

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**GUÍA DE ELABORACIÓN DE PROYECTOS DE RESTAURACIÓN
FORESTAL PARA COMPENSACIÓN AMBIENTAL POR CAMBIO
DE USO DEL SUELO EN TERRENOS FORESTALES**

JACINTO SAMUEL GARCÍA CARREÓN

T E S I S A

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA TECNOLÓGICA

EN CONSERVACIÓN Y MANEJO SUSTENTABLE DE BOSQUES

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Jacinto Samuel García Carreón, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Tangaxuhan Llanderal Ocampo, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Guía de elaboración de proyectos de restauración Forestal para compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 27 de MAYO de 2019

Firma del
Alumno (a)

M.C. Tangaxuhan Llanderal Ocampo
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesina, titulada: Guía de elaboración de proyectos de restauración forestal para compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales, realizada por el alumno: Jacinto Samuel García Carreón, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:


MAESTRÍA TECNOLÓGICA
CONSERVACIÓN Y MANEJO SUSTENTABLE DE BOSQUES

CONSEJO PARTICULAR


CONSEJERO


M.C. TANGAXÚHAN LLANDERAL OCAMPO

ASESOR


DR. ARNULFO ALDRETE

ASESOR


DR. ALEJANDRO VELÁZQUEZ MARTÍNEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, mayo de 2019

“GUÍA DE ELABORACIÓN DE PROYECTOS DE RESTAURACIÓN FORESTAL PARA COMPENSACIÓN AMBIENTAL POR CAMBIO DE USO DEL SUELO EN TERRENOS FORESTALES”

Jacinto Samuel García Carreón, M. T.

Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

El esquema de compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales, mediante proyectos de restauración forestal, que se realiza en México a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), es uno de los más completos que se realizan en el mundo; no obstante, los proyectos ejecutivos de restauración forestal que se presentan a la CONAFOR para obtener financiamiento, carecen de los datos indispensables y calidad suficiente para que el evaluador tenga la certeza de que el proyecto resultará exitoso.

La presente guía proporciona una secuencia de tópicos que se requiere cubrir para la elaboración de un proyecto de restauración forestal y aborda los puntos clave que se deben considerar para el cálculo de las acciones específicas de restauración forestal, asimismo, proporciona algunos elementos de cálculo y ejemplifica situaciones que permiten tomar decisiones sobre qué técnicas y tiempos son más adecuados para la implementación de las actividades de restauración forestal.

Palabras Clave:

Compensación ambiental, restauración forestal, CONAFOR.

HANDBOOK OF FOREST RESTORATION PROJECTS FOR ENVIRONMENTAL COMPENSATION BY LAND USE CHANGE IN FOREST LANDS

Jacinto Samuel García Carreón, M. T.

Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

The scheme of environmental compensation for land use change in forest land through forest restoration projects carried out in Mexico by the National Forest Commission (CONAFOR) is one of the most comprehensive that occur in the world; However, the executive projects for forest restoration that are presented to CONAFOR to obtain funding for project implementation, lack of essential data and sufficient quality so that the evaluator have the certainty that the project will be successful.

This handbook provides a sequence of topics that is necessary to include in the elaboration of a forest restoration project by addressing the key points that have to be considered for the determination of the specific actions for forest restoration. At the same time, it provides some elements and recommendations to improve the decision-making process about the most appropriate techniques and times in order to implement forest restoration activities.

Keywords: Environmental compensation, forest restoration, CONAFOR.

DEDICATORIA

A mi esposa Carmen Moctezuma por ser el pilar de la familia que estamos construyendo juntos, que ha atendido y educado a nuestro hijo en mis múltiples ausencias laborales y se ha encargado de todas las obligaciones familiares durante el estudio de mi maestría y la elaboración de la presente tesina.

A mi hijo Amílcar Samuel, quien con sus inquisitivas preguntas me motiva a superarme siempre y que con sus juegos, cariños y abrazos me enseña que hay que vivir cada día aportando algo a los demás.

A la memoria de mis padres, Jacinto García San Gabriel, que trabajó incansablemente por que sus hijos estudiaran más que él y que lo consiguió con todos ellos, y que yo deseo algún día alcanzar la bondad y sapiencia que me demostró siempre y a Eduvina Carreón Moctezuma, que siempre estuvo al cuidado de todos nosotros y resistió como una gran higuera todos los problemas de nuestra familia y siempre estuvo pendiente de todos nosotros.

A la Memoria del Ingeniero Ramón Cardoza Vázquez, forestal que se convirtió en suelero y pionero de los estudios de vegetación, capacidad de uso y topografía de los organismos que dieron origen al INEGI y quien promovió y logró que se empezaran a realizar acciones de restauración y conservación de suelos en los terrenos forestales.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), que me ha permitido desarrollarme profesionalmente, estudiar la maestría tecnológica y diseñar y aplicar varios documentos e instrumentos de política pública para la restauración forestal.

A mis jefes, los Ingenieros Jesús Carrasco Gómez, Alfredo Arciniega Mendoza y Ramón Cardoza Vázquez (†), que me permitieron dedicar parte de mi tiempo a realizar la maestría a pesar de la gran carga laboral por realizar.

Al Colegio de Postgraduados (COLPOS) por brindarme la oportunidad de estudiar una maestría tecnológica.

Al Maestro en Ciencias Tangaxuhan Llanderal Ocampo y a los doctores Arnulfo Aldrete y Alejandro Velázquez Martínez, por transmitirme sus conocimientos y su invaluable apoyo en la corrección de la presente tesina.

Mis amigos y cómplices en la implementación de lineamientos, proyectos, obras y diversas acciones, que han permitido probar y consolidar diversas acciones de restauración forestal, entre ellos: Gloria López, Noé Rosas, Alejandra Rodríguez, Nehibé Bolaños, Maru Ladrón de Guevara, Jorge Nieves, David Tejeda, Joel Matus, Alejandro Guerrero, Fermín Mercado, Mario Ruiz, Jesús David Gómez, Moisés Matías, Blas Avitia, Flavio Moreno, Rogelio Upalia, Leonardo Valenzuela, Fermín Flores, Gabriela Duarte, Karla Arvizu, Tere Flores, Toño Pérez, Pedro Castro, Víctor Mendoza, Lorena Amador, Edgar Marmolejo, Rosalino Méndez, Doriel Tepach, Héctor Mota, Pancho Nava, Trini Guízar, Edgar Velarde, Francisco Cázares, Sergio Cuevas, Juan Carlos Ruiz, Gustavo Gómez Pinacho, Pedro Hernández, Francisco Rocha, Jerónimo Pérez, Omar Salinas, Omar Teodoro, Héctor Barlandas, Evertina Álvarez, Adelaida Bello, Juan García, Marisela Moreno, Brenda Peñaloza, Magdalena Castro, Maribel Villarroel, Gilda Carballo, Rogelio Guerra, Rubén Aguilar, Geovanni Villanueva, Santana Morales, Gerardo

