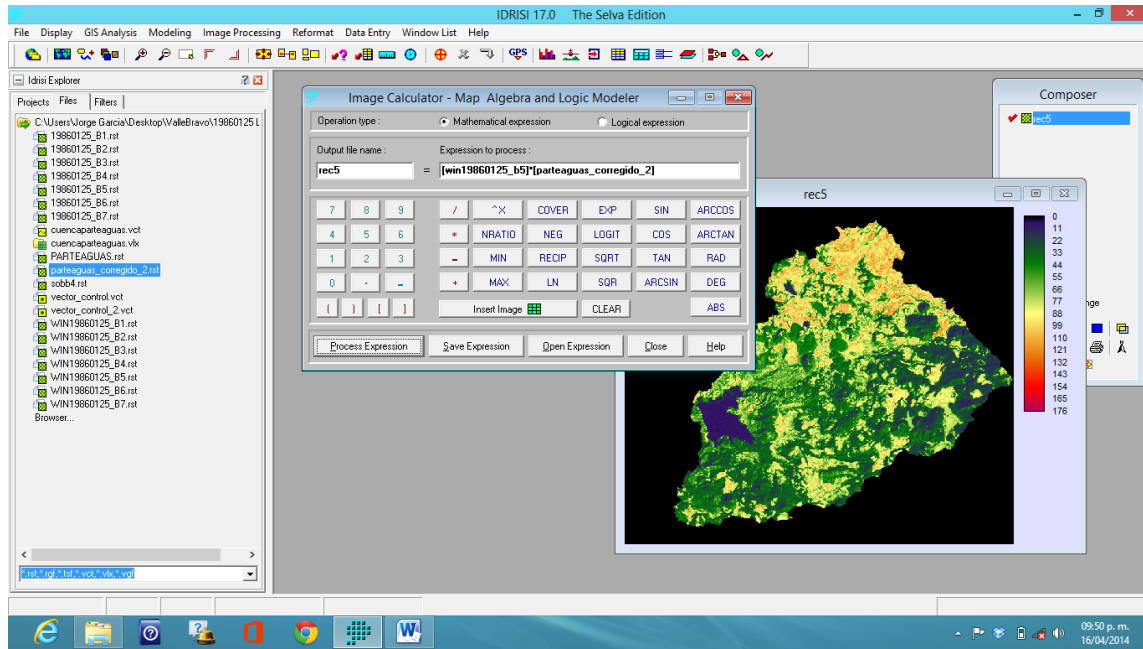


Figura 3.20. IDRISI Selva: Uso de la calculadora

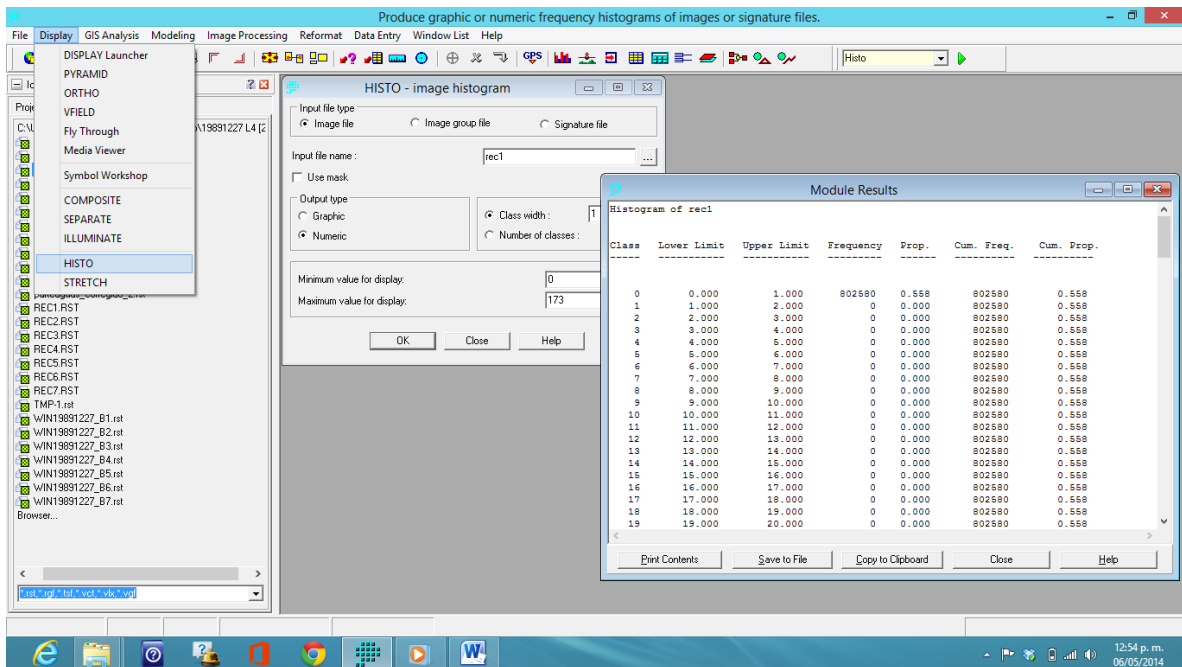


Figura 3.21. IDRISI Selva: Uso del comando Histo

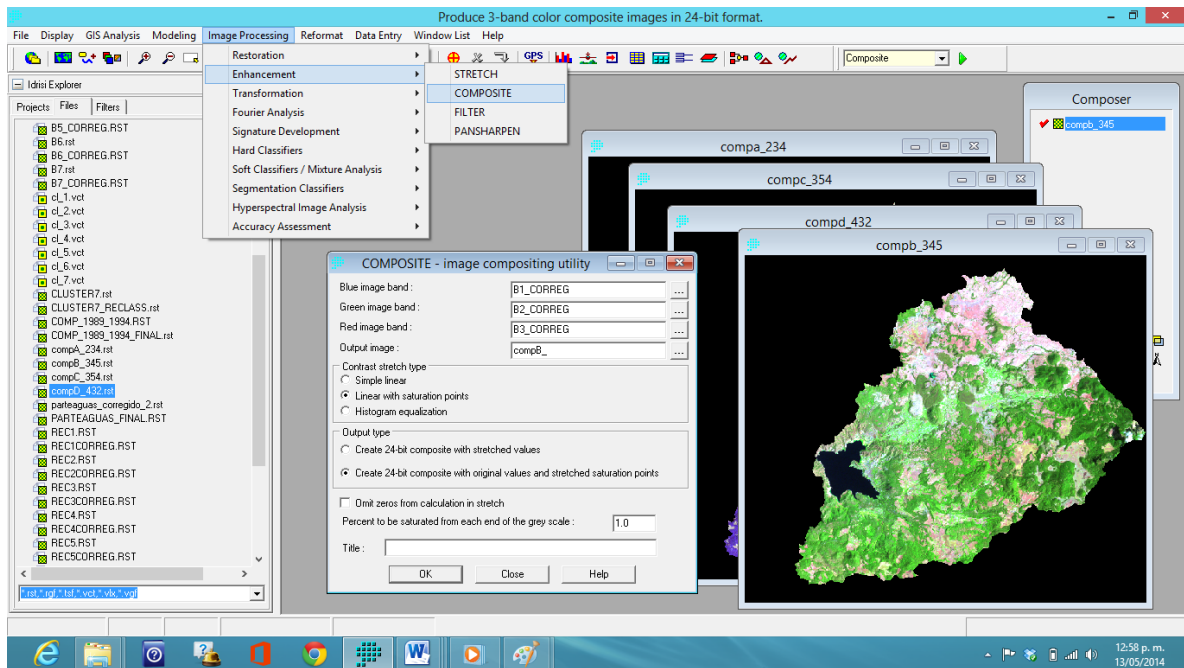


Figura 3.22. IDRISI Selva: Composición de imágenes

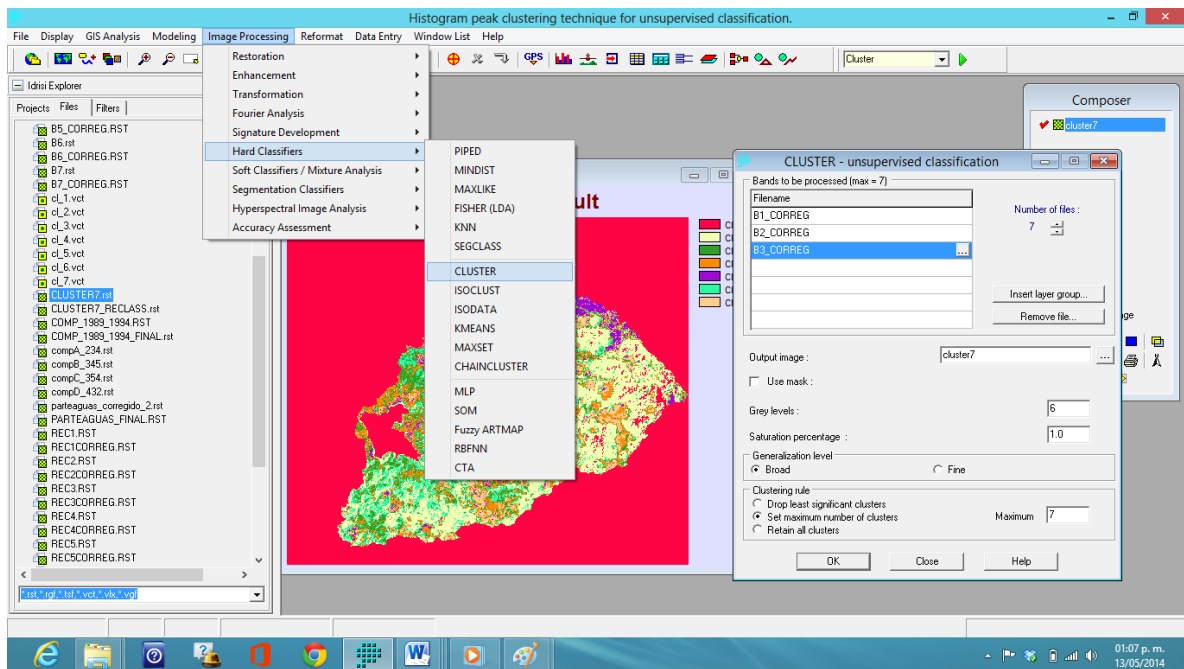


Figura 3.23. IDRISI Selva: Comando Cluster

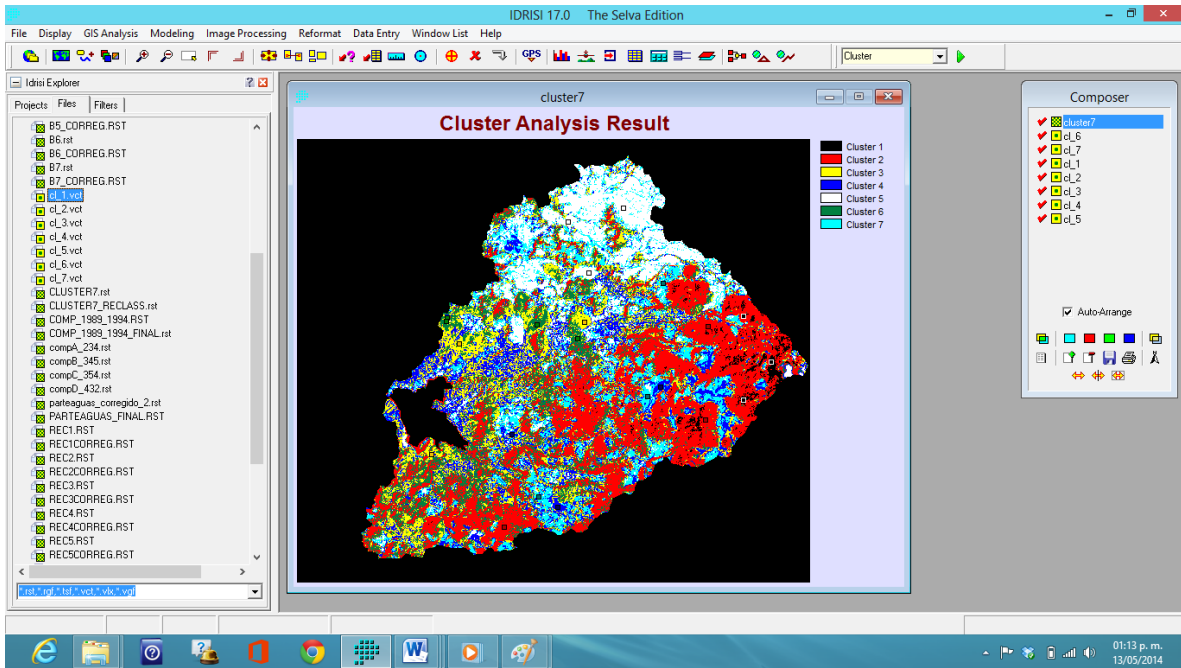


Figura 3.24. IDRISI Selva: Puntos por familia o grupo

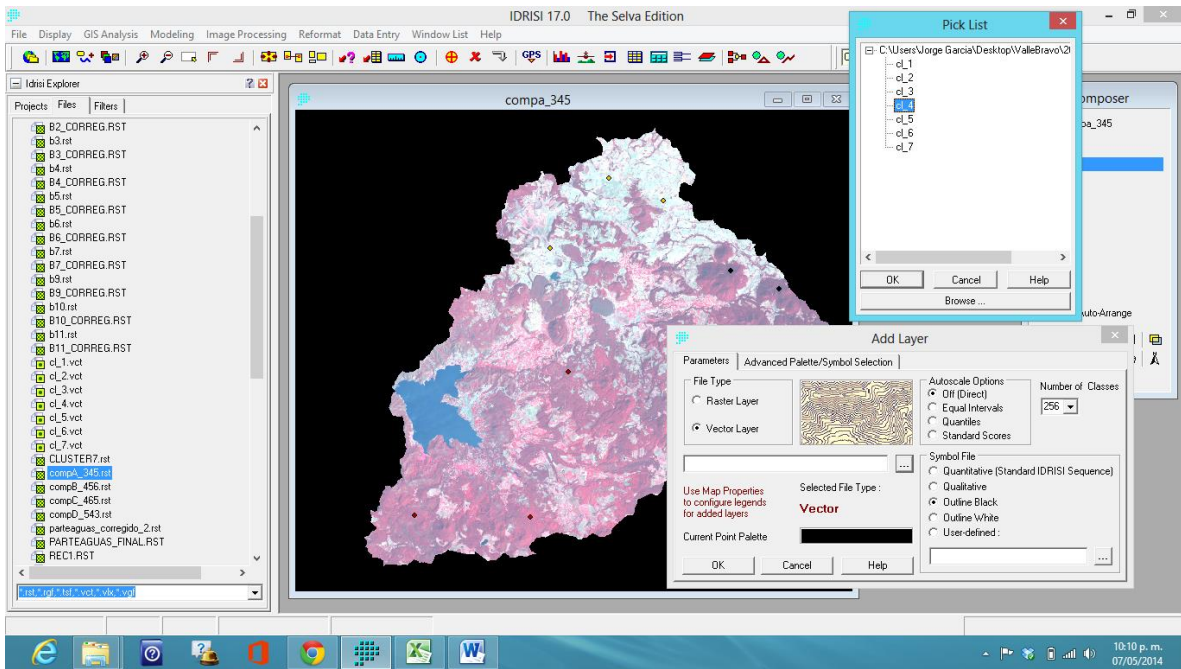


Figura 3.25. IDRISI Selva: Sobre posición en una composición

Comparación

- xii. Aún en la composición *B* puede existir ambigüedad en la pertenencia de un pixel dentro de una u otra familia. Lo que se busca es el cambio en la superficie vegetal, es por ello que se propone el análisis punto por punto en todos los años entre las familias creadas por *IDRISI Selva* y las composiciones. Para asegurar la correcta clasificación del tipo de vegetación, se propone analizar con un software de mayor resolución espacial cada punto. En este caso se ocupará *Google Earth™*.
Este software en su última edición registra, al menos para la región geográfica en la que se ubica la cuenca, información de 2013. Esto significa que los puntos vectoriales que pueden ser útiles son los del 11 de marzo de 2014.
El método es sencillo: una vez que se cuenta con los 3 puntos por cada familia del documento resultante del 'Cluster', y que se han sobrepuesto debidamente en la composición *B* del mismo año, también se colocan en el software de *Google*. Se hace la impresión de pantalla y se describe lo registrado.
A continuación, se procede a ver qué ocurre en ese mismo punto en la composición *B*, es decir, qué color registra. Así para todos los puntos
- xiii. Este color de referencia nos ayudará a conocer en los años pasados la condición vegetal del área. De esta forma se pueden considerar tres zonas: Alta, Mediana y de Baja población vegetal. Para concretar esta última clasificación es necesario ocupar el comando 'Reclass'.