Calderón, Edgar Rodríguez, Adelaida Jarillo, Eduardo Vargas, Miriam Pérez, Jesús Piza, Alejandro Nery, Guadalupe López, Mayra Martínez, Nayeli Hernández, Asucena Estrada, Omar Garza, Francisco Ramírez, Hilary Escobar, Pancho Cruz, Gabriel Rodríguez, Francisco Ibáñez, Juan Ramón Quintana, Noel Chávez, Oscar Estrada, Ramón Silva, Gabriel Rodríguez, Marco Barbosa, Rufino Benítez, Fernando Salazar, Javier Navar, Claudia Agraz, Rubén Bautista, Socorro Estrada, Julia Villarreal, Everardo Rivera, Felipe Lupercio, Rosana Núñez, Francisco Briones, Juan Carlos Velázquez, Refugio Álvarez, Mayra Valdez, Cinthya Velarde, Luis Aceves, Taurino García, Fermín Silva, Juan Manuel Díaz, Pablo Viegas, Matías Bosio, Rosa Cuevas, Rafael Flores, Laura Corso, Vanina Pietragalla, Milton Moran, Oscar Paniagua y todos aquellos compañeros de CONAFOR, Prestadores de Servicios Profesionales y Asesores que han ayudado a consolidar el programa de compensación ambiental.

A mis compañeros de la Maestría Tecnológica que con su gran sapiencia y experiencia enriquecieron de sobremanera las discusiones y charlas profesionales que sostuvimos.

A todos aquellos que me han ayudado a ser un poco menos ignorante a lo largo de mi vida.

Gracias

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE CUADROS	xvi
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVO	4
MARCO DE REFERENCIA	5
Antecedentes de la compensación ambiental en el mundo	5
El esquema de compensación ambiental por cambio de uso del suelo en México.....	7
Restauración ecológica y restauración forestal.....	10
La restauración forestal realizada en la CONAFOR como medida de compensación ambiental	11
METODOLOGÍA	12
RESULTADOS	13
I. Propuesta de contenido de un Proyecto Ejecutivo de Restauración Forestal (Propuesta teórica)	14
1. Datos generales del Proyecto	14
1.1. Nombre del proyecto	14
1.2. Nombre del titular del proyecto	14
1.3. Datos del responsable técnico del proyecto	14
1.4. Área que se restaurará y costos de la restauración.....	15

1.5.	Resumen del proyecto	15
1.6.	Objetivos.....	15
1.7.	Metas.....	15
1.8.	Antecedentes del proyecto o experiencias de proyectos anteriores .	16
2.	Caracterización físico-biológica del sitio.....	17
2.1.	Identificación del sitio donde se implementará el proyecto	17
2.2.	Localización del sitio.....	17
2.3.	Plano del predio a restaurar	18
2.4.	Características fisiográficas y edafológicas del predio	19
2.5.	Morfometría de la superficie	22
2.6.	Descripción del suelo del área o del terreno donde se realizará la restauración.....	24
2.7.	Descripción del clima donde se localiza el proyecto.....	34
2.8.	Intensidad de la lluvia	41
2.9.	Temperatura	42
2.10.	Descripción de la Vegetación	42
2.11.	Descripción de la degradación del terreno existente en el sitio a restaurar	48
2.12.	Degradación del suelo.....	49
2.13.	Levantamiento de la cobertura de dosel y cobertura del suelo	53
2.14.	Ruta de restauración del predio	56
3.	Propuesta de Restauración Forestal.....	59
3.1.	Protección del área que se va a restaurar	59

3.2. Obras para el control de la erosión, captación de agua de lluvia o mejoramiento de las condiciones del suelo	61
3.3. Reforestación.....	66
3.4. Mantenimiento	69
3.5. Monitoreo de la restauración	69
3.6. Asesoría técnica	71
3.7. Calendario de ejecución de actividades	72
3.8. Presupuesto	72

II. Restableciendo el Pino Piñonero en la Antigua Región Minera de Zacatecas: Proyecto de Compensación Ambiental por Cambio de Uso del Suelo en Terrenos Forestales (Ejemplo práctico)..... 75

1. Datos Generales del Proyecto	75
1.1. Nombre del Proyecto	75
1.2. Responsable Técnico del Proyecto	75
1.3. Alcance de la restauración	76
1.4. Resumen del proyecto.....	77
1.5. Objetivo general.....	77
1.6. Metas.....	77
1.7. Antecedentes de proyectos anteriores	78
2. Caracterización físico-biológica del sitio.....	79
2.1. Localización	79
2.2. Plano del área que se pretende restaurar	80
2.3. Fisiografía.....	81
2.4. Paisaje.....	81

2.5.	Forma del terreno	81
2.6.	Micro rasgos	81
2.7.	Uso del Suelo	82
2.8.	Suelo	82
2.9.	Profundidad del suelo	82
2.10.	Pedregosidad en el perfil.....	83
2.11.	Estructura	83
2.12.	Textura	83
2.13.	Drenaje interno.....	84
2.14.	Clima del área del proyecto.....	85
2.15.	Intensidad de la lluvia	88
2.16.	Vegetación en el sitio	91
2.17.	Degradación del suelo.....	93
3.	Propuesta de restauración	96
3.1.	Protección del área de restauración	96
3.2.	Obras de conservación y restauración de suelos	96
3.3.	Reforestación.....	101
3.4.	Producción de planta para reforestación	102
3.5.	Mantenimiento	103
3.6.	Producción de planta para reposición.....	104
3.7.	Monitoreo de la restauración	105
3.8.	Asesoría técnica	107
3.9.	Calendario de actividades	108

3.10. Presupuesto	110
3.11. Impacto del proyecto	111
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	112
RECOMENDACIONES	113
LITERATURA CITADA	114

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.- Ejemplo de plano, donde se señalan las actividades de restauración a realizarse	18
Figura 2.- Denominación de las partes del relieve	20
Figura 3.- Pavimentos de erosión (tepetate) y canalillos	21
Figura 4. Ejemplo de uso de suelo: extracción de suelo forestal, vendido como tierra de monte	22
Figura 5.- Formas de la pendiente	24
Figura 6.- Pedregosidad en el perfil del suelo	28
Figura 7.- Procedimiento para la determinación de la textura al tacto	30
Figura 8.- Calculador de propiedades hidráulicas del suelo a partir de la textura del mismo	31
Figura 9.- Ejemplo del calculador de propiedades hidráulicas a partir de datos de % de arena y arcilla	32
Figura 10.- Representación gráfica del climograma para Cárdenas, Tabasco	38
Figura 11.- Representación gráfica del climograma para Cárdenas, Tabasco, donde se nota la presencia de sequía intraestival en 2014	39
Figura 12.- Representación gráfica del climograma para Arriaga, Chis.	41
Figura 13. Bosque de pino incendiado invadido por manzanilla (<i>Arctostaphylos pungens</i>).	49
Figura 14.- Clasificación de la degradación por el sistema ASSOD	52
Figura 15.- Erosión en plantaciones de teca	54
Figura 16.- Uso del densitómetro para medición de cobertura del piso y de dosel	55
Figura 17.- Ejemplo de rutas de estados y transiciones para un sitio de Texas, USA	57
Figura 18.- Ejemplo de rutas de estados y transiciones para un sitio de Texas, USA, con fotografías de la vegetación	58
Figura 19.- Separadores de alambres de púas en el cercado	61