- xiv. IDRISI Selva incluye una herramienta para el cálculo de área, como se muestra en la Figura 3.26.
- xv. Los resultados de este análisis deben ser asociados a lo calculado en el subcapítulo 3.1.

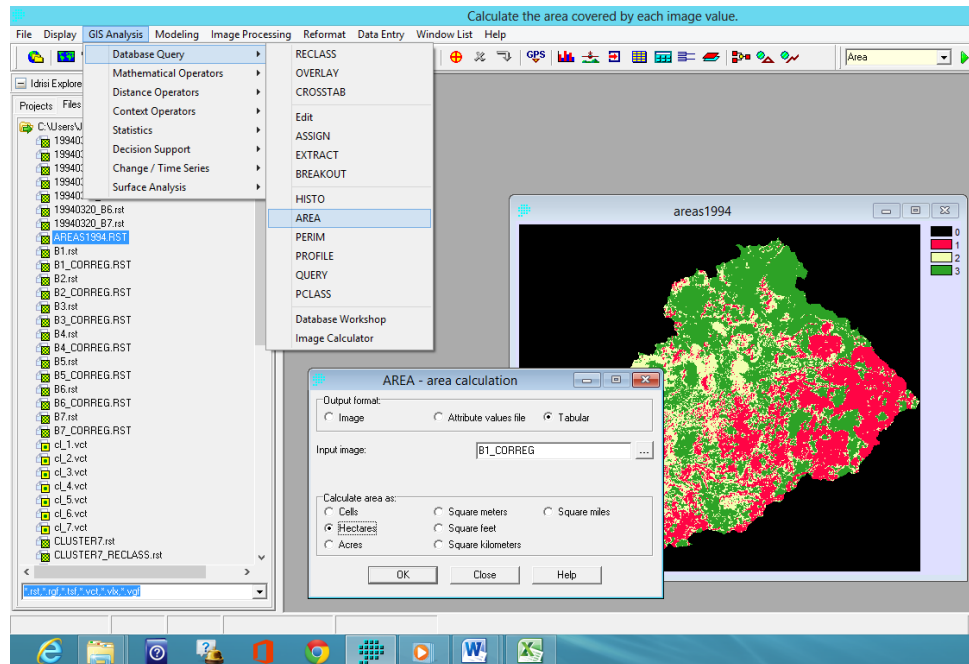


Figura 3.26. Comando Área de IDRISI Selva

4. Resultados, análisis y discusión

Se presenta la agrupación en familias para la imagen del 11 de marzo de 2014 (Figura 4.1).

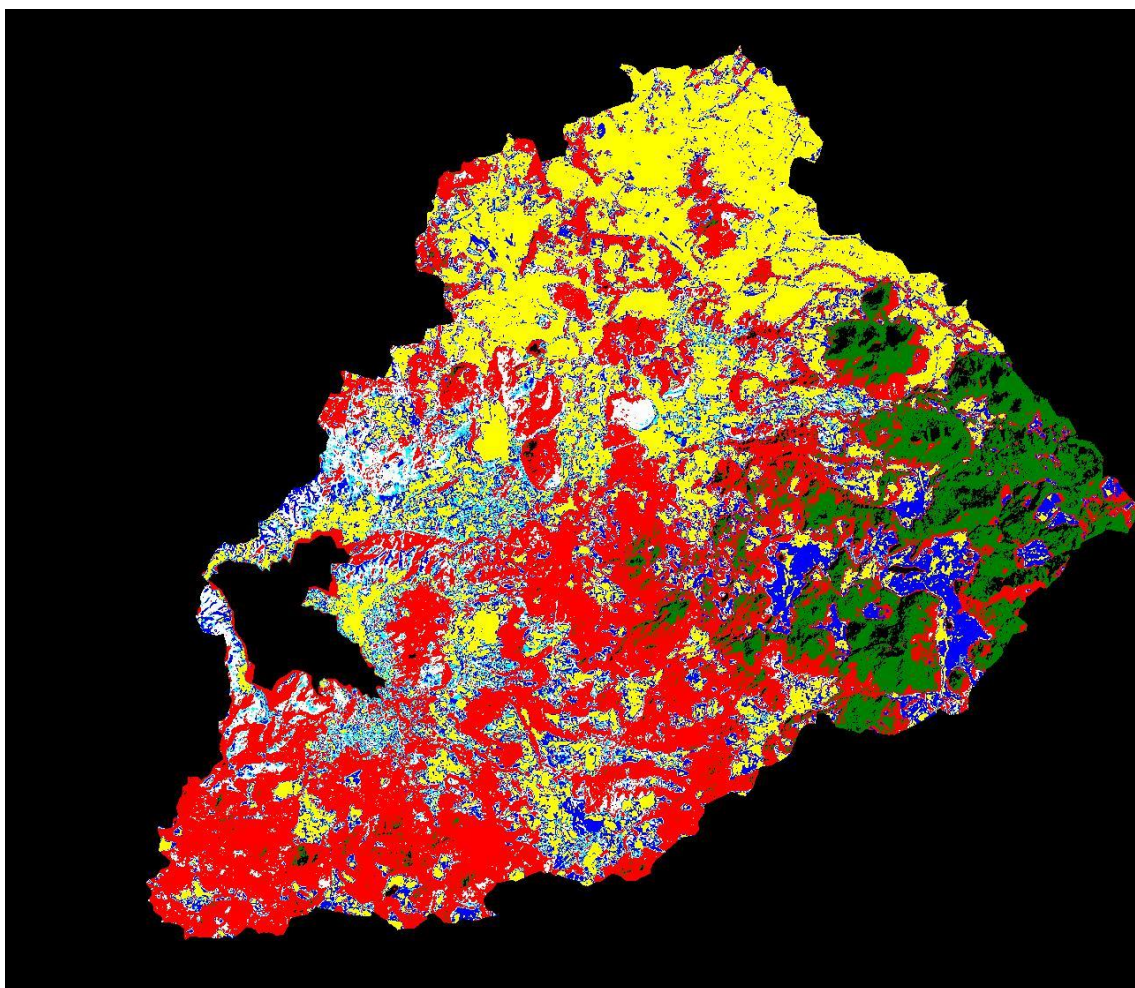


Figura 4.1. Familias en las que IDRISI Selva agrupó la imagen del 11 de marzo de 2014
Fecha: 11/02/14



Las capturas de pantalla de *Google Earth™* del entorno en donde se localiza cada punto de cada familia se presentan en la Tabla 4.1, Tabla 4.2, Tabla 4.3, Tabla 4.4, Tabla 4.5, Tabla 4.6 y Tabla 4.7.

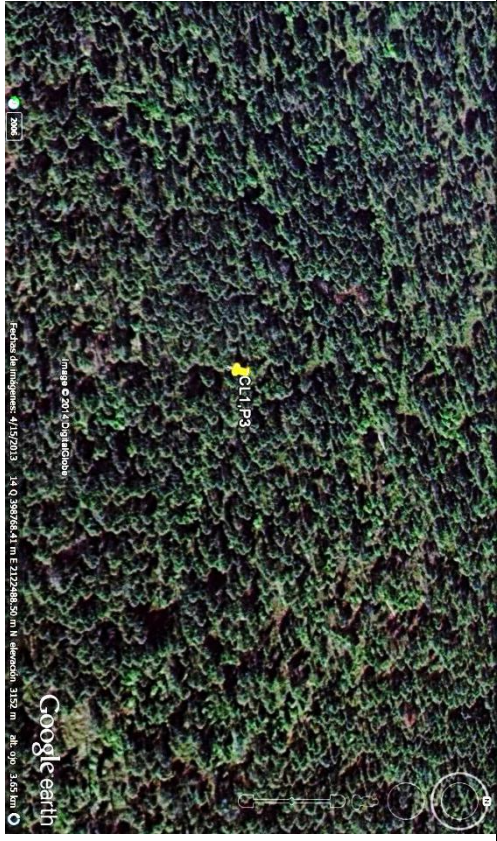
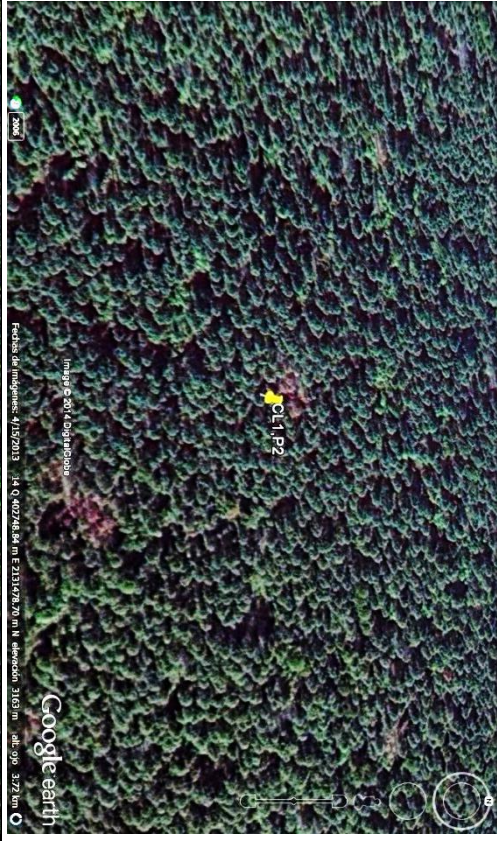

Cluster 1					
Familia	Punto		Captura de pantalla Google Earth™ 2013		
	X	Y	X	Y	
	398,787.3590	2,122,496.4303	402,613.8252	2,131,309.5470	
					
					

Tabla 4.1. Familia Cluster 1

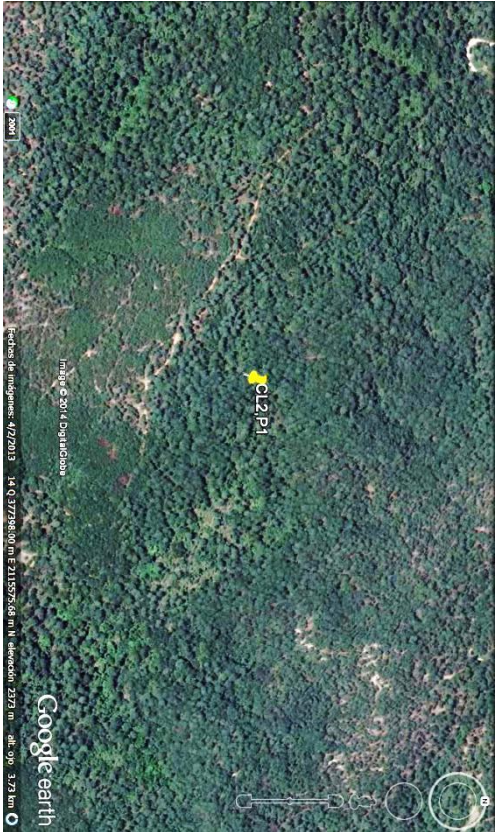
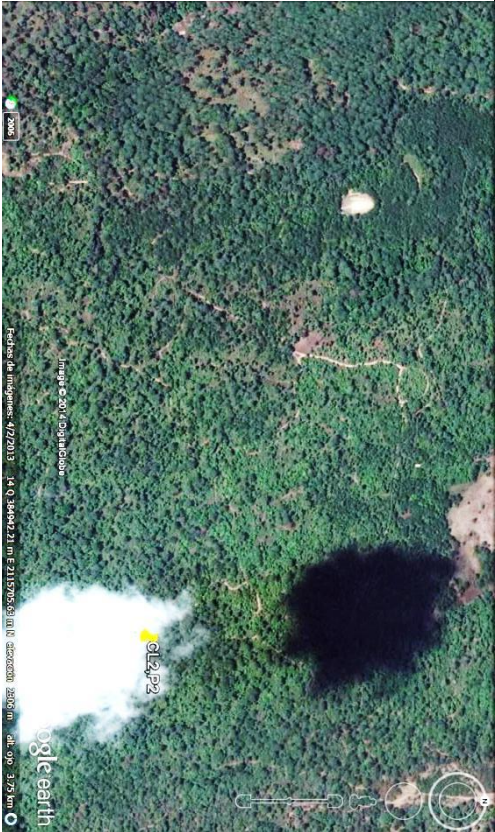
Cluster 2					
Familia	Punto		Captura de pantalla Google Earth™ 2013		
	X	Y			
	377,317.4095	2,115,565.6213	 <p>Google Earth Imagen © 2014 DigitalGlobe Fecha de imágenes: 4/2/2013 14 Q 3779810 m E 21157568 m H elevación: 2373 m alt: 95 2.73 km</p>		
	385,362.6920	2,115,480.5308			
	387,992.6185	2,125,556.9096	 <p>Google Earth Imagen © 2014 DigitalGlobe Fecha de imágenes: 4/2/2013 14 Q 3849221 m E 21257568 m H elevación: 2306 m alt: 95 2.73 km</p>		
	387,992.6185	2,125,556.9096			