Figura 20. Representación de los tipos de degradación del suelo	63
Figura 21.- Propuesta de obras de restauración de acuerdo a la degradación del terreno	65
Figura 22.- Croquis de localización del proyecto de restauración forestal del Ejido Pánuco	79
Figura 23.- Plano del polígono del Ejido Pánuco, con relieve en curvas de nivel	80
Figura 24.- Parámetros hidrológicos de acuerdo a la textura al tacto determinada en el predio del Ejido Pánuco	84
Figura 25.- Balance hídrico de acuerdo al método de Thornthwaite, para la estación de San Antonio del Ciprés	87
Figura 26.- Balance hídrico de acuerdo al método de Thornthwaite, para la estación de San Antonio del Ciprés, para los años 2010-2014	88
Figura 27- Vegetación del predio a restaurarse de acuerdo al INEGI	92
Figura 28.- Vegetación real existente en el predio	93
Figura 29.- Vistas del sitio de control del monitoreo	106

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1.- Atributos de los esquemas de compensación ambiental en el mundo	5
Cuadro 2.- Clases de drenaje del suelo	34
Cuadro 3.- Cálculo del clima de acuerdo a Thornthwaite para la estación de Cárdenas, Tabasco	37
Cuadro 4.- Cálculo del Índice de Simpson para un sitio del Ejido La Luz, Durango, Dgo.	45
Cuadro 5.- Cálculo del Índice de Simpson para un sitio del Ejido Rodríguez Puebla, Durango, Dgo.	46
Cuadro 6.- Comparación entre el sitio de referencia y el sitio a restaurar	47
Cuadro 7.- Formato para levantamiento simple de cárcavas	53
Cuadro 8.- Formato de presupuesto para un proyecto de restauración forestal	73
Cuadro 9.- Resumen de costos del proyecto de restauración forestal para el Ejido Pánuco	76
Cuadro 10.- Valores de temperatura y precipitación para la estación meteorológica de San Antonio del Ciprés	85
Cuadro 11.- Balance hídrico de acuerdo a Thorntwaite para la estación meteorológica de San Antonio del Ciprés	86
Cuadro 12.- Probabilidad de lluvia y periodo de retorno para la estación de San Antonio del Ciprés	89
Cuadro 13.- Ubicación y dimensiones de las cárcavas presentes en el predio	94
Cuadro 14.- Metas y costos de las actividades de protección del área	96
Cuadro 15.- Curvas numéricas para el cálculo de escurrimientos	98
Cuadro 16.- Metas y costos de las actividades de control de la erosión del suelo y captación de agua de lluvia	100
Cuadro 17.- Metas y costos de las actividades de reforestación	102
Cuadro 18.- Metas y costos de las actividades de producción de planta para reforestación inicial	103
Cuadro 19.- Metas y costos de las actividades mantenimiento	104
Cuadro 20.- Metas y costos de las actividades de producción de planta	104

para reposición de planta muerta	
Cuadro 21.- Tipos y número de visitas requeridas para la asesoría técnica	107
Cuadro 22.- Metas y costos de las actividades de asesoría	108
Cuadro 23.- Calendario de ejecución del proyecto	109
Cuadro 24.- Presupuesto requerido para la ejecución del proyecto de restauración forestal	110

INTRODUCCIÓN

El programa de compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales se ha convertido en uno de los esquemas más exitosos de restauración forestal. Su éxito se debe, entre otras cosas, a tres razones fundamentales:

En primer lugar, el proyecto de restauración está planteado a mediano plazo (3 años para ejecución y 3 años con algunas acciones de mantenimiento, financiadas por un concepto denominado incentivo a la restauración), lo cual permite planear las actividades, producir la planta, reforestar y realizar acciones de mantenimiento, entre ellas la reposición de la planta muerta.

Segunda, los recursos para el financiamiento de los proyectos de compensación ambiental provienen de las cuotas por concepto de compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales, que efectúan los promoventes de diversos proyectos económicos y de desarrollo, que requieren un cambio de uso del suelo, tales como carreteras, líneas de transmisión eléctrica, desarrollos turísticos; entre otros, por lo que no están sujetos a las variaciones fiscales.

Finalmente, Los proyectos se planean por un prestador de servicios técnicos forestales en coordinación con los dueños y usuarios de la tierra, las acciones son realizadas directamente por los dueños de la tierra o bajo su supervisión y son supervisados por personal contratado por la comisión nacional forestal, quienes verifican que se hayan realizado las acciones en las cantidades, especificaciones técnicas y plazos establecidos en el proyecto.

No obstante lo anterior; la calidad técnica de las proyectos ejecutivos que participan para obtener financiamiento para ejecutar proyectos de restauración forestal, para compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales sigue siendo deficiente. Por esta razón, la presente guía busca servir como apoyo para que los asesores técnicos elaboren los proyectos ejecutivos, siguiendo una secuencia lógica, que facilite su elaboración y revisión por parte de los encargados del programa en la CONAFOR y con ello se tengan proyectos con mayores posibilidades de éxito; además, se proporcionan una serie de

herramientas y razonamientos sencillos, pero informados, que permitirán a los proyectistas tomar mejores decisiones para la elaboración e implementación de los proyectos de restauración forestal.

JUSTIFICACIÓN

En el trabajo cotidiano de la CONAFOR se han detectado algunas deficiencias en los proyectos que se presentan para recibir financiamiento, siendo las principales la interpretación de los datos o la justificación de las acciones que se deben realizar para lograr la restauración forestal.

El presente trabajo pretende contribuir a la mejora de los proyectos ejecutivos o anteproyectos de restauración forestal para compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales.

Se resalta, entre otros temas, la medición e interpretación de las propiedades del suelo, así como su interacción con el agua, y se hace hincapié en que la restauración inicia por detener los procesos erosivos del suelo y restablecer los ciclos biogeoquímicos, además de que se deben justificar, con argumentos sólidos, las acciones a realizar y las cantidades de insumos y materiales requeridos para la restauración.

Un tema pendiente en los proyectos es el monitoreo de las acciones de restauración, por lo cual se presentan algunos indicadores generales que permiten constatar que la ruta de restauración es la adecuada, e inferir el nivel o estado de restauración forestal que se alcanzará con las acciones realizadas.

OBJETIVO

Proporcionar criterios para analizar, medir o interpretar las características del ecosistema y su nivel de degradación, así como interpretar de manera adecuada la influencia de esas propiedades, sobre todo de suelo, terreno y clima, en las acciones de restauración forestal, que permita lograr proyectos que se inserten en la ruta adecuada de restauración y alcancen el nivel de restauración que los factores ambientales le permitan.