Tabla 4.2. Familia Cluster 2

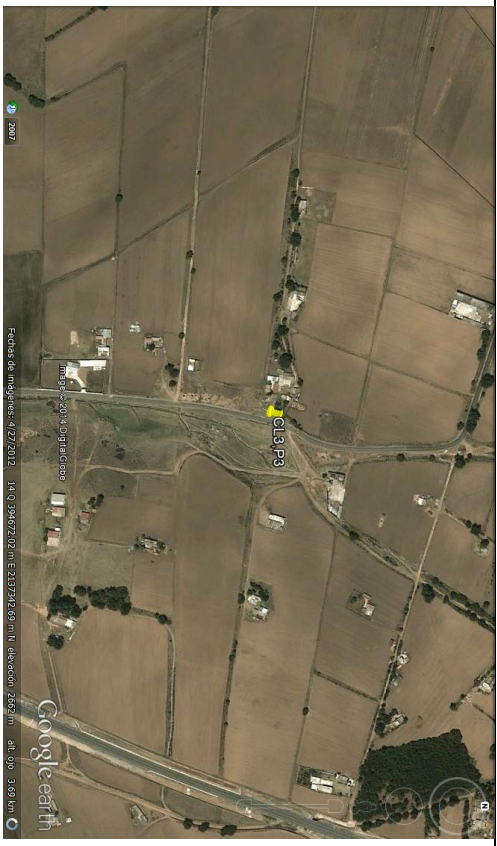


Cluster 3					
Familia	Punto		Captura de pantalla Google Earth™ 2013		
	Y	X	Y	X	Y
	2,137,423.1776	394,568.4794	2,134,127.4576	386,725.4088	2,138,968.0463
					

Tabla 4.3. Familia Cluster 3

Cluster 4					
Familia	Punto		Captura de pantalla Google Earth™ 2013		
	Y	X	Y	X	Y
	2,122,453.6733	401,755.8008	2,124,985.1551	396,087.4105	2,126,826.2328

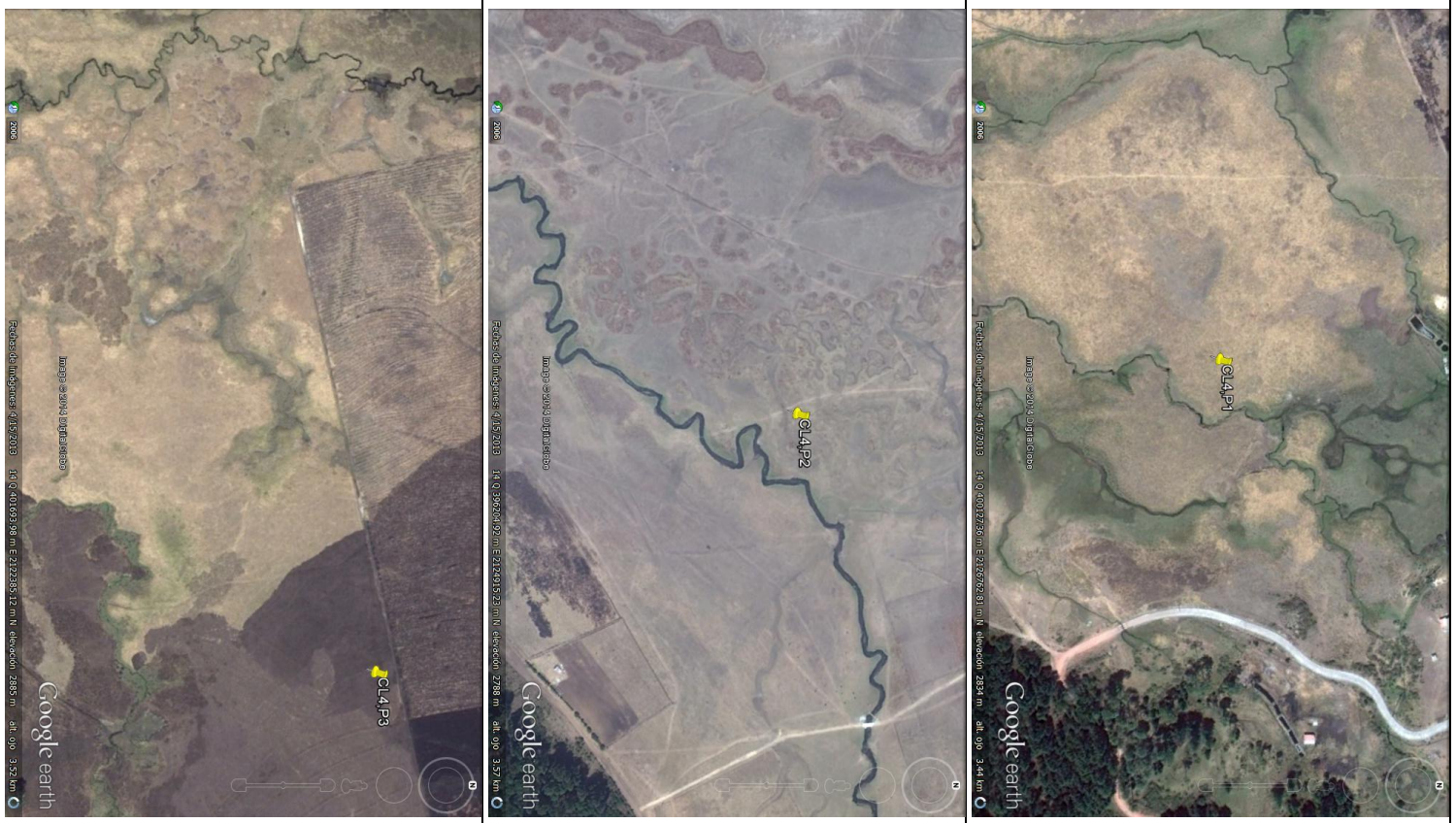


Tabla 4.4. Familia Cluster 4


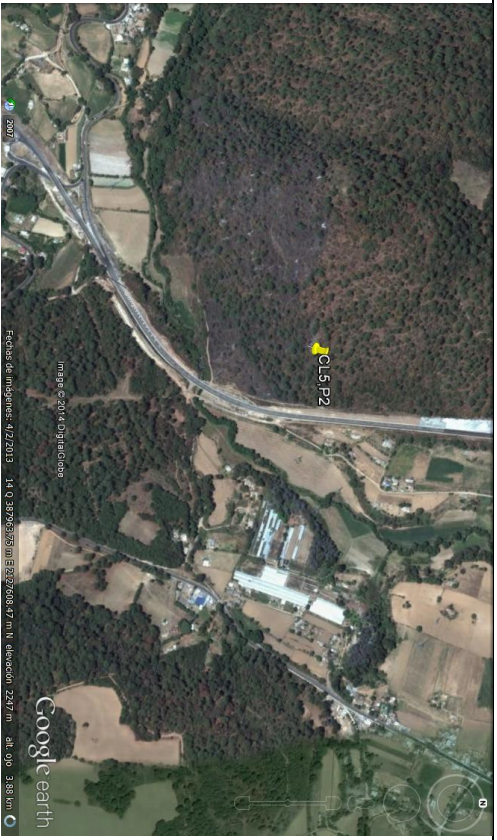
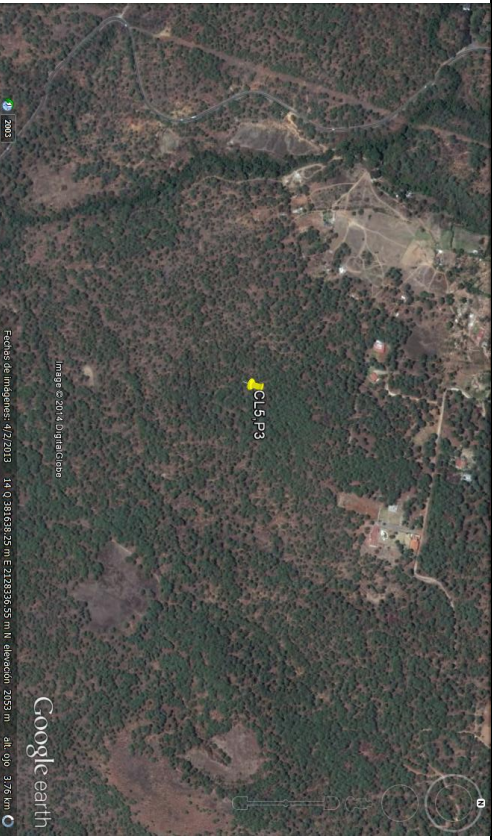
Familia		Punto		Captura de pantalla Google Earth™ 2013
		X	Y	
Cluster 5				
		X	Y	
		X	Y	
		X	Y	

Tabla 4.5. Familia Cluster 5

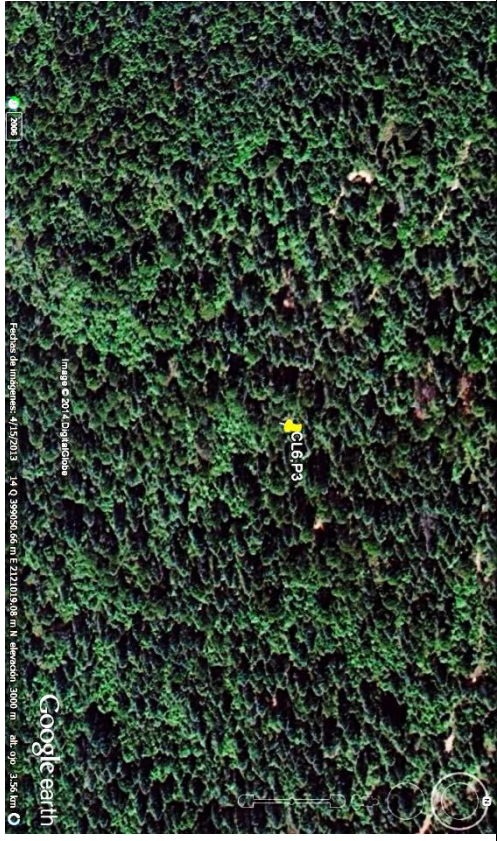


Cluster 6							
Familia		Punto		Captura de pantalla Google Earth™ 2013			
		Y	X	Y	X		
		2,121,036.9777	398,991.8166	2,128,145.5169	403,993.9306		
				2,131,687.4852	399,247.9818		
							

Tabla 4.6. Familia Cluster 6

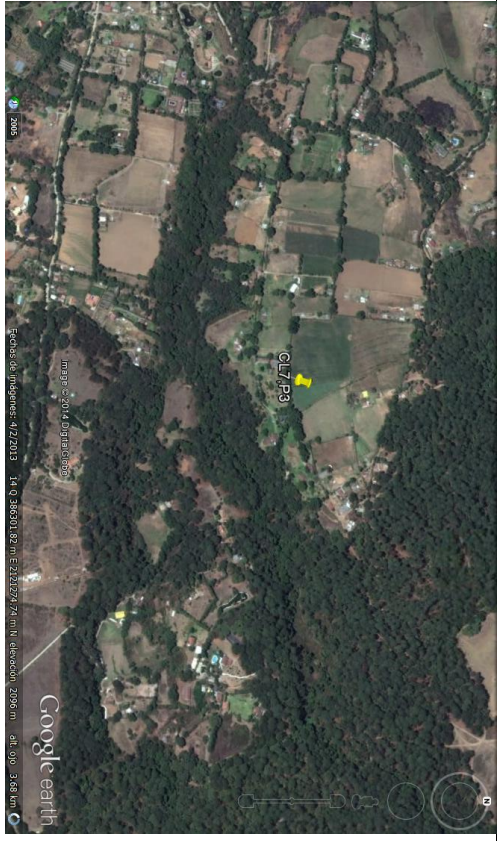
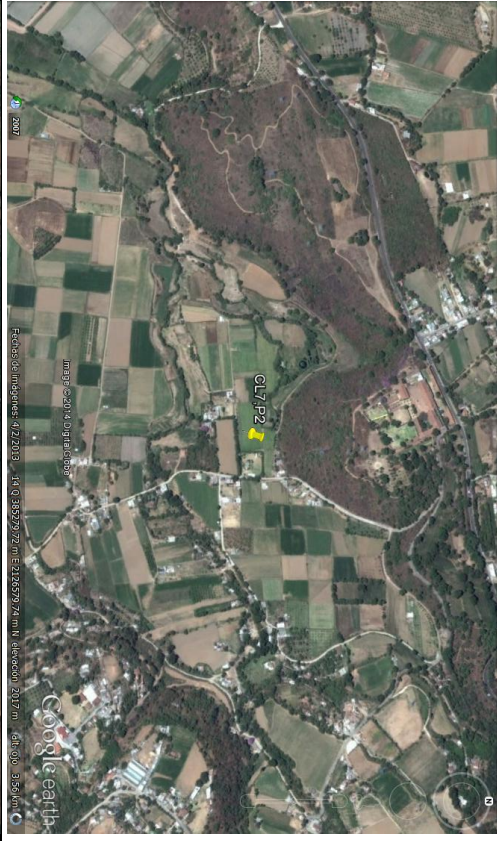
Cluster 7					
Familia	Punto		Captura de pantalla Google Earth™ 2013		
	Y	X			
	2,121,339.9994	386,127.0395			
	2,126,619.5595	385,227.1585			
	2,127,911.2109	382,472.7193			

Tabla 4.7. Familia Cluster 7

En la Tabla 4.8 se presenta por familia la descripción de la situación real y actual del área que se agrupó en cada familia (Figura 4.1). Así se puede apreciar, por ejemplo, que el Punto 2 de la familia Cluster 1, agrupada al color negro, se trata de un bosque con alta densidad de vegetación (Tabla 4.1); mientras tanto, en el Punto 1 de la familia Cluster 3, coloreada en amarillo, se puede considerar como una zona de cultivo (Tabla 4.3).

Fecha	11/02/2014			Google Earth™ (2013)
Familia	Puntos			
	#	X	Y	
Cluster 1	1	399,231.0072	2,132,532.8187	Bosque con alta densidad de vegetación. Suelo escasamente descubierto. No se distinguen senderos, macizos rocosos o claros.
	2	402,613.8252	2,131,309.5470	
	3	398,787.3590	2,122,496.4303	
Cluster 2	1	377,317.4095	2,115,565.6213	Bosque con mediana densidad de vegetación. Distancia entre árboles de entre 1 y 3 metros. Se distingue suelo, senderos, macizos rocosos y claros.
	2	385,362.6920	2,115,480.5308	
	3	387,992.6185	2,125,556.9096	
Cluster 3	1	390,801.7416	2,138,968.0463	Campos de cultivo (formas geométricas de surcos y linderos). No hay cobertura arbórea ni pastizales. Uso agrícola probablemente ya lo haya erosionado.
	2	386,725.4088	2,134,127.4576	
	3	394,568.4794	2,137,423.1776	
Cluster 4	1	399,994.0038	2,126,826.2328	Terrenos cercanos a cuerpos de agua (zonas de inundación). Mínima cobertura vegetal. Uso medianamente agrícola.
	2	396,087.4105	2,124,985.1551	
	3	401,755.8008	2,122,453.6733	
Cluster 5	1	390,525.2862	2,129,929.6135	Pastizales con cobertura vegetal mediana a escasa. Suelos medianamente expuestos. Distancia entre árboles de 5 a 10 metros, o ejemplares de escasa altura.
	2	387,758.6198	2,127,689.5305	
	3	381,479.2834	2,128,469.8410	
Cluster 6	1	399,247.9818	2,131,687.4852	Bosque con mediana densidad de vegetación. Muy parecido al que se presenta en la familia Cluster 2. Variaciones en la altura de las especies arbóreas.
	2	403,993.9306	2,128,145.5169	
	3	398,991.8166	2,121,036.9777	
Cluster 7	1	382,472.7193	2,127,911.2109	Pastizales o terrenos descubiertos, escasa cobertura vegetal. Uso recreativo o parcelas en descanso. Creciente uso habitacional.
	2	385,227.1585	2,126,619.5595	
	3	386,127.0395	2,121,339.9994	

Tabla 4.8. Interpretación de la situación del área vegetal

La información de la Tabla 4.8 se debe corroborar, como se mencionó al inicio de este capítulo y del 3.2.4, con la interpretación de los colores resultantes de una composición, en este caso la B (Tabla 3.11). La Figura 4.2 y la Tabla 4.9 muestran los colores del área por punto.



Figura 4.2. Composición B

Familia	Área (ha)	Porcentaje	Fecha	11/02/2014			Combinación B	Cobertura vegetal
			Puntos			Color		
			#	x	y			
Cluster 1	1,661.67	2.98%	1	399,231.0072	2,132,532.8187	Verde +	Alta	
			2	402,613.8252	2,131,309.5470	Verde +		
			3	398,787.3590	2,122,496.4303	Verde +		
Cluster 2	19,836.45	35.61%	1	377,317.4095	2,115,565.6213	Verde -	Alta	
			2	385,362.6920	2,115,480.5308	Verde -		
			3	387,992.6185	2,125,556.9096	Verde -		
Cluster 3	13,921.29	24.99%	1	390,801.7416	2,138,968.0463	Violeta	Baja	
			2	386,725.4088	2,134,127.4576	Violeta		
			3	394,568.4794	2,137,423.1776	Violeta		
Cluster 4	7,149.87	12.83%	1	399,994.0038	2,126,826.2328	Amarillo	Baja	
			2	396,087.4105	2,124,985.1551	Amarillo		
			3	401,755.8008	2,122,453.6733	Amarillo		
Cluster 5	5,446.35	9.78%	1	390,525.2862	2,129,929.6135	Verde - c/marrón o rosa	Media	
			2	387,758.6198	2,127,689.5305	Verde - c/marrón o rosa		
			3	381,479.2834	2,128,469.8410	Verde - c/marrón o rosa		
Cluster 6	5,370.66	9.64%	1	399,247.9818	2,131,687.4852	Verde +	Alta	
			2	403,993.9306	2,128,145.5169	Verde +		
			3	398,991.8166	2,121,036.9777	Verde +		
Cluster 7	2,319.84	4.16%	1	382,472.7193	2,127,911.2109	Verde -	Baja	
			2	385,227.1585	2,126,619.5595	Verde -		
			3	386,127.0395	2,121,339.9994	Verde -		

Tabla 4.9. Áreas calculadas por IDRISI Selva de cada familia y el color que muestran en la composición B

Se aprecia por ejemplo que el punto 2 de la familia Cluster 1, que cuenta con un área de 2 mil 319 hectáreas, se encuentra en un área de verde intenso y significa una densidad de vegetación alta.

Si se hace la relación entre la Tabla 4.8 y la Tabla 4.9 resulta lo siguiente:

- Los verdes intensos a moderados (Verde + a Verde -) se trata de superficies con una densa cubierta vegetal. Recordando la clasificación climática de la cuenca, presentada en el subcapítulo 2.1.1, se pueden considerar como bosques de coníferas.
- Los verdes con moteados de rosa se trata de zonas con una mediana densidad de vegetación. Se consideran pastizales.
- Los colores amarillos y morados son suelos descubiertos que pueden tener un uso agrícola, ganadero o urbano. También pueden encontrarse en condición de erosión y desertificación.

De esta manera se puede operar desde *IDRISI Selva* el comando 'Reclass' para dar la nueva categoría, como en la Tabla 4.10.

Fecha	11/02/2014			
Cobertura vegetal	Familia	Área de la familia (ha)	Área sub total (ha)	Porcentaje
Alta	Cluster 1	1,661.67	26,868.78	48.23%
	Cluster 2	19,836.45		
	Cluster 6	5,370.66		
Media	Cluster 5	5,446.35	5,446.35	9.78%
Baja	Cluster 3	13,921.29	23,391.00	41.99%
	Cluster 4	7,149.87		
	Cluster 7	2,319.84		
Total		55,706.13	55,706.13	

Tabla 4.10. Reclasificación de las familias

El resto de los años se clasificarán con base en el patrón mostrado en la fecha de 2014. A continuación se muestran todas las tablas de cálculo y las imágenes resultantes del proceso.

Fecha	11/02/2014	
Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Alta	26,868.78	48.23%
Media	5,446.35	9.78%
Baja	23,391.00	41.99%
Total	55,706.13	

Tabla 4.11. Cobertura vegetal en 2014

Fecha	25/01/1986			Combinación B	Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Familia	Puntos		Color				
	#	X		y			
Cluster 1	1	398711.6966	2132657.1308	Verde +	Alta	1,246.32	2.24%
	2	404693.4819	2127986.2494	Verde +			
	3	398744.5635	2122558.8169	Verde +			
Cluster 2	1	391065.5563	2139218.2812	Violeta	Baja	16,680.69	29.94%
	2	385072.7238	2129104.3159	Violeta			
	3	395372.9047	2134161.2986	Violeta			
Cluster 3	1	385433.3110	2131284.7947	Verde - c/marrón o rosa	Media	11,806.02	21.19%
	2	389795.3278	2129827.6567	Verde - c/marrón o rosa			
	3	377726.9925	2114973.0065	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 4	1	375535.8334	2122649.2194	Verde - c/marrón o rosa	Media	9,913.68	17.80%
	2	381867.8313	2127339.0744	Verde - c/marrón o rosa			
	3	388172.8602	2115731.6377	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 5	1	390257.8672	2128203.6609	Verde - c/marrón o rosa	Media	7,210.44	12.94%
	2	389376.0416	2127901.1940	Verde - c/marrón o rosa			
	3	384971.3257	2135993.6013	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 6	1	400772.4782	2128510.5754	Verde +	Alta	6,374.34	11.44%
	2	403387.7767	2130221.8921	Verde +			
	3	401873.6565	2125442.0076	Verde +			
Cluster 7	1	400969.1172	2131657.8245	Verde - c/marrón o rosa	Media	2,474.64	4.44%
	2	393783.0846	2129037.7772	Verde - c/marrón o rosa			
	3	384623.3906	2135941.4090	Verde - c/marrón o rosa			

Tabla 4.12. Áreas por familia y color en la composición B para 1986

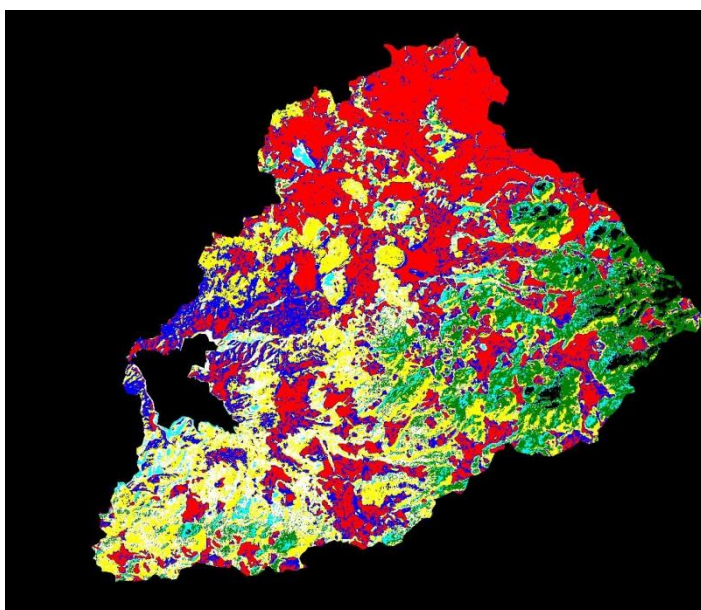


Figura 4.3. Familias en 1986

Fecha	25/01/1986	
Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Alta	7,620.66	13.68%
Media	31,404.78	56.38%
Baja	16,680.69	29.94%
Total	55,706.13	

Tabla 4.13. Cobertura vegetal en 1986

Fecha	27/12/1989			Combinación B	Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Familia	Puntos		Color				
	#	x		y			
Cluster 1	1	401559.0051	2131564.1470	Verde +	Alta	133.02	0.24%
	2	402220.8280	2131350.2071	Verde +			
	3	402524.3719	2124320.8403	Verde +			
Cluster 2	1	390566.0817	2136945.0993	Amarillo	Baja	22,931.46	41.17%
	2	400008.3805	2124772.1386	Amarillo			
	3	384622.8921	2122733.0718	Amarillo			
Cluster 3	1	387586.7757	2123736.6893	Verde - c/marrón o rosa	Media	13,651.74	24.51%
	2	389738.8535	2128714.1682	Verde - c/marrón o rosa			
	3	380035.6703	2118036.6312	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 4	1	381974.5073	2130701.2718	Verde - c/marrón o rosa	Media	6,978.24	12.53%
	2	394601.8303	2121582.9519	Verde - c/marrón o rosa			
	3	377525.4407	2114681.3177	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 5	1	398766.0672	2129588.8506	Verde -	Alta	5,775.39	10.37%
	2	396081.8355	2126941.3634	Verde -			
	3	399130.2649	2132289.7536	Verde -			
Cluster 6	1	398934.7438	2132758.9221	Verde +	Alta	3,920.76	7.04%
	2	401187.1724	2131777.7504	Verde +			
	3	399033.2356	2123159.6058	Verde +			
Cluster 7	1	389712.5221	2134958.9328	Violeta	Baja	2,315.52	4.16%
	2	393859.5235	2125868.2531	Violeta			
	3	396157.8418	2133296.1079	Violeta			

Tabla 4.14. Áreas por familia y color en la composición B para 1989

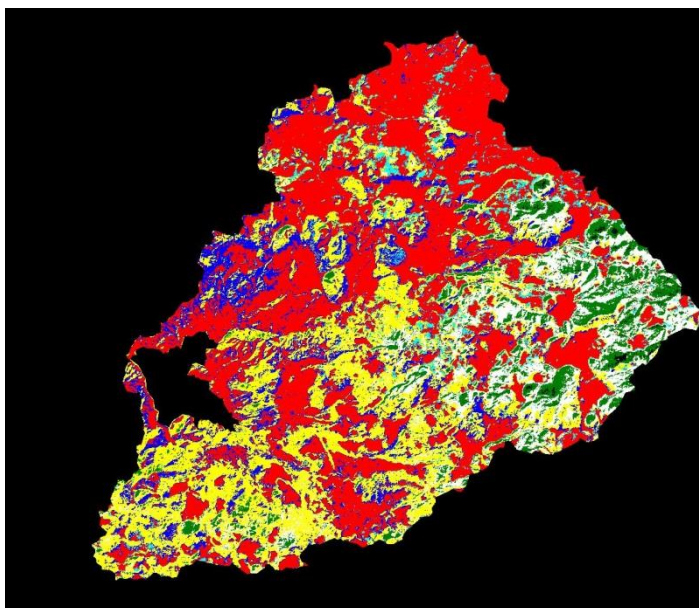


Figura 4.4. Familias en 1989

Fecha	12/27/1989	
Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Alta	9,829.17	17.64%
Media	20,629.98	37.03%
Baja	25,246.98	45.32%
Total	55,706.13	

Tabla 4.15. Cobertura vegetal en 1989

Fecha	20/03/1994			Combinación B	Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Familia	Puntos		Color				
	#	x		y			
Cluster 1	1	404303.6675	2126970.8370	Verde +	Alta	741.33	1.33%
	2	402195.5355	2124121.8329	Verde +			
	3	402195.5355	2130425.5348	Verde +			
Cluster 2	1	399538.0401	2129623.5781	Verde +	Alta	15,897.15	28.54%
	2	399345.1601	2122633.6898	Verde +			
	3	384156.8041	2114549.8448	Verde +			
Cluster 3	1	380788.9121	2128347.6680	Verde - c/marrón o rosa	Media	8,613.27	15.46%
	2	390190.5328	2129947.4752	Verde - c/marrón o rosa			
	3	378711.2322	2119976.4323	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 4	1	395933.9436	2125083.4018	Amarillo	Baja	8,357.58	15.00%
	2	388186.8475	2116025.8961	Amarillo			
	3	384735.4401	2121526.9775	Amarillo			
Cluster 5	1	393146.7450	2138559.4191	Violeta	Baja	7,715.34	13.85%
	2	388987.2953	2137540.6698	Violeta			
	3	390516.8994	2133680.1462	Violeta			
Cluster 6	1	386655.5680	2129797.3272	Verde - c/marrón o rosa	Media	7,646.04	13.73%
	2	389702.9250	2128701.9238	Verde - c/marrón o rosa			
	3	379818.0982	2130004.8747	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 7	1	394939.1085	2124379.4550	Violeta	Baja	6,735.42	12.09%
	2	386762.5345	2116799.2630	Violeta			
	3	396139.9212	2132906.7421	Violeta			

Tabla 4.16. Áreas por familia y color en la composición B para 1994

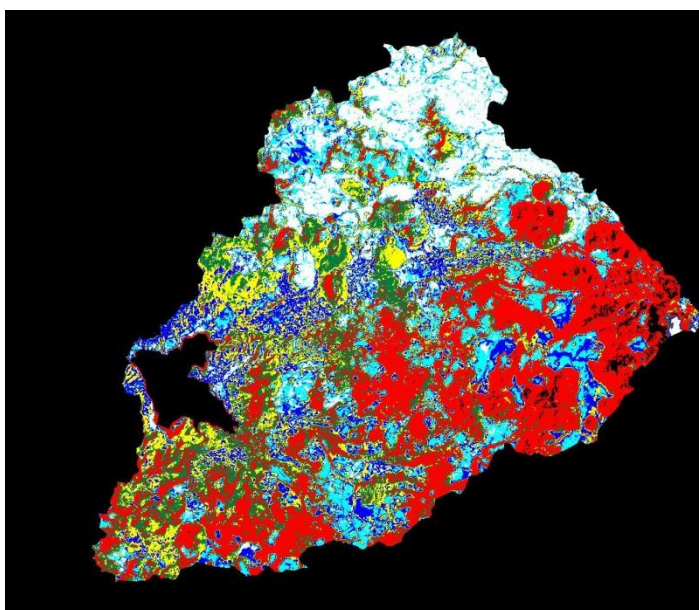


Figura 4.5. Familias en 1994

Fecha	02/03/1994	
Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Alta	16,638.48	29.87%
Media	16,259.31	29.19%
Baja	22,808.34	40.94%
Total	55,706.13	

Tabla 4.17. Cobertura vegetal en 1994

Fecha	03/04/1999			Combinación B	Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Familia	Puntos		Color				
	#	x		y			
Cluster 1	1	398680.0161	2132501.1577	Verde +	Alta	1,421.55	2.55%
	2	402989.8809	2129215.0997	Verde +			
	3	402783.0821	2126399.2501	Verde +			
Cluster 2	1	390264.2744	2138748.1957	Violeta	Baja	17,127.27	30.75%
	2	395547.7443	2136341.3832	Violeta			
	3	385952.9631	2133174.5247	Violeta			
Cluster 3	1	390059.9803	2132711.6956	Verde -	Alta	13,518.27	24.27%
	2	394580.0468	2128912.7301	Verde -			
	3	384747.2418	2115208.2894	Verde -			
Cluster 4	1	382264.5819	2128591.4545	Verde - c/marrón o rosa	Media	7,880.58	14.15%
	2	395002.7645	2130090.7233	Verde - c/marrón o rosa			
	3	383965.4122	2120551.3146	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 5	1	386570.5522	2129757.0865	Verde - c/marrón o rosa	Media	7,327.80	13.15%
	2	381590.7507	2117267.6687	Verde - c/marrón o rosa			
	3	385535.7833	2131499.6606	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 6	1	393194.8648	2126763.2068	Amarillo	Baja	4,936.14	8.86%
	2	395779.2182	2124970.3156	Amarillo			
	3	401033.7501	2122703.7299	Amarillo			
Cluster 7	1	397422.9482	2132325.5234	Verde -	Alta	3,494.52	6.27%
	2	400469.8757	2128939.0813	Verde -			
	3	399412.4613	2122588.3349	Verde -			