MARCO DE REFERENCIA

Antecedentes de la compensación ambiental en el mundo

El uso de diferentes medidas para compensar el daño al ambiente por el desarrollo de actividades humanas se ha realizado tanto en Europa como en Estados Unidos de América. En los Estados Unidos, estas medidas están centradas en la compensación por daños a los humedales, mientras que en Europa varían de un país a otro. El esquema de compensación ambiental de Alemania es el más completo del mundo, aunque esquemas similares son usados también en otros países, como Holanda, Reino Unido y Suecia. (Roundcrantz y Skärbäck, 2003). Estos autores separan tres formas de compensación ambiental: la mitigación, que se refiere a la minimización del grado, extensión, magnitud y duración del impacto; la restauración por compensación, que es la compensación por la pérdida de los valores ambientales en el contexto funcional del ecosistema donde se realizó el impacto, también llamada compensación en el sitio y, finalmente, la compensación por reemplazo; que es la compensación ambiental por la pérdida de los valores ambientales en otro contexto funcional, es decir la compensación ambiental por restauración fuera del sitio del impacto, en el cuadro 1 se muestran algunas de las características de los esquemas de compensación ambiental que se realizan en el mundo.

Cuadro 1.- Atributos de los esquemas de compensación ambiental en el mundo (construido a partir de Roundcrantz y Skärbäck, 2003, agregando las características de México).

Atributo	Alemania	Estados Unidos	Países Bajos	Reino Unido	Suecia	México
Uso del suelo donde aplica	Todos los terrenos.	Humedales.	Áreas protegidas.	No definido	No definido	Terrenos forestales

Grado de soporte legal	Fuerte (a través de la Ley Federal de tierras y de Conservación de la Naturaleza y el plan de un código de construcción).	Fuerte para los Humedales. Muchas leyes, especialmente la Ley de Agua Limpia.	Medio (Políticas).	No bien definido (Regulaciones de las directivas EG y algunos reglamentos especiales).	No bien definido Ninguna legislación especial, excepto el código Ambiental y las regulaciones para las carreteras. De otra manera las directivas EG.	Fuerte Ley General de Desarrollo Forestal y en mitigación Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
Niveles de Planificación	Planificación Municipal y proyecto.	Principalmente proyectos.	Proyectos.	Poco Claro.	Proyectos.	Proyectos aislados
¿Se permite la compensación económica?	Si la compensación física es imposible.	Sí.	Si la compensación física es imposible.	Poco Claro.	Poco Claro.	Si, pero se aplica también la mitigación.
Base de valor	Enfocado en los valores ecológicos.	Enfocado en los valores ecológicos.	Enfocado en los valores ecológicos.	Valores Ecológicos. También vista de paisaje, basado en atractivos.	Enfocado en valores importantes para la diversidad biológica.	Valores ecológicos del terreno afectado y costos de referencia.
Métodos de implementación	Sí.	Sí.	Si/ iniciando?	No.	No.	Si, fuerte implementación

ción						tación.
------	--	--	--	--	--	---------

En México, como medidas compensatorias por diferentes leyes, entre ellas, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, la Ley General de Vida Silvestre y la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental, se realizan medidas para evitar, reducir o mitigar impactos, además de la compensación ambiental fuera del sitio para cuando se afectan ecosistemas forestales, en cambio, la afectación de ecosistemas no forestales no están obligados de manera legal a realizar una compensación de los impactos fuera del sitio. En este sentido, se ha estado dando un crecimiento urbano acelerado sobre terrenos con uso agrícola o ganadero, que no están obligados a realizar un trámite de cambio de uso del suelo, si no sólo a realizar la manifestación de impacto ambiental (MIA) y puesto que, en la LGEEPA, no está establecido el mecanismo de compensación ambiental no aportan una cuota compensatoria para restablecer las funciones que prestaba el terreno y el suelo antes de que cambiara de uso. El impacto acumulativo se nota sobre todo en las grandes ciudades, una ellas es la zona metropolitana de Guadalajara que ha crecido a expensas del daño por sellamiento a suelos agrícolas de muy alta fertilidad de los cuales se podían obtener rendimientos de maíz superiores a 10 t/ha.

Sería deseable que el esquema que se tiene en la compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales se extendiera a los restantes usos del suelo, puesto que los suelos con uso agrícola o ganadero producen una gran cantidad de servicios económicos y ambientales, que van desde la producción de alimentos, la producción de biomasa que puede ser aprovechada por el ganado o por la vida silvestre y la regulación de algunos de los procesos del ciclo hidrológico, entre otros.

El esquema de compensación ambiental por cambio de uso del suelo en México

México es uno de los pocos países en el mundo en el cual la compensación ambiental está separada del esquema de “pago por servicios ambientales” que también se le denomina compensación por servicios ambientales; en otros casos, la compensación ambiental se considera dentro de la evaluación del impacto ambiental; sin embargo, es necesario aclarar que en México el concepto es completamente distinto a cualquiera de los anteriores.

El primer indicio de una compensación ambiental se estableció con la promulgación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en 1988, al establecer que, dentro de la evaluación del impacto ambiental, se debían realizar actividades que mitiguen, atenúen o compensen los daños ocasionados al ambiente por distintas obras y actividades; asimismo dicha ley establece los tipos de proyectos o actividades que requieren la autorización en materia de impacto ambiental.

La Ley Forestal de 1992, estableció por otra parte, la obligatoriedad de obtener el permiso de autorización de *cambio de utilización de terrenos forestales*, el cual se otorgaba únicamente por excepción y en el cual se establecían una serie de condicionantes al proyecto para minimizar el daño al ambiente. Bajo este contexto y aplicando de manera supletoria la LGEEPA, la extinta Dirección General de Restauración y Conservación de Suelos, dependiente en ese entonces de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, inició con los primeros convenios de compensación ambiental por cambio de utilización de terrenos forestales (Rivera, 1999).

Los convenios que resultaron exitosos en el esquema de compensación ambiental por cambio de utilización de terrenos forestales fueron establecidos con la Comisión Federal de Electricidad, y aunque la mayoría, o prácticamente todos, incluían acciones de reforestación, resulta importante resaltar que se consideraron también muchas acciones de restauración de suelos. Ejemplo de la aplicación de dichos convenios resultaron en proyectos de restauración forestal para compensación ambiental en el Parque Nacional Cumbres de Majalca, y en el ejido El Huérfano, San Juanito, ambos en el estado de Chihuahua.

La experiencia de la implementación de los convenios de compensación ambiental derivó en que en la discusión de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable que entró en vigor en el 2003, se estableciera de manera obligatoria la compensación ambiental, a través de un monto económico depositado al Fondo Forestal Mexicano para realizar acciones de restauración forestal, establecidas como reforestación, restauración y su mantenimiento (LGDFS, 2003) y que en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable de 2018, quedara incluido el término Compensación Ambiental (LGDFS, 2018).

El cálculo del monto económico para las acciones de restauración forestal se formalizó en el Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, publicado en el 2005, mismo que estableció que dicho monto sería el resultado de la aplicación del nivel de equivalencia por los costos de referencia, cuyas metodologías fueron publicadas por primera vez en el Diario Oficial de la Federación en el 2005 y 2006, respectivamente. (RLGDFS, 2005; DOF, 2005, 2006) y los costos de referencia y su metodología modificados en el 2014 (DOF, 2014).