Tabla 4.18. Áreas por familia y color en la composición B para 1999

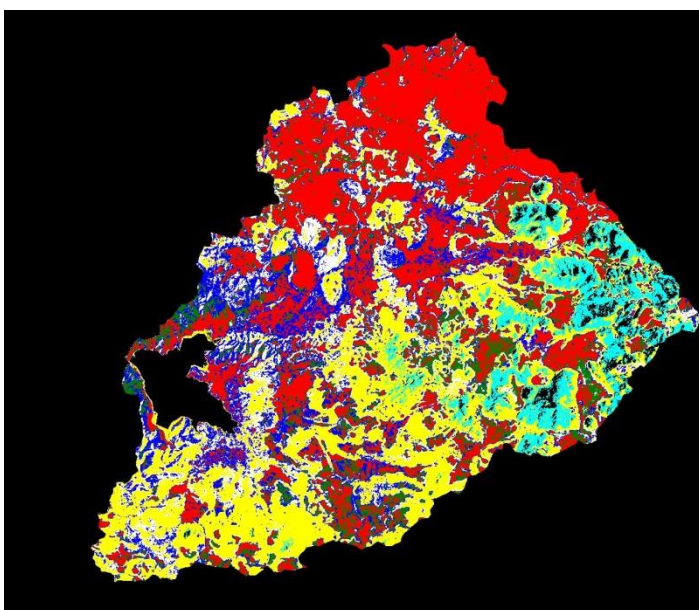


Figura 4.6. Familias en 1999

Fecha	03/04/1999	
Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Alta	18,434.34	33.09%
Media	15,208.38	27.30%
Baja	22,063.41	39.61%
Total	55,706.13	

Tabla 4.19. Cobertura vegetal en 1999

Fecha	17/02/2003			Combinación B	Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Familia	Puntos		Color				
	#	x		y			
Cluster 1	1	398726.4227	2132570.1230	Verde +	Alta	1,033.11	1.85%
	2	397345.6517	2122693.9780	Verde +			
	3	402120.8181	2131332.0060	Verde +			
Cluster 2	1	393402.8571	2138941.7800	Violeta	Baja	20,338.65	36.51%
	2	385461.5798	2133214.9320	Violeta			
	3	400172.4706	2124754.8150	Violeta			
Cluster 3	1	387792.4109	2133794.4290	Verde -	Alta	14,573.79	26.16%
	2	388860.5910	2117270.6940	Verde -			
	3	375927.7903	2114625.6680	Verde -			
Cluster 4	1	381603.3258	2116064.1750	Verde -	Alta	7,898.85	14.18%
	2	395275.4648	2128460.5640	Verde -			
	3	395854.8713	2123562.2290	Verde -			
Cluster 5	1	390089.6245	2130047.2740	Verde - c/marrón o rosa	Media	7,369.29	13.23%
	2	386000.8449	2130741.6530	Verde - c/marrón o rosa			
	3	380403.6768	2127199.1190	Verde - c/marrón o rosa			
Cluster 6	1	403271.4248	2128861.9160	Verde -	Alta	2,443.95	4.39%
	2	404597.2893	2128357.2120	Verde -			
	3	402495.7490	2127726.3320	Verde -			
Cluster 7	1	397846.7168	2131240.3000	Verde -	Alta	2,048.49	3.68%
	2	390643.1401	2124016.1880	Verde -			
	3	385150.0858	2115328.7140	Verde -			

Tabla 4.20. Áreas por familia y color en la composición B para 2003

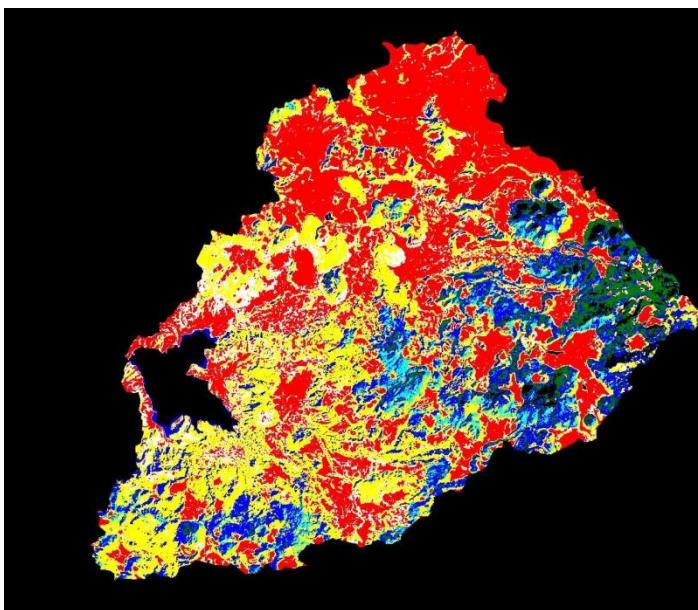


Figura 4.7. Familias en 2003

Fecha	17/02/2003	
Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Alta	27,998.19	50.26%
Media	7,369.29	13.23%
Baja	20,338.65	36.51%
Total	55,706.13	

Tabla 4.21. Cobertura vegetal en 2003

Fecha	29/05/2008			Combinación B	Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Familia	Puntos		Color				
	#	x		y			
Cluster 1	1	391294.8000	2122344.5360	Verde +	Alta	710.37	1.28%
	2	389760.6092	2126704.4160	Verde +			
	3	400704.0656	2122712.1720	Verde +			
Cluster 2	1	398284.7899	2131848.2980	Verde -	Alta	16,266.24	29.20%
	2	390148.2353	2122477.0910	Verde -			
	3	399326.2689	2129505.4960	Verde -			
Cluster 3	1	380045.8699	2128344.8640	Verde - c/marrón ó rosa	Media	11,643.84	20.90%
	2	390077.6246	2130129.5710	Verde - c/marrón ó rosa			
	3	378942.1520	2120015.4640	Verde - c/marrón ó rosa			
Cluster 4	1	390493.6941	2139075.5310	Violeta	Baja	10,583.10	19.00%
	2	395104.5003	2133860.6760	Violeta			
	3	387574.1880	2132229.7760	Violeta			
Cluster 5	1	386480.7877	2117550.9670	Violeta c/ amarillo ó verde -	Baja	10,540.89	18.92%
	2	383069.6957	2127204.3540	Violeta c/ amarillo ó verde -			
	3	394580.9378	2129931.5360	Violeta c/ amarillo ó verde -			
Cluster 6	1	389649.1473	2128542.7050	Verde -	Alta	4,047.21	7.27%
	2	390080.9261	2117760.1360	Verde -			
	3	377540.9091	2115497.7400	Verde -			
Cluster 7	1	379007.8501	2127274.3690	Violeta c/ amarillo ó verde -	Baja	1,914.48	3.44%
	2	400960.1469	2124750.1650	Violeta c/ amarillo ó verde -			
	3	387669.9006	2116577.0850	Violeta c/ amarillo ó verde -			

Tabla 4.22. Áreas por familia y color en la composición B para 2008

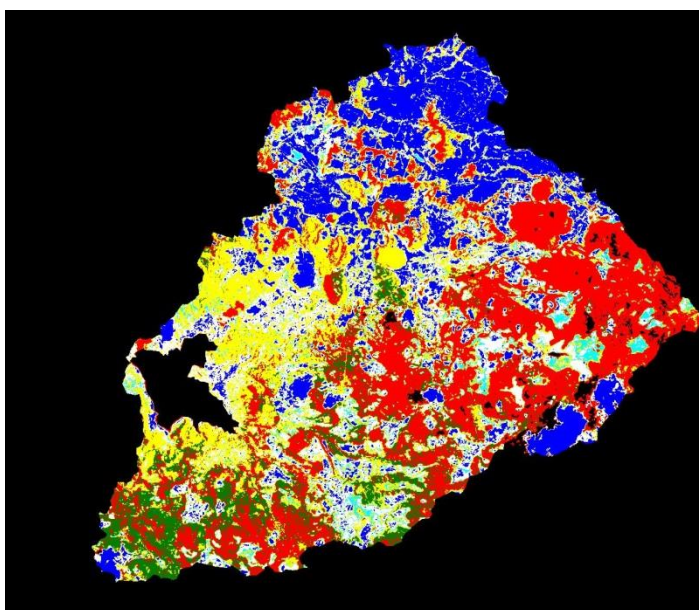


Figura 4.8. Familias en 2008

Fecha	29/05/2008	
Cobertura vegetal	Área (ha)	Porcentaje
Alta	21,023.82	37.74%
Media	11,643.84	20.90%
Baja	23,038.47	41.36%
Total	55,706.13	