El esquema de compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales, que ha implementado la Comisión Nacional Forestal a través de proyectos de restauración forestal, ha sido exitoso y novedoso en el mundo, ya que como se mencionó antes, sólo Alemania tiene un esquema parecido y además en México se implementan, para un mismo proyecto, acciones de mitigación del impacto ambiental, acciones de mitigación de daños por el cambio de uso del suelo en terrenos forestales y acciones de compensación ambiental en otro sitio distinto al del proyecto; además existe como otro concepto distinto, el esquema de pago por servicios ambientales, destinado a conservar los ecosistemas que presentan un buen estado de conservación.

El esquema de compensación ambiental mexicano ha sido ejemplo para países que quieren implementarlo como Argentina, Colombia, Chile y Perú.

Restauración ecológica y restauración forestal

La Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (SER, 2004), define la restauración ecológica como una actividad deliberada que inicia o acelera el establecimiento de un ecosistema respecto a su salud, integridad y sostenibilidad. La restauración trata de retornar un ecosistema a su trayectoria histórica. Es por eso que las condiciones históricas son el punto de partida ideal para diseñar la restauración. El ecosistema restaurado no necesariamente recuperará su condición anterior desde que las limitaciones y condiciones contemporáneas pueden causar su desarrollo por una trayectoria diferente (SER, 2004).

La restauración requiere de un compromiso de tierras y recursos a un plazo indefinido (SER, 2004). Aunque se tiene plena conciencia de que esto es necesario, las intervenciones gubernamentales no siempre se pueden implementar a largo plazo y tampoco existe el personal suficiente para hacer extensionismo y acompañar a los dueños de la tierra durante todo el proceso de restauración, de ahí que la implementación del esquema de compensación ambiental de la CONAFOR sea a mediano plazo y se privilegie la asignación de proyectos sucesivos con los mismos dueños de las tierras, lográndose con ello la conservación de los terrenos restaurados (CONAFOR 2014). Además, los terrenos en México son propiedad privada ya sea de una persona (pequeños propietarios) o de un grupo de personas (ejidos, comunidades, sociedades, asociaciones), por lo cual las acciones de restauración forestal se realizan bajo su consentimiento y están sometidos a los cambios de decisiones que tienen sus dueños.

La restauración forestal se puede considerar como parte de la restauración ecológica, enfocada a la restauración del componente forestal de los ecosistemas. La restauración forestal es sin duda el tipo de restauración ecológica que más se ha realizado en el mundo y de la cual se han desprendido la mayoría de los conceptos y principios para efectuar la restauración ecológica de otros ecosistemas.

La reforestación ha sido la actividad principal de la restauración forestal, aunque también las obras de control de la erosión del suelo han sido parte esencial de la restauración ecológica; no obstante, esta última actividad surgió como parte de las actividades realizadas en la agricultura y paulatinamente sus técnicas se han extendido a los ecosistemas forestales. En la actualidad el concepto de restauración forestal implica necesariamente que se realice el control de la erosión del suelo y manejo de las escorrentías superficiales como parte del proceso (CONAFOR 2014).

La restauración forestal realizada en la CONAFOR como medida de compensación ambiental

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) implementa, desde el 2005, la compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales. A lo largo de los años ha perfeccionado los lineamientos y criterios, técnicos y administrativos para realizar las acciones de restauración forestal (restauración de suelos, reforestación y mantenimiento) para lograr la compensación ambiental.

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable define compensación ambiental de la siguiente manera:

Compensación ambiental por cambio de uso de suelo en terrenos forestales: Las obras y actividades de restauración de suelos, reforestación, protección y mantenimiento, que se realizan con el fin de rehabilitar ecosistemas forestales deteriorados, de controlar o evitar los procesos de degradación de los mismos y de recuperar parcial o totalmente las condiciones que propicien su persistencia y evolución (LGDFS 2018).

Actualmente se implementa un esquema de restauración forestal, como compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales, dicho esquema plantea dos fases:

1. Elaboración de un proyecto ejecutivo
2. Implementación del proyecto en campo.

Además de lo anterior se incorporó un concepto denominado “Incentivo a la Restauración”, que permite que el proyecto tenga una continuidad por tres años más y realizar acciones de mantenimiento o mejores prácticas de manejo, con el recurso otorgado.

La primera fase que corresponde a la elaboración del proyecto ejecutivo es lo que se abordará en el presente trabajo, detallando cada uno de los tópicos correspondientes.

METODOLOGÍA

La presente guía para la elaboración de proyectos de restauración forestal se desarrolló con base en la experiencia personal en la revisión de los contenidos y términos de referencia de los anteproyectos o proyectos ejecutivos de compensación ambiental presentados a la CONAFOR para su posible financiamiento.

Los términos de referencia que se publican para elaboración de proyectos deben ser sucintos; sin embargo, en licitaciones o invitaciones para presentar proyectos, normalmente las personas que presentan los proyectos entienden de una manera muy distinta, el desglose de la información que cumple con esos términos de referencia, a las empresas o instituciones que requieren la implementación de dichos proyectos; por ello la presente guía pretende que se entienda la misma información tanto para los que participan para prestar el servicio, como para los que lo requieren.

La guía se divide en secciones para facilitar la elaboración de un proyecto de restauración forestal, una sección se refiere a los datos generales del proyecto que contemplan todos los aspectos físico-administrativos; otra sección se refiere a la caracterización físico-biológica del predio en la que debe hacer énfasis en la degradación del ecosistema, una sección más se refiere propiamente a la

propuesta de restauración forestal, que debe ser acorde a la degradación del ecosistema y finalmente una última sección se refiere al monitoreo de la restauración, que permitirá hacer ajustes sobre la implementación de los proyectos o aprendizajes para proyectos futuros.

En ella se detallan y desglosan cada uno de los puntos que, en la revisión de dichos proyectos, han sido identificados como críticos, ya que al no abordarse con la suficiente profundidad, pueden llevar al fracaso de los mismos al momento de su implementación.

A continuación, se desglosa la propuesta del contenido con el que debe contar un Proyecto Ejecutivo de Restauración Forestal. Esta propuesta está basada en la experiencia en la revisión de trabajos anteriores, y se sugieren herramientas que pueden agregarse para obtener datos con buena confiabilidad, sin requerir de demasiada inversión en tiempo, dinero y terceros para realizarlos.

RESULTADOS

Los resultados del presente trabajo se presentan en dos partes. La primera es una propuesta teórica sobre cuál debe ser el contenido de un Proyecto Ejecutivo de Restauración Forestal, basado en los términos de referencia para proyectos de compensación ambiental y la segunda es un ejemplo práctico de un proyecto específico que se ajusta al esquema teórico presentado en la primera parte, (CONAFOR, 2014).

I. Propuesta de contenido de un Proyecto Ejecutivo de Restauración Forestal (Propuesta teórica)

1. Datos generales del Proyecto

1.1. Nombre del proyecto

El nombre del proyecto es un dato muy relevante; sin embargo la inventiva de los proyectistas para asignar un nombre adecuado no es común; la mayoría de los proyectos se refieren a “Restauración Forestal del Ejido de”, “Restauración de la zona x” y nombres por el estilo; el proyectista debe reflexionar en el nombre de sus proyectos, sobre todo cuando el proyecto se planea para o llega a tener una escala internacional, por lo cual un nombre que lo distinga a nivel nacional o incluso internacional, cobrará relevancia y catapultará a su autor a obtener un mayor prestigio. Es conveniente pensar un nombre como “Restauración del Hábitat del Bisonte Americano en Janos, Chihuahua”; “Conservación del Último Relicto de *Pinus maximartinezii* en Santa María de Ocotán, Mezquital, Durango” o algo como “Guardería para Larvas de Camarón, la Restauración del Manglar en Marismas Nacionales, Nayarit.