Tabla 4.23. Cobertura vegetal en 2008

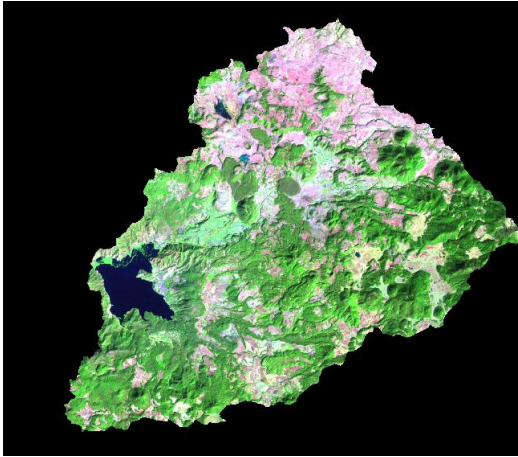


Figura 4.9. Composición *B* en 1986

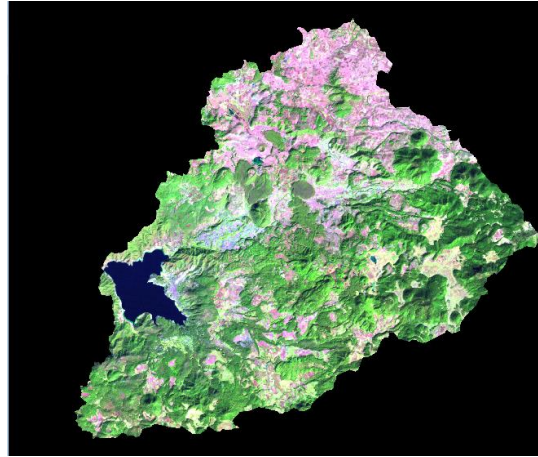


Figura 4.10. Composición *B* en 1989



Figura 4.11. Composición *B* en 1994



Figura 4.12. Composición *B* en 1999



Figura 4.13. Composición *B* en 2003



Figura 4.14. Composición *B* en 2008

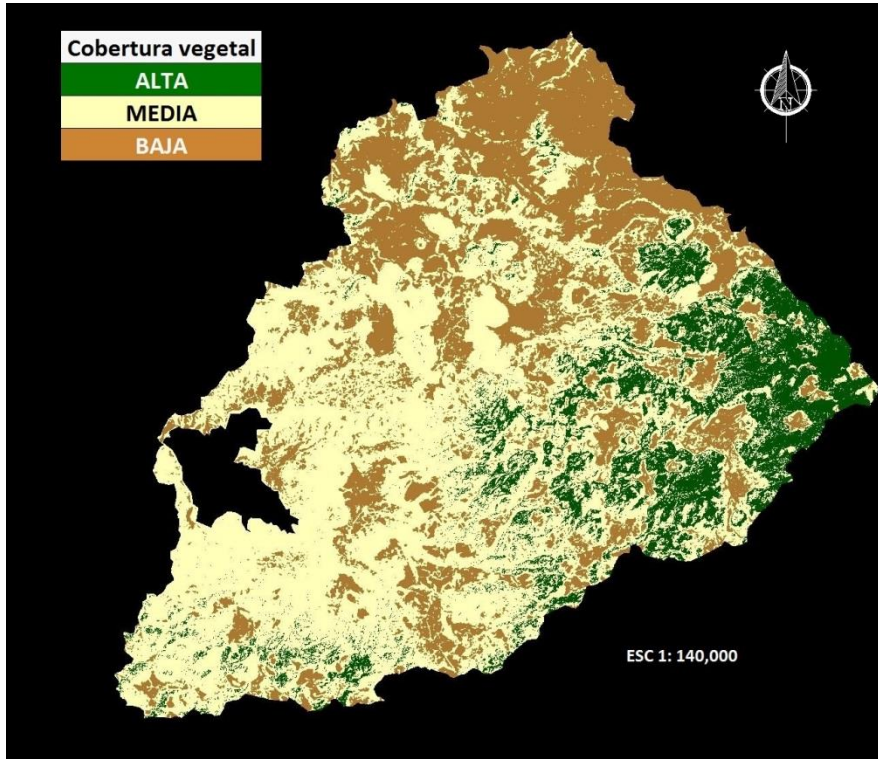


Figura 4.15. Cubierta vegetal en 1986

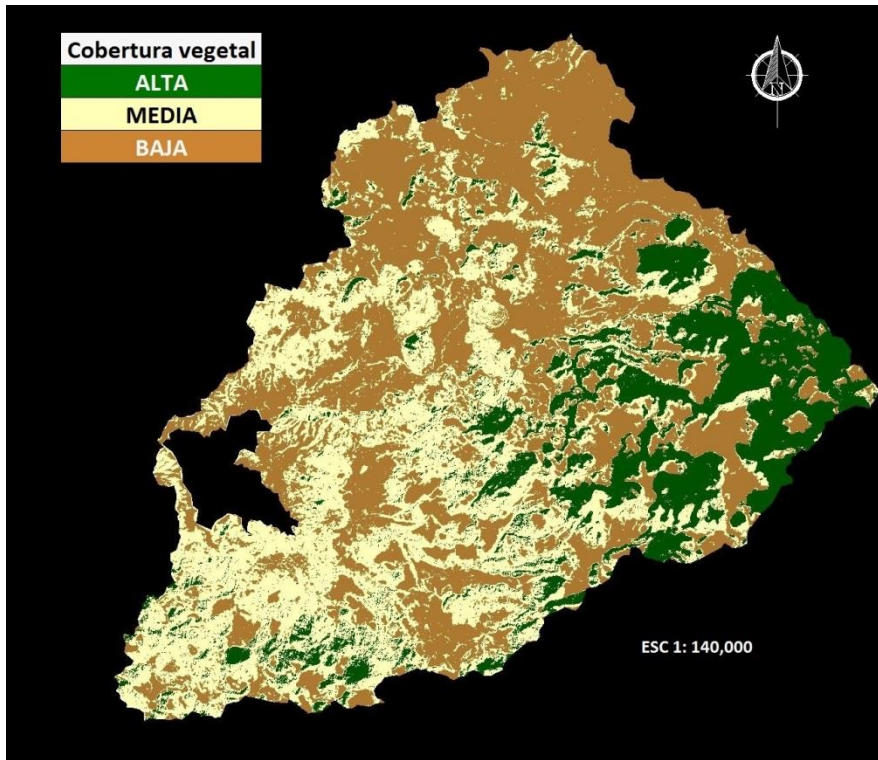


Figura 4.16. Cubierta vegetal en 1989

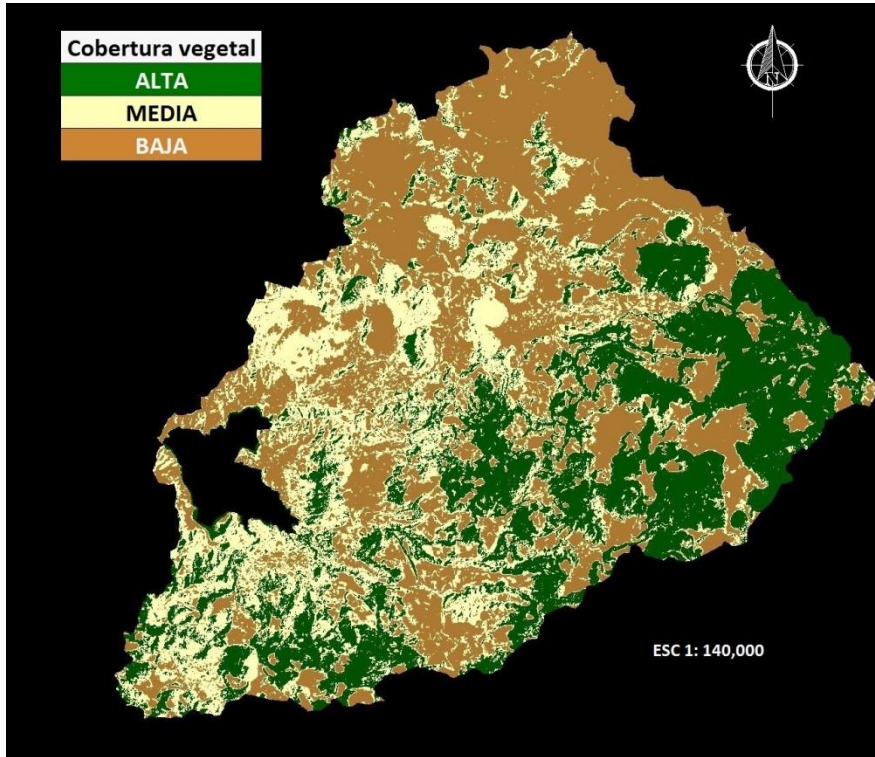


Figura 4.17. Cubierta vegetal en 1994

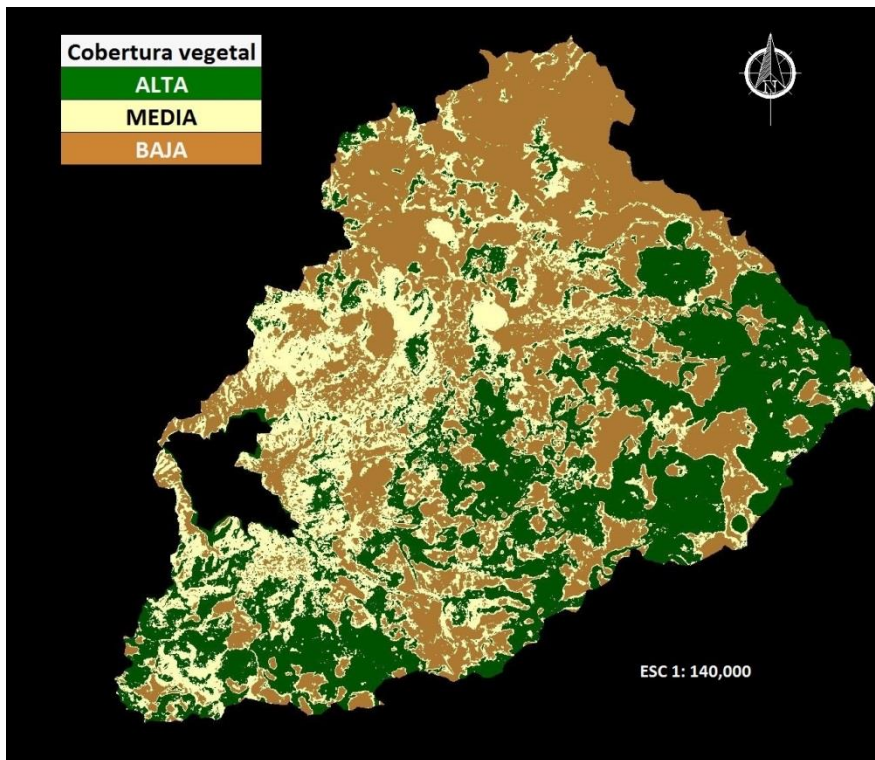


Figura 4.18. Cubierta vegetal en 1999

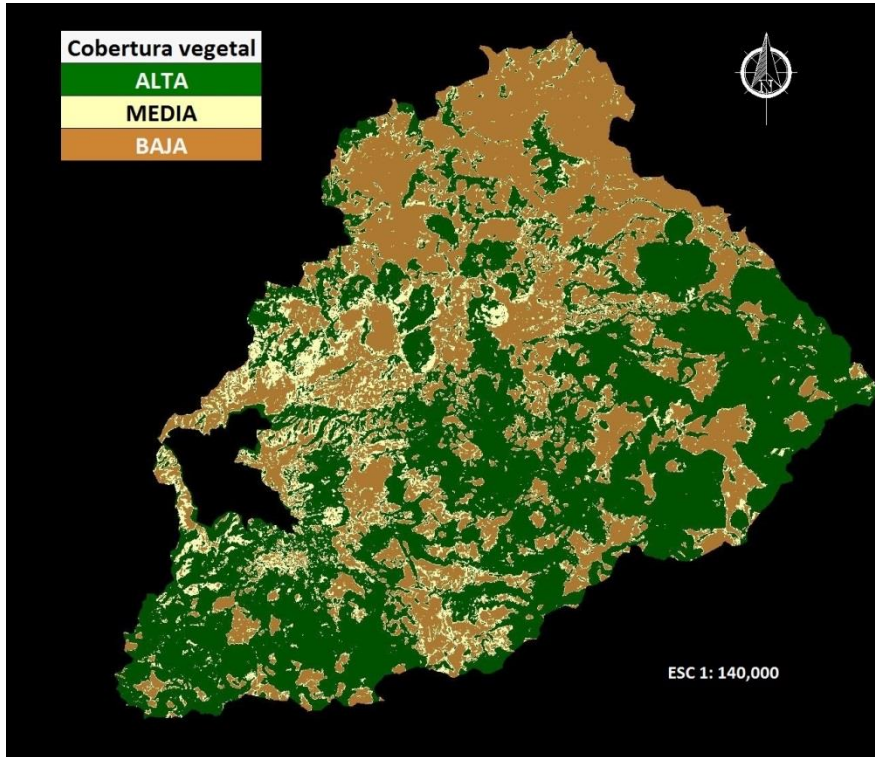


Figura 4.19. Cubierto vegetal en 2003

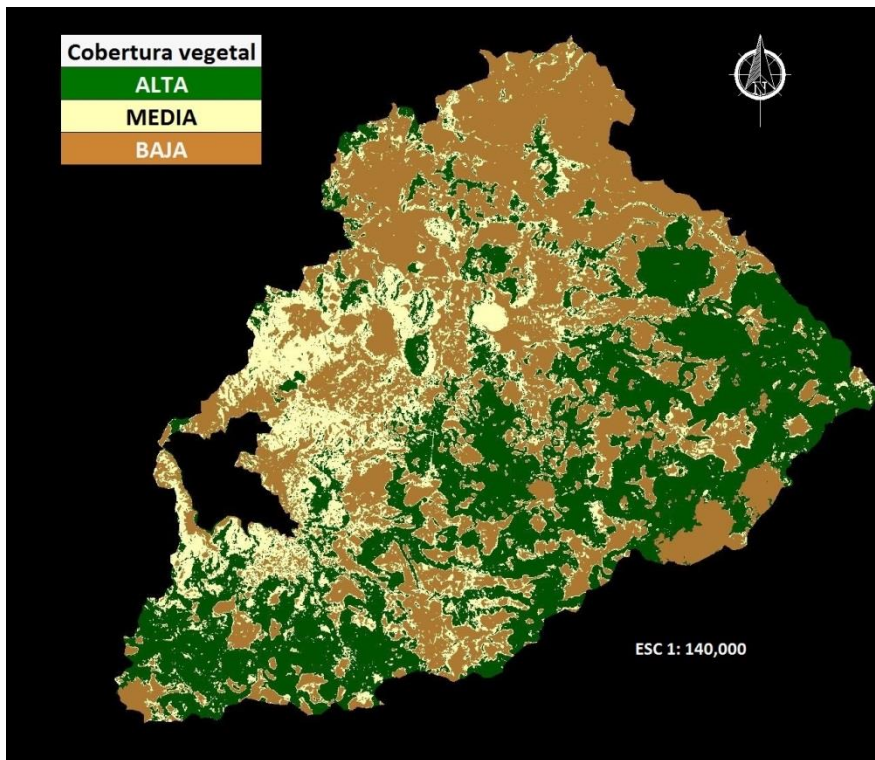


Figura 4.20. Cubierto vegetal en 2008

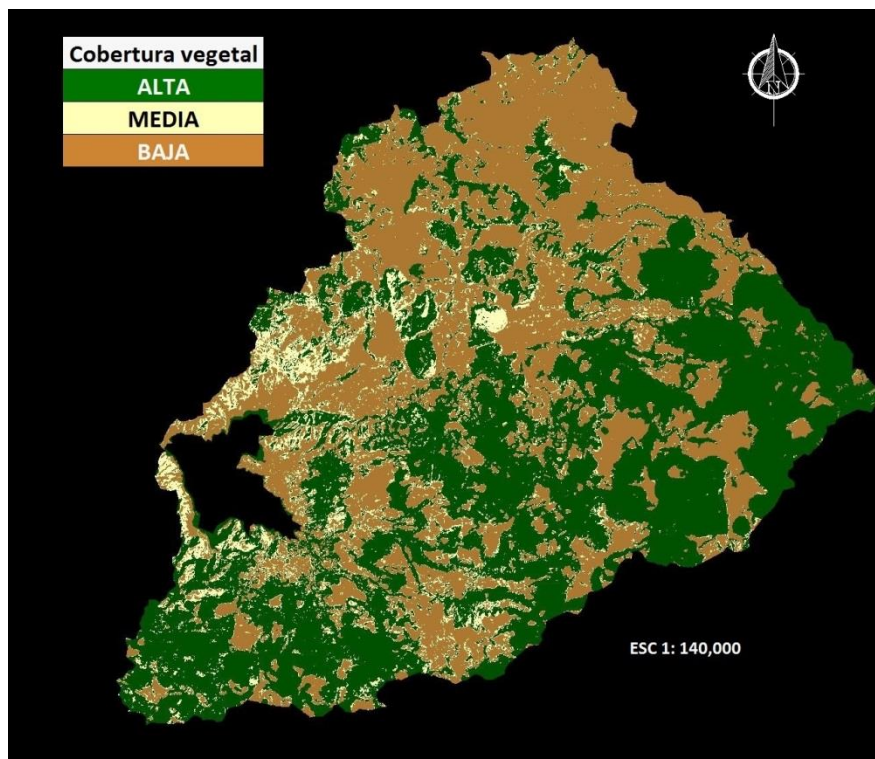


Figura 4.21. Cubierta vegetal en 2014

La Tabla 4.24 presenta un resumen de las superficies en cada periodo, y la variación entre periodos se presenta en la Tabla 4.25.

Fecha	Cobertura Vegetal					
	Alta		Media		Baja	
	Área (ha)	Porcentaje	Área (ha)	Porcentaje	Área (ha)	Porcentaje
25/01/1986	7,620.66	13.68%	31,404.78	56.38%	16,680.69	29.94%
12/27/1989	9,829.17	17.64%	20,629.98	37.03%	25,246.98	45.32%
02/03/1994	16,638.48	29.87%	16,259.31	29.19%	22,808.34	40.94%
03/04/1999	18,434.34	33.09%	15,208.38	27.30%	22,063.41	39.61%
17/02/2003	27,998.19	50.26%	7,369.29	13.23%	20,338.65	36.51%
29/05/2008	21,023.82	37.74%	11,643.84	20.90%	23,038.47	41.36%
11/02/2014	26,868.78	48.23%	5,446.35	9.78%	23,391.00	41.99%

Tabla 4.24. Resumen por periodos de las diferentes superficies y su cobertura vegetal

Intervalo de tiempo			Cobertura vegetal								
			Alta			Media			Baja		
#	del	Al	Situación	Porcentaje	Área (ha)	Situación	Porcentaje	Área (ha)	Situación	Porcentaje	Área (ha)
1	25/01/1986	12/27/1989	Aumento	28.98%	2,208.51	Reducción	34.31%	-10,774.80	Aumento	51.35%	8,566.29
2	12/27/1989	02/03/1994	Aumento	69.28%	6,809.31	Reducción	21.19%	-4,370.67	Reducción	9.66%	-2,438.64
3	02/03/1994	03/04/1999	Aumento	10.79%	1,795.86	Reducción	6.46%	-1,050.93	Reducción	3.27%	-744.93
4	03/04/1999	17/02/2003	Aumento	51.88%	9,563.85	Reducción	51.54%	-7,839.09	Reducción	7.82%	-1,724.76
5	17/02/2003	29/05/2008	Reducción	24.91%	-6,974.37	Aumento	58.00%	4,274.55	Aumento	13.27%	2,699.82
6	29/05/2008	11/02/2014	Aumento	27.80%	5,844.96	Reducción	53.23%	-6,197.49	Aumento	1.53%	352.53

Tabla 4.25. Variación en el tiempo de las superficies y su cobertura vegetal

Según los cálculos derivados del proceso, en la Tabla 4.25, la superficie con alta densidad de cobertura vegetal ha ido en aumento en todos los periodos excepto en el 5, donde presenta una reducción.

Naturalmente las superficies con media y baja cobertura vegetal se han reducido, pero según los datos, la superficie media es la que presenta una reducción más marcada.

Con la calculadora de *IDRISI Selva* se operan las matrices que presentan las figuras donde se aprecia la superficie vegetal (Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20 y Figura 4.21) como una división entre cada periodo. Los resultados y su interpretación se muestran en la Tabla 4.26. En ésta se aprecia que los colores fuertes (azul, morado y rojo) significan cambios negativos para la protección del suelo: en el periodo 5 (de 2003 a 2008), por ejemplo, más de 6 mil hectáreas pasan de ser zonas con alta densidad de vegetación a medianamente pobladas.