1.2. Nombre del titular del proyecto

Es importante precisar con claridad, con los nombres oficiales, a las personas morales o físicas dueñas o poseedoras del terreno donde se implementará el proyecto, agregar sus domicilios y datos de contacto de los mismos.

1.3. Datos del responsable técnico del proyecto

Anotar con claridad el nombre, teléfonos y correos electrónicos del proyectista. Los correos electrónicos se deben relacionar con su nombre o su empresa y evitar correos con seudónimos y sobrenombres. Anexar una reseña curricular de no más de cinco renglones que proporcione de manera clara la información de su perfil y experiencia.

1.4. Área que se restaurará y costos de la restauración

Es de suma importancia establecer de manera clara cuál es el área que se restaurará y los costos que se requieren para la restauración. Asimismo, es necesario que se indique, al menos de manera general, el costo de las actividades de control de erosión o preparación del terreno, reforestación, mantenimiento, elaboración del proyecto y monitoreo.

1.5. Resumen del proyecto

Presentar en un resumen, que no exceda de media página, las características generales del proyecto, las técnicas de restauración que se emplearán, los resultados que se obtendrán y los indicadores de progreso y éxito de la restauración.

Evitar copiar y pegar definiciones y objetivos de los lineamientos o reglas que rigen un programa en específico, o escribir cuestiones amplias y rebuscadas de la importancia de la restauración forestal.

1.6. Objetivos

En este apartado se debe señalar un objetivo, claro y medible, de la restauración del predio. Normalmente el objetivo deberá estar relacionado con la compensación ambiental a través de la restauración forestal de un predio específico, dentro de un ecosistema forestal en particular.

1.7. Metas

Las metas se refieren a las acciones específicas que se van a realizar en el proyecto, expresadas como la cantidad de trabajos específicos que se realizarán. Dichas metas deben tener unidades definidas de medición acordes a la actividad que se realizará; es decir, emplear con claridad unidades como m, m², m³, ha, km, gr, kg, plantas, entre otras. Cuando se usen unidades genéricas como piezas,

dosis, fletes u otros de naturaleza similar, se deben especificar las características de cada una de ellas; es decir, si se refiere por ejemplo a “dosis”, se debe especificar que corresponde a gramos de fertilizante de una fórmula de fertilización para cada planta; o bien pueden ser gramos de retenedor de humedad, con características específicas de hidratación que se aplica en seco o hidratado, para cada planta. Si se refiere a “piezas”, se debe especificar que se trata, por ejemplo, de terrazas individuales de sección circular, a contrapendiente, de 1.5 m de diámetro, corte de al menos 10 cm y plantación a cepa común en el centro de la misma.

Este mismo tipo de descripción se debe realizar para cualquier unidad de medida que esté sujeta a interpretación; es decir, las metas deben ser precisas, alcanzables y medibles.

1.8. Antecedentes del proyecto o experiencias de proyectos anteriores

Mencionar los antecedentes del proyecto, explicando si el proyecto tiene algún avance, si se han hecho pequeñas áreas o sitios demostrativos de las actividades que se plantean y los resultados que se han obtenido, así como datos que permitan prever si el proyecto resultará exitoso. También se deben mencionar proyectos de restauración similares, de ser posible, lo más cercanos al área propuesta para restauración, resaltando los resultados obtenidos, no en cuanto a metas o acciones realizadas, sino a la efectividad de dichas acciones en la restauración forestal del área. Este tipo de información es fundamental para que el evaluador del proyecto determine que la restauración es viable y se le asigne financiamiento, o al menos sea considerada la propuesta para presentarse a algún organismo que pueda financiarlo.

2. Caracterización físico-biológica del sitio

2.1. Identificación del sitio donde se implementará el proyecto

El proyectista debe realizar un recorrido inicial, acompañado por el dueño del predio o una persona que conozca bien el terreno, cuyo propósito será sólo identificar de manera rápida las áreas que requieran restauración y el nivel de restauración que requiere cada una de ellas. En una etapa posterior se realizará el levantamiento detallado de los datos para la elaboración del proyecto ejecutivo.

2.2. Localización del sitio

El levantamiento planimétrico debe realizarse con GPS de navegación o, preferiblemente, con GPS submétrico o estación topográfica. En caso de que el levantamiento se realice con GPS, es recomendable registrar las coordenadas en formato UTM, sobre todo para áreas pequeñas (menores a 5 ha), ya que el arco de un segundo en caso de usar coordenadas geográficas puede representar varios metros respecto a un levantamiento con UTM.

Además del levantamiento del perímetro, el proyectista debe tomar las coordenadas de los puntos donde cambian las condiciones de suelo, pendiente, vegetación, degradación, entre otras y, de ser posible, hacer un levantamiento al interior del predio de esas áreas y sus características, para que se dispongan de los datos que permitirán hacer el planteamiento de las técnicas de restauración más adecuadas.

Además, deberá registrar las coordenadas de los lugares emblemáticos o representativos del predio, de tal manera que permita ubicar y dar referencias claras a los trabajadores sobre las áreas en la que se realizará determinada actividad o las especies que se establecerán en cierto paraje.

2.3. Plano del predio a restaurar

Es conveniente realizar el plano del predio a restaurar, que debe contener el cuadro de construcción del mismo, indicándose las coordenadas de los vértices y presentar el plano en una escala impresa grande o al menos de 1:5,000; la medida estándar es de 60 x 90 cm; sin embargo para explicar y llevar un control de las actividades con las comunidades encargadas del proyecto, se prefieren tamaños mayores que se pueden exhibir en los salones comunitarios (o ejidales) y llevar el registro de avances y que además las obras se aprecien para cada zona. Un ejemplo es el plano que se indica en la Figura 1, en el cual se pueden apreciar las zonas donde se realizarán las prácticas.

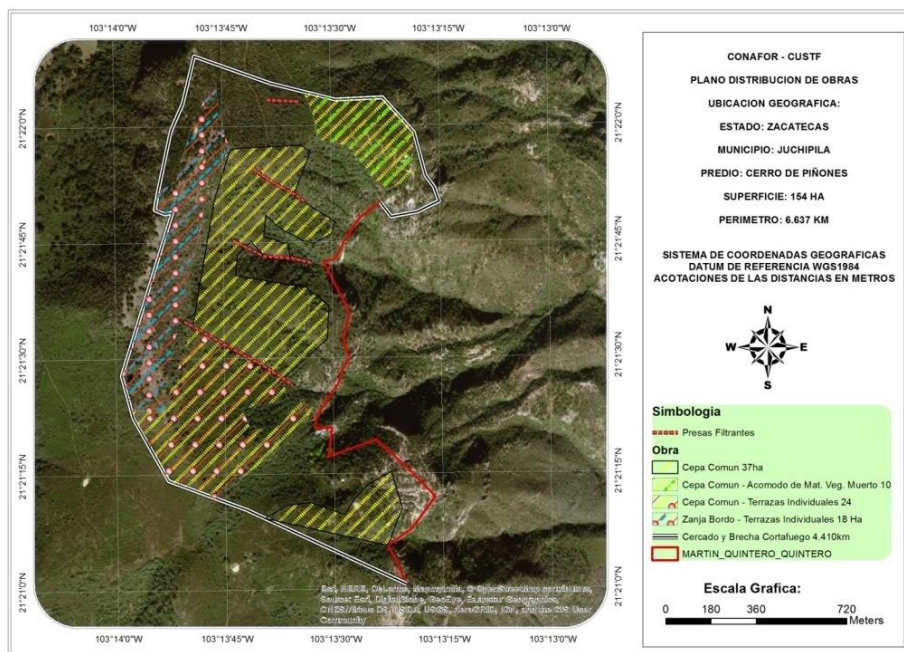


Figura 1.- Ejemplo de plano, donde se señalan las actividades de restauración a realizarse, Francisco Ramírez.

El levantamiento planimétrico se usará para la generación del polígono, del cual se obtendrán el área y el perímetro que servirán para otros cálculos.

2.4. Características fisiográficas y edafológicas del predio

La fisiografía del paisaje es una de las características más fácilmente detectables y que nos da los elementos para inferir las propiedades del suelo y, al conjugarlo con el clima, inferir también el desarrollo de la vegetación. El proyectista debe ubicar el predio a restaurar dentro del paisaje en que se engloba; por ejemplo, un predio que se ubica dentro de la provincia del Eje Neovolcánico y específicamente en la Subprovincia de Valles y Volcanes del Anáhuac, al ubicarlo posteriormente en una ladera, en un relieve montañoso, se podrá inferir que presentará suelos de origen volcánico, con pH neutro a ácido. Si además tiene propiedades ándicas, se sabrá que tienen una alta permeabilidad, baja densidad aparente y presencia de minerales amorfos que provocarán retención del fósforo y que es probable la deficiencia de este elemento en las plantas que se establezcan en la restauración.

Después de ubicado el relieve fisiográfico a nivel macro, (Eje Neovolcánico, Sierra Madre Occidental, Península de Yucatán, Llanura Costera del Golfo Norte, entre otras), es necesario describir el paisaje específico donde se localiza el predio a restaurar. Una guía para la descripción del paisaje o la forma del relieve donde se localiza el predio es la establecida por Shoeneberguer *et al.* (2002), considerando lo siguiente:

Paisaje: se describen los grupos únicos naturales y rasgos similares espacialmente asociados, para toda la zona donde se ubica el proyecto, por ejemplo: colina, costa, cuenca, duna, falda de montaña, llanura, meseta, montaña, páramo, pie de monte, tierras bajas, valle, entre otros (Figura 2).



Figura 2.- Denominación de las partes del relieve, tomado de Shoeneberguer, *et al.*, 2002.

Forma de terreno: se refiere a rasgos naturales discretos, individuales y trazables en escalas similares, de la superficie de la tierra dentro del polígono donde se realizará el proyecto; por ejemplo, zona de falla, pantano, llano, llanura de inundación, banco de arena, deslizamiento, grieta, duna costera, barranco, valle estrecho, colina, terraza, planicie, loma, laguna, depresión, valle, cono volcánico, entre otros. Este tipo de rasgos definirá el planteamiento de estrategias específicas de restauración. En los terrenos degradados es muy común encontrar este tipo de rasgos, como por ejemplo los pavimentos de erosión, comúnmente conocidos como tepetates (Figura 3) que, al no tener suelo, y seguirse erosionando el material parental, requieren de obras de control de erosión, especies adecuadas y técnicas de plantación específicas para lograr la restauración.



Figura 3.- Pavimentos de erosión (tepetate) y canalillos. Ejido El Coyote, Colón, Qro., Noé Rosas.

Micro rasgos: son rasgos naturales discretos de la superficie de la tierra, típicamente muy pequeños para enlistarlos en estudios comunes, que ocasionalmente es necesario enlistar a nivel predial, como arroyo, canal, cara de deslizamiento, corriente intermitente, cueva, duna, estanque, grieta, loma, depresión, que ocasionalmente son importantes porque requieren una técnica de restauración específica, por ejemplo, el cabeceo de cárcavas o pasos de desagüe en caminos.

Uso de suelo: se refiere a rasgos de la superficie de la tierra marcados por usos antropogénicos, por ejemplo, área talada, banco de material, corte de vía, estanque o jaguey, labranza, superficie de minería, zanja de drenaje, tiradero, área de pastoreo, etc. (Figura 4).



Figura 4. Extracción de suelo forestal para venta como tierra de monte. Ejido Magdalena Petlacalco, Ciudad de México, Samuel García.

2.5. Morfometría de la superficie

Conocer los rasgos de la forma y otros datos asociados al terreno permite inferir algunas situaciones respecto a la restauración, tanto en las obras que pueden ser viables como en las especies que se pueden usar para la restauración, algunos datos morfométricos a incluir son los siguientes:

Altitud (metros sobre el nivel del mar, msnm). Se debe anotar la altitud del terreno. Nos permite inferir la temperatura promedio y, ambos datos nos pueden dar una idea general de las especies probables que pueden desarrollarse en el área.

Aspecto de la pendiente. Es necesario anotar la orientación de la pendiente de acuerdo a los grados que marque la brújula; se debe tomar en cuenta la pendiente dominante del predio, que está asociada al relieve general del mismo, la anotación correcta es viendo pendiente abajo y anotando el azimut de la misma (ej. 285°). También se puede complementar anotando el rumbo.

No es recomendable definir la orientación del terreno en gabinete, mediante el empleo de sistemas de información geográfica, porque el sistema efectúa el proceso para cada cambio de dirección de la pendiente, creando planos o mapas que no sirven mucho para la toma de decisiones.

Inclinación de la pendiente. Se debe anotar la pendiente principal en porcentaje (ej. 18%). La medición de la pendiente siempre es de arriba hacia abajo y la pendiente principal no es la más inclinada sino la que predomina en la orografía general donde está ubicado el terreno que se pretende restaurar.

Debe recordarse que la pendiente principal es donde se ubicará la línea madre que determinará la separación entre las obras proyectadas y que la distancia entre obras sólo será igual sobre la línea madre; las obras trazadas en curvas de nivel quedarán a una menor distancia que en la línea madre donde la pendiente aumente y a una mayor distancia donde la pendiente disminuya.

La pendiente se debe medir forzosamente con un aparato diseñado especialmente para ello o al menos mediante una regleta o hilo y niveles; los cálculos de la pendiente sin ningún aparato invariablemente resultan erróneos. Es necesario también medir las pendientes por zona.

Si por alguna razón la pendiente no está en porcentaje, la conversión de la pendiente de grados a porcentaje se debe hacer con la relación trigonométrica que indica que la pendiente es la tangente del ángulo que forma el terreno multiplicada por 100, es incorrecto hacerlo mediante reglas de tres.