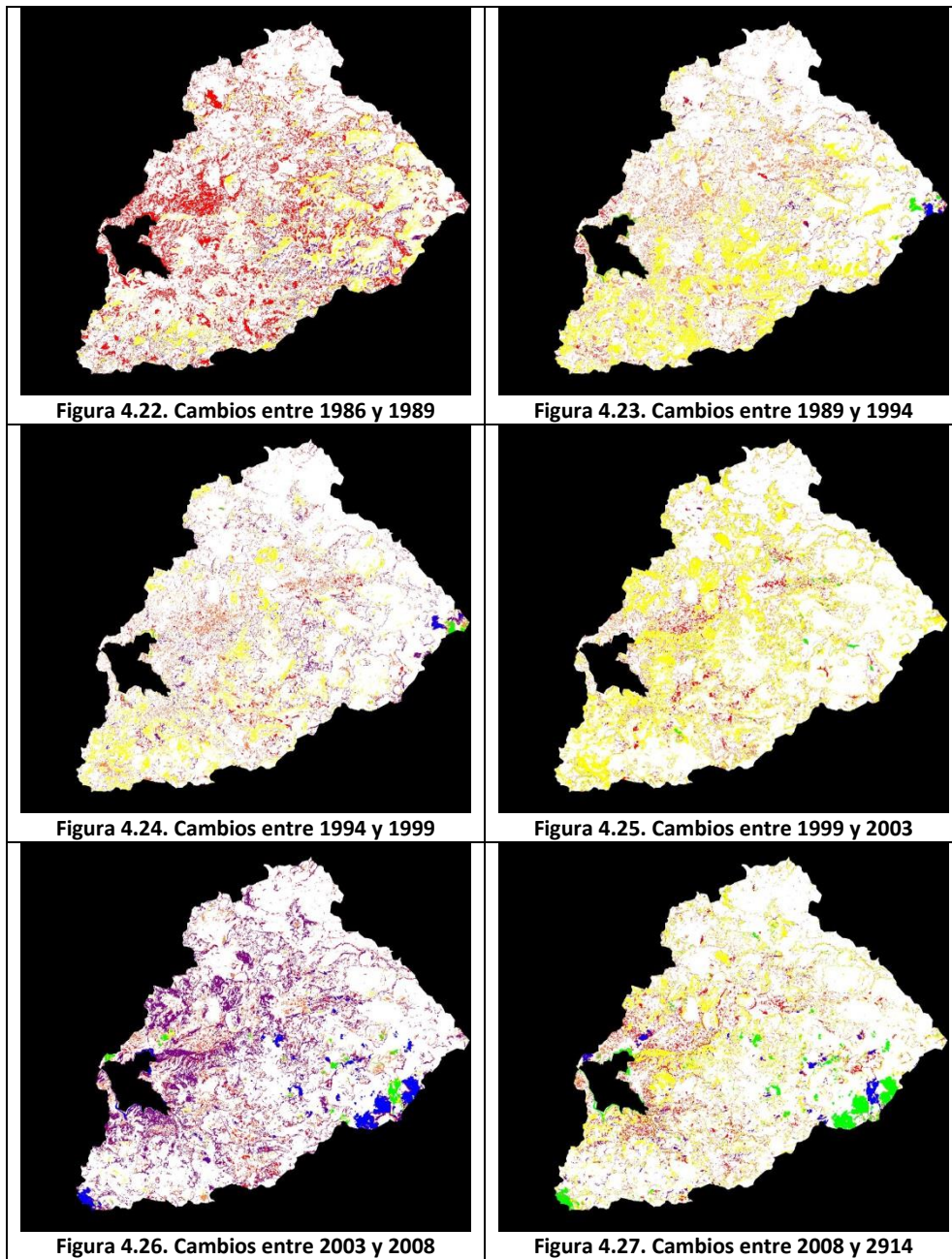
Por el contrario, los colores claros (naranja, amarillo y verde) indican cambios positivos, como entre 1999 y 2003 (periodo 4) en que más de 9 mil hectáreas pasan a ser zonas de mediana cobertura vegetal a alta.

Clasificación	Área modificada (ha)						
	Periodo						
	1	2	3	4	5	6	1 a 6
Alta a baja	16.47	99.09	71.37	6.66	1,609.20	420.48	36.09
Alta a media	1,306.35	588.15	1,611.18	64.89	6,077.52	498.87	25.65
Media a baja	8,688.60	1,129.59	1,352.88	1,257.57	2,664.00	2,485.44	7,676.55
Sin cambios	42,025.50	42,903.18	47,103.30	42,083.55	43,390.53	44,456.76	28,055.61
Baja a media	137.88	3,489.57	2,088.99	2,658.06	1,252.53	1,080.27	602.37
Media a alta	3,530.43	7,318.80	3,398.22	9,304.47	391.50	5,291.19	18,909.90
Baja a alta	0.90	177.75	80.19	330.93	320.85	1,473.12	399.96

Tabla 4.26. Condición de modificación en la cobertura vegetal por periodo

A estas nuevas imágenes se les aplica el comando 'Reclass' con base a la Tabla 4.26 para su análisis visual. En todas ellas (Figura 4.22, Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26 y Figura 4.27) se

puede apreciar que el color que impera es el blanco, lo que indica que son zonas en las que la condición de vegetación se mantiene constante.



El cambio en la totalidad del periodo de 27 años (del 1 al 6, reportado en la Tabla 4.26) se aprecia en la Figura 4.28. Una vez más el blanco es el protagonista de esta imagen, demostrando que en esas superficies no ha habido cambios. Sin embargo, lo que se aprecia de acuerdo al rojo y al amarillo es la desaparición de zonas de mediana vegetación, la mayor parte para convertirse en zonas de alta densidad.

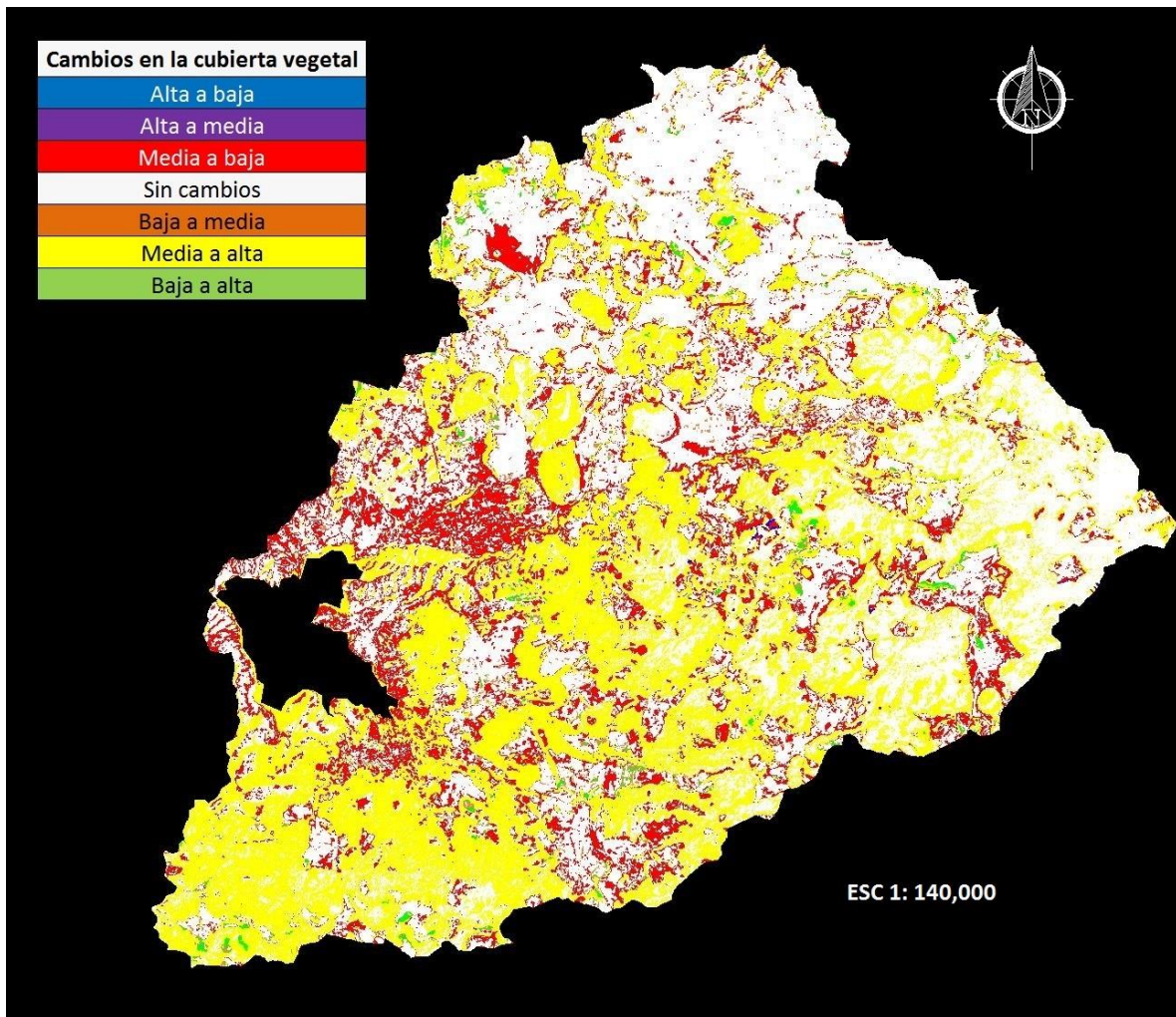


Figura 4.28. Cambio en la totalidad del periodo (1986 a 2014)

Estimación de la pérdida de suelo

La información de cubierta vegetal se correlaciona con la información de los subcapítulos 1.3.2 y 1.3.3, de donde se recuperan la Tabla 1.9 y la Tabla 1.10. Con ellas se presentan los coeficientes de cobertura vegetal que inciden sobre la pérdida en la cuenca.

Porcentaje de cobertura de árboles y sotobosque		Porcentaje de cobertura de la hojarasca		Factor C entre:	
100 -	75	100 -	90	0.0001	0.001

Debido a que podemos clasificar el área de alta densidad de vegetación como un 100 a 75 por ciento de árboles y sotobosque, y se considera una cobertura media de 90 por ciento de hojarasca (valores esperados en un bosque de coníferas), el valor de C oscilaría entre 0.0001 y 0.001. Se ocupa el promedio, es decir, 0.0005.

Cobertura aérea	% Cobertura aérea	Cubierta superficial en contacto con el terreno	
		% de suelo cubierto	
Tipo y altura		40	60
Árboles, pero sin apreciable cubierta arbustiva o de matorral. Altura media de caída de gotas de 4 metros	50	0.14	0.087

Para la superficie medianamente poblada, se sabe que se aproxima a un 50 por ciento de cobertura, con pocos árboles y matorrales. El valor oscila entre 0.14 y 0.087; se ocupa un promedio cercano a 0.1.

En la superficie que muestre baja o nula densidad de vegetación se reduce la pérdida solamente en un 90 por ciento. Los valores finales se muestran en la Tabla 4.27.

Factor C	
Cobertura vegetal	C
Alta	0.0005
Media	0.1000
Baja	0.9000

Tabla 4.27. Valores estimados de C

Con el valor de pérdida potencial calculado en el subcapítulo 3.1 ($134.82 \left(\text{Ton}/\text{ha año} \right)$), se asocia a los valores de cobertura vegetal de la Tabla 4.27, como en la Tabla 4.28, multiplicándose.

Erosión potencial en Valle de Bravo- Amanalco

$$134.82 \left(\text{Ton}/\text{ha año} \right)$$

Cobertura vegetal	Pérdida de suelo $\left(\text{Ton}/\text{ha año} \right)$
Alta	0.07
Media	13.48
Baja	121.34

Tabla 4.28. Pérdida de suelo por zonas de cobertura vegetal en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco

Éstos valores (Tabla 4.28) se pueden multiplicar por cada una de las áreas en cada uno de los periodos y sumarlos para obtener la pérdida de suelo total. Su interpretación sería la siguiente: de existir en la superficie de la cuenca una alta cobertura vegetal, se perderían 70 kilogramos de suelo anualmente; de existir un pastizal, es decir, mediana población vegetal, la pérdida sería poco más de 13 toneladas anuales; y si no existe cobertura vegetal, más de 121 toneladas de suelo serían arrastradas en la cuenca. El resultado se expone en la Tabla 4.29.

Fecha	Pérdida de suelo estimada (T)
25/01/1986	2,447,895.59
12/27/1989	3,342,188.19
02/03/1994	2,987,824.87
03/04/1999	2,883,389.78
17/02/2003	2,569,071.37
29/05/2008	2,953,818.50
11/02/2014	2,913,433.54
Promedio	2,871,088.84

Tabla 4.29. Pérdida de suelo estimada en cada periodo en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco

De la información de la Tabla 4.29 se puede considerar que en promedio se pierden anualmente poco más de 2 millones 871 mil toneladas de suelo por erosión hídrica, ya considerando los tres tipos de densidad vegetal.

Fecha	Volumen (m3)	Lámina de suelo (cm)
25/01/1986	1,631,930.39	0.29
12/27/1989	2,228,125.46	0.40
02/03/1994	1,991,883.25	0.36
03/04/1999	1,922,259.86	0.35
17/02/2003	1,712,714.25	0.31
29/05/2008	1,969,212.33	0.35
11/02/2014	1,942,289.03	0.35
Promedio	1,914,059.22	0.34

Tabla 4.30. Volumen y lámina de suelo perdida anualmente en la cuenca Valle de Bravo- Amanalco

Con el área de la cuenca (55 mil 706 hectáreas, sin considerar el vaso de la presa Valle de Bravo), recordando que una hectárea es igual a diez mil metros cuadrados y considerando un suelo de 1.5 toneladas por metro cúbico (valor promedio, y mayor en referencia al peso volumétrico del agua), se presenta la Tabla 4.30, en donde se aprecia que en promedio se pierde anualmente una lámina de suelo de 0.34 centímetros, es decir, de poco más de 3 milímetros y un volumen de más de un millón 900 mil metros cúbicos de material.

Tomando en cuenta los 27 años del estudio, se puede considerar que en acumulado se ha perdido una masa de suelo mayor de 77 millones 500 mil toneladas, que equivaldrían aproximadamente a un volumen de 51 millones 600 mil metros cúbicos de material, traducidos en una lámina de casi 10 centímetros de suelo.

Comparación con los datos de oficiales

Se presentó la Tabla 2.17, en la que se puede encontrar el uso de suelo en la cuenca en el año de 2004. Comparando el año más cercano que se analizó en éste capítulo (2003), se presenta la Tabla 4.31; aquí se puede apreciar que la diferencia promedio es cerca del 20 por ciento (15 por ciento en la zona clasificada como de alta densidad de vegetación, 33 en la media y 13 en la de baja

población vegetal). Se puede considerar que la diferencia no es muy grande, lo que daría certificado de que nuestro estudio tiene coherencia a lo que está pasando en la realidad.

Fecha	2003/2004				Diferencia
Cobertura vegetal	CONAGUA		IDRISI		
	Superficie (ha)	Porcentaje	Superficie (ha)	Porcentaje	
Alta	33,012.61	59.09%	27,998.19	50.26%	14.94%
Media	4,972.90	8.90%	7,369.29	13.23%	32.72%
Baja	17,682.91	31.65%	20,338.65	36.51%	13.31%

Tabla 4.31. Comparación con la información oficial

Otra forma de corroborarlo es el valor que reporta CONAGUA como el máximo suelo por hectárea anual en riesgo de pérdida, es decir, 200 o más toneladas (subcapítulo 2.2, Figura 2.10). El cálculo hecho en este trabajo arroja un valor de 134 toneladas por hectárea anual, lo que no significa mucha diferencia considerando la limitada información.