Forma de la pendiente. Se debe considerar la forma de la pendiente de la parte más alta a la más baja del terreno (ubicándose de acuerdo a la pendiente principal del paisaje), describiendo si la forma de la pendiente es cóncava, convexa o lineal, tanto hacia abajo como horizontalmente, Se sugiere considera la

mejor combinación posible (ej. cóncava-convexa o linear-cóncava), de acuerdo a los esquemas mostrados en la Figura 5.

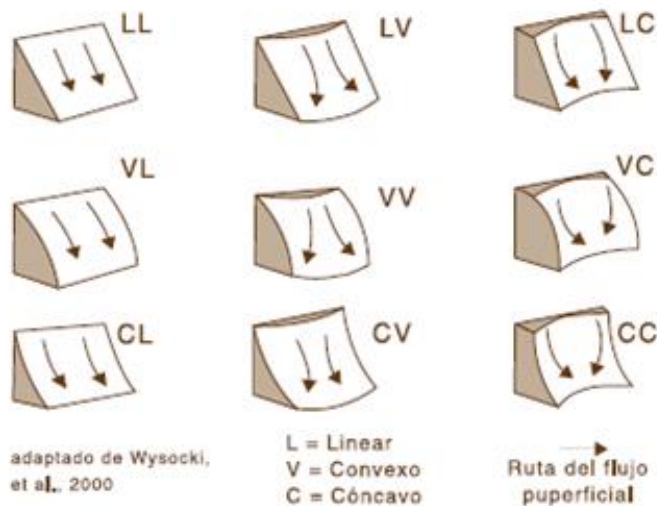


Figura 5.- Formas de la pendiente, tomado de Shoeneberguer *et al.* (2002).

Drenaje superficial del terreno. Es importante describir el drenaje superficial del terreno de acuerdo a la velocidad que alcanzará el agua por escorrentía superficial. El drenaje está asociado altamente a la pendiente del terreno y la cobertura vegetal del mismo. *Miura et al.* (2015) determinó que la cobertura del piso forestal y la pendiente del terreno explican entre el 59 y 70 % de la erosión del terreno. El drenaje superficial se puede clasificar como muy rápido, rápido, moderado, lento y muy lento.

2.6. Descripción del suelo del área o del terreno donde se realizará la restauración

El suelo es sin duda el principal factor a tomar en cuenta para lograr la restauración de un ecosistema. De acuerdo a la fórmula de Jenny, citado por Ortiz (1994), el suelo es una función del material parental, el clima, la biota, el relieve y el tiempo. De los anteriores factores, sólo la biota es la que está en constante

cambio y el relieve sólo ocasionalmente se modifica de manera parcial; sin embargo, el suelo depende de la biota como la biota depende del suelo, una modificación en el suelo invariablemente tendrá modificaciones en la biota.

La mayoría de las veces la restauración forestal implica plantar árboles en suelos que han perdido más de la mitad de su capacidad productiva, lo cual dificultará sobremanera la obtención de resultados óptimos en el desarrollo de los árboles, de ahí que la descripción adecuada del suelo es algo fundamental para poder plantear y realizar la estrategia apropiada de restauración.

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, creó un concepto que denominó “Sitio Ecológico” y lo describió como una clase distintiva de tierra, que, por sus características específicas de suelo, asociadas al clima del lugar, produce o soporta un tipo específico de vegetación (NRCS, 2017).

Conocer o determinar el sitio ecológico permitirá establecer la vegetación más adecuada para la restauración; un ejemplo típico de sitios ecológicos es una zona del desierto chihuahuense, por ejemplo en la zona del noroccidente de San Luis Potosí y sur de Nuevo León, donde se pueden encontrar lugares con vegetación de mezquital junto a vegetación de matorral rosetófilo, principalmente de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr) y guapilla (*Hechtia glomerata* Zucc), y en los que el mezquite está asociado a suelos arenosos profundos mientras que el matorral rosetófilo está asociado a suelos delgados calcáreos, no obstante ser vecinos y compartir el mismo clima. Esto explica el que se haya observado que, al hacer reforestaciones con mezquite en sitios ecológicos no aptos para esta especie, a pesar de que sobrevive, no se desarrolla como en su sitio ecológico. Por lo anterior, el conocimiento y la descripción del suelo son de primordial importancia para el planteamiento adecuado de la técnica de restauración.

La descripción del perfil del suelo no es únicamente el reporte bibliográfico de la unidad de suelos de acuerdo con la clasificación FAO, reportado por el INEGI o

por otra fuente bibliográfica, sino que se requiere la descripción específica lo más detallada posible y además la interpretación básica de cómo usar esa información para la restauración. La descripción del suelo del predio debe incluir al menos las siguientes propiedades del suelo:

Distribución de distintas unidades del suelo en el predio o diferencias en las características principales del suelo. El suelo está íntimamente ligado a la fisiografía del sitio y presenta variaciones que están ligadas sobre todo a la pendiente, por lo que es conveniente describir un perfil del suelo en cada unidad fisiográfica y procurar hacer un levantamiento edafológico. Cabe señalar que, ya que se está trabajando en terrenos degradados, las condiciones de degradación del suelo generarán otras unidades de suelo, que requieren un tipo especial de restauración.

Perfil del suelo. La descripción del perfil del suelo nos permitirá conocer las propiedades del mismo y el efecto de esas propiedades en la técnica de restauración empleada. Aunque no se busca una clasificación pedológica del suelo, es deseable contar con el mayor detalle que permita tomar las previsiones necesarias para la restauración. Las propiedades principales por describir son las siguientes:

Profundidad. La profundidad, sin ser específicamente una propiedad específica ligada a ciertos componentes del suelo, es una propiedad muy importante ya que implica su desarrollo y nos da una idea de la cantidad de agua y nutrientes que el suelo puede proporcionar para las plantas que estableceremos. Al ser la erosión del suelo una de las principales causas de degradación del mismo, la profundidad es la propiedad más afectada. Es necesario abrir un pozo pedológico en cada una de las unidades fisiográficas del predio y encontrar la profundidad del suelo y, si el suelo es el mismo de otras unidades, explicar a qué se deben las diferencias de profundidad.

La profundidad del suelo también es determinante en el anclaje de los árboles y ayuda en la resistencia a disturbios; principalmente huracanes y lluvias

torrenciales. Se ha observado que los huracanes derriban menos árboles si éstos están mejor anclados, lo cual depende de la profundidad. Esta situación se ha advertido, por ejemplo, en la mayor cantidad de árboles derribados por los huracanes en Quintana Roo, con respecto a la cantidad de árboles derribados en Tabasco o Veracruz, ante un huracán de la misma intensidad.

Pedregosidad en el perfil. La presencia de fragmentos rocosos o pedregosidad en el perfil (Figura 6), es una propiedad del suelo que raramente se reporta en los informes de suelos. Aunque muchas veces se determina incluso en laboratorio, rara vez es reportada y analizada adecuadamente. La pedregosidad es una propiedad muy importante porque, aunque ayuda a mejorar la velocidad de infiltración del agua en el perfil y a retardar la saturación de humedad en el mismo