5. Conclusiones y recomendaciones

La pérdida de suelo es un proceso a través del cual el material es alterado por agentes naturales o antropogénicos y es removido y acarreado de su lugar de origen. Ocurre mayormente cuando ha sido desprovisto de su cubierta vegetal.

Un método para estimar su tasa de pérdida es la ecuación universal de pérdida de suelo (*USLE*), que necesita factores topográficos, edafológicos e hidrómetros.

De acuerdo a este trabajo, la pérdida de suelo se puede analizar con Percepción remota, sin embargo, directamente no se puede encontrar un valor de suelo removido; es necesaria la interrelación con otros factores o el análisis indirecto, como la cobertura vegetal.

Se recomienda, basado en este estudio, que la percepción remota se aplique complementando la información con vistas de campo, en las que se notifique la realidad de lo que se percibe a distancia, y un trabajo de reconocimiento de suelos y de factores hidrológicos y meteorológicos exhaustivo.

Además la información topográfica es crucial, mientras mayor sea el área, mayor es la diferencia en pendientes y longitudes de arrastre, lo que aumenta el error en el resultado.

Considerando esto, se concluye también que el método *USLE* debe aplicarse con sumo cuidado cuando se trata de superficies tan heterogéneas de materiales, climas, vegetación y topografía. Su aplicación original es al área agrícola, en la que los espacios analizados no superan a veces unas cuantas hectáreas, lo que no lo hace muy práctico cuando falta información en áreas muy grandes.

En cuanto al objetivo central de la tesis: según la información, en la cuenca Valle de Bravo-Amanalco se pierden en promedio más 2 millones 871 mil toneladas de suelo por efectos de erosión hídrica; en los 27 años que abarca este estudio significa un aproximado de más de 77 millones 500 mil toneladas.

Más de un millón 900 mil metros cúbicos de suelo se arrancan de su origen anualmente en la cuenca, lo que significa un acumulado de más de 51 millones 600 mil unidades metros volumétricos.

Debido a lo anterior, se reduce en 0.34 centímetros anuales la lámina exterior del suelo en promedio, que adicionados en 27 años suman casi 10 centímetros de pérdida en el perfil.

La variación entre los resultados en cada periodo respecto a la media es mínima, lo que significa un cambio gradual o muy estandarizado.

Estos datos están correlacionados con la modificación del uso de suelo que experimenta la cuenca. El cambio significa el aumento o disminución de las superficies calificadas como de alta densidad de vegetación, mediana y baja.

La información señala que la superficie con mediana densidad de vegetación, relacionada a zonas de pastizal, está desapareciendo. Significa una marcada diferencia entre los terrenos con alta densidad y los de baja: no existe una zona de transición.

La mayor parte del área que se contabilizaba como de mediana cobertura vegetal migró a la de alta densidad (en 27 años fueron más de 18 mil 900 hectáreas). Esto repercute en la pérdida de suelo, pero no significa una disminución de la misma, pues como se explicó en párrafos anteriores, la erosión y arrastre permanece constante, debido a que una buena parte de la superficie de la cuenca no migró hacia otro tipo de clasificación.

Además, las cifras oficiales de pérdida de suelo validan los resultados obtenidos cuando se compararon.

Probablemente lo que está ocurriendo en la cuenca es lo siguiente: las áreas que desde un principio fueron boscosas permanecen inalteradas debido a su difícil acceso por parte de la actividad agropecuaria, es decir, pendientes muy fuertes.

Como se explica en el subcapítulo 2.1.2, la silvicultura y otras actividades forestales no son considerables en el desarrollo económico, lo que puede significar que la tala (controlada e ilegal) no existe o es mínima.

Las superficies con baja densidad de vegetación, que se asocian a terrenos de uso agrícola, también permanecen constantes, lo que puede significar dos situaciones: los terrenos con denominación agrícola son aún productivos y por tanto se siguen aprovechando, o en contraparte, se encuentran tan erosionados que ya no tienen nutrientes y sólo crecen algunos arbustos y pastos estresados, sin la capacidad de sostener un ecosistema más complejo como un bosque.

La teoría de la continuidad agrícola no se considera la mejor respuesta, debido a que, tomando como referencia el subcapítulo 2.1.2, existe un abandono del campo por el auge económico de las actividades terciarias y cuaternarias, particularmente el turismo.

Esto también podría explicar el aparente repoblamiento del bosque en la región: no sólo se deja el campo o el pastizal para su regeneración, sino que además se fomenta la migración a formas verdes que incrementan el valor agregado de una zona turística como se ha establecido en el mismo capítulo sobre la región.

La afectación de la pérdida de suelo en la cuenca es diversa. Primero, se sabe de un volumen anual de millones de toneladas de suelo en movimiento. Algunas zonas de la cuenca probablemente ya se encuentren en proceso de desertificación (las que no se modifican de baja densidad de población vegetal).

En estas unidades de superficie ya no sería posible la realización de actividades agropecuarias, lo que significa pérdida de ingresos, de empleos y el desmantelamiento del aparato económico, social y político. Esto también involucra a los recursos forestales.

Este tipo de problemas deriva en la falta de agua. Valle de Bravo- Amanalco depende fuertemente de su abundancia hídrica; no sólo abastece a su población, también dota al Sistema Cutzamala y con ello a la ciudad de México y Toluca. Si el agua faltara en la cuenca, un efecto de la pérdida de suelo y forestal, millones de personas se verían afectadas por la carencia del recurso.

Además, por la carga de sedimentos que seguramente llevarán los caudales y cuerpos de agua, el proceso de tratamiento para consumo humano se incrementaría. También la cantidad de pesticidas y agroquímicos disueltos sería mayor. Así se elevaría el precio por litro de agua.

Los sedimentos representan un problema cuando se trata de azolves. La presa Valle de Bravo modificaría sus niveles de trabajo y con ello reduciría su eficiencia y vida útil. Buena parte de su integración al Sistema Cutzamala reside en este punto: en el pasado, el embalse se azolvó hasta sobre pasar el NAMINO, por ello cambió de presa hidroeléctrica a almacenamiento y se construyó una nueva obra de toma.

Si al agua ya no le es posible infiltrarse seguirá su camino sobre la superficie, lo que significa que los cauces de ríos y el propio vaso de la presa Valle de Bravo podrían estar escasos de capacidad volumétrica, esto se traduce a inundaciones en la región y cuencas aguas abajo, sumando el riesgo de falla en las estructuras de control hidráulico.

Estas cuencas también se ven afectadas en el momento en que la carga necesaria de sedimentos que originalmente les puede llegar aumenta (que no es el caso por el depósito en Valle de Bravo) o disminuye. Sus ecosistemas pierden nutrientes naturales acarreados por los ríos y experimentan alteraciones climáticas.

Recordando que la cuenca pertenece a la Región Hidrológica del río Balsas, la alteración de los procesos naturales, derivada de la pérdida de suelo, repercute en otras regiones, acabando con el débil equilibrio de ecosistemas, economía y sociedad en el que actualmente se desarrollan.

Aquí es donde entra la Ingeniería civil: el hidráulico será el responsable de analizar los caudales que registre el agua en la cuenca para diseñar obras de aprovechamiento y control; serán el ambientalista y el sanitario quienes hagan potable al agua para su consumo; el ingeniero de suelos determinará la seguridad de una obra geotécnica que se encuentra influenciada por la carga de suelos y la fluctuación subterránea del agua.

Con los cambios ambientales derivados de la pérdida de suelo, la producción también cambiará y modificará a la sociedad, a su cultura, a su gobierno y a su economía. Serán los estructuristas, constructores y los ingenieros de planeación y sistemas los motores de la infraestructura, detonadores de ese cambio en la producción.

Como transformadores de la naturaleza para el bien y la comodidad de la sociedad, los ingenieros civiles tienen la obligación de proteger al medio ambiente. Deben reconocer cuando un proyecto o una obra tendrán afectaciones, en este caso al suelo, y proponer las medidas para mitigarlo. Los proyectos de ingeniería deben ser sustentables.

En la cuenca Valle de Bravo- Amanalco, como en muchas otras regiones, incluso con problemas más severos de pérdida de suelo, la soluciones son varias. La que es teóricamente más sencilla, pero está condicionada por diversos factores antropogénicos, es la reforestación.

Sin embargo, la agricultura responsable, el fomento de actividades primarias sustentables y la tecnificación de la ganadería representan buenas opciones.

Para las superficies ya deterioradas y desertificadas existen tratamientos diversos para su rehabilitación: inyección de fertilizantes naturales, riego responsable, obras de contención de sedimentos, etc.

En los cauces se puede poner en práctica las trampas de sedimentos, que son obras hidráulicas en las que se cambia de régimen supercrítico a subcrítico y con ello se abaten las velocidades de arrastre, decantando los sedimentos. El desazolve también contribuye a la rehabilitación de cuerpos de agua, y el material recuperado puede ser reutilizado para el enriquecimiento de suelos en situación extrema.

La pérdida de suelos no ha tenido el escándalo de otros problemas ambientales debido a que sus efectos comienzan a sentirse paulatinamente, son muy lentos o imperceptibles y se suelen relacionar con otros fenómenos naturales. Si los síntomas y malestares de la pérdida de suelo fueran contundentes e inmediatos crearían la incipiente conciencia que otros ya tienen: Nadie duda que el agua en su carácter de bien escaso, inaccesible y fuente de contaminación para la salud humana está en riesgo ambiental (además de sus violentos cambios meteorológicos); o de la existencia de la contaminación del aire, de los sismos, incendios forestales y el cambio climático. El problema del suelo es real, es familiar de los sucesos naturales ya citados, participa de ellos y está ocurriendo en este momento.

Bibliografía

- Aparicio M., F. J. (2001). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Limusa.
- Batchelor, G. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press.
- Cambell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing, 5th Edition*. USA: The Guilford Press.
- Canada Centre of Remote Sensing. (2009). *Foundamentals of Remote Sensing. Remote Sensing Tutorial*. Canada: Natural Resources of Canada.
- Comisión Nacional del Agua (A). (2010). *Estadísticas del Agua en la Cuenca del Río Balsas 2010*. Recuperado el Diciembre de 2013, de Organismo de Cuenca Balsas: www.conagua.gob.mx
- Comisión Nacional del Agua (B). (2010). *Bancos del Agua en México*. México.
- Comisión Nacional del Agua (C). (1994). *Sistema Cutzamala: Agua potable para millones de mexicanos*. México.
- Consejo Consultivo del Agua, A. C. (2013). *Agua en el mundo*. Recuperado el 15 de 3 de 2014, de <http://www.aguas.org.mx/sitio/02a4.html>
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México: Limusa.
- De Jong, S. M., & Van der Mier, F. D. (2005). *Remote Sensing Images Analysis: Including the spatial domain*. USA: Springer Science and Bussines Media.
- Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica. (2008). *Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México*. Tlalnepantla de Baz: Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Estado de México.
- Estados Unidos Mexicanos. (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Medio Ambiente*.
- FAO: Informe sobre recursos mundiales del suelo. (2007). *Base referencial mundial del recurso suelo*. Roma.
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A. (2004). *¿Qué es el ciclo del agua?* Obtenido de <http://www.agua.org.mx>
- Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. (2006). *Plan para la Gestión Integral del Agua y Recursos Asociados de la Cuenca de Valle de Bravo, Estado de México*. México: CONAGUA.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Cuéntame INEGI*. Recuperado el 15 de 3 de 14, de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2012). *Dirección General de Geografía y Medio Ambiente*. Recuperado el 3 de 04 de 2014, de www.inegi.org.mx/geo/.../aspectos_tecnicos_de_imagenes_landsat.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s.f.). *Simulador de Flujo en Cuencas Hidrográficas (SIATL)*. Recuperado el Noviembre de 2013, de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#
- Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Mazatlán (JUMAPAM). (2013). *Distribución del agua en el planeta*. Recuperado el 15 de 3 de 2014, de <http://jumapam.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta/>
- Lian, S. (2008). *Advances in land remote sensing. System, modeling, inversión and application*. USA: Springer Science and Bussines Media.
- Lindsay, R. K., Kholer, M. A., & Paulhus, J. (1988). *Hidrología para Ingenieros (2a edición en español)*. México: Mc Graw Hill.
- López- Morales, C. A. (2012). *Refutaciones y Artificios*. Recuperado el Diciembre de 2013, de <http://refutacionesyartificios.blogspot.mx/2012/01/el-sistema-cutzamala-y-los-sapos.html>
- Mancillar E., G. A. (2008). *Uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en el Campo Forestal*. Santiago de Chile: Departamento de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile.
- Martínez Ménez, M. (2005). *Estimación de la Erosión del Suelo*. Recuperado el 2014, de www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/.../Lists/.../04estim-eros-sue.pdf
- Meliá, J., & Gandía, S. (1991). *La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos naturales: Agricultura*. Valencia: Universidad de Valencia, España.
- Nebel, B. J., & Wrigth, R. T. (1999). *Ciencias ambientales: Economía y desarrollo sostenible (6a Edición en español)*. Pearson Education.
- Organismo de Cuenca Balsas (CONAGUA). (2010). *Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas, 2010*. México.
- Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA. (s.f.). *Organismo de Cuenca Balsas*. Recuperado el 14 de 11 de 13, de <http://www.conagua.gob.mx>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (12 de 03 de 2013). *No hay crisis mundial de agua, pero muchos países en vías de desarrollo tendrán que hacer*

- frente a la escasez de recursos hídricos*. Recuperado el 15 de 3 de 14, de <http://www.fao.org/spanish/newsroom/news/2003/15254-es.html>
- Organización Meteorológica Mundial (WMO). (s.f.). *Organización Meteorológica Mundial (WMO)*. Recuperado el 2014, de http://www.wmo.int/pages/index_es.html
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2004). *Informe Geo México 2004*. México.
- Sanderson, R. (2010). *Introduction to Remote Sensing*. USA: New Mexico Space Grant Consortium.
- Secretaría de Gobernación (SEGOB). (s.f.). *Enciclopedia de los Municipios de México*. Recuperado el Noviembre de 2013, de http://www.e-local.gob.mx/wb/ELOCAL/EMM_mexico
- Sierra López, N., & et al. (2012). Desarrollo regional, electrificación y reorganización socioespacial en Valle de Bravo, México. *Pueblos y fronteras digital*, 243- 269.
- Software Shop. (2010). *Software Shop*. Recuperado el 04 de 04 de 2014, de http://www.software-shop.com/in.php?mod=ver_producto&prdID=149
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de Canales*. México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Universidad Austral de Chile. (2000). *Guía de conservación de aguas, Programa de Programa de Producción Forestal y Medio Ambiente*. Recuperado el 15 de 3 de 14, de http://www.uach.cl/proforma/insitu/2_insitu.pdf
- Victoria, J. J. (1999). *Sedimentos Fluviales: Riesgo para obras de infraestructuras*. Guatemala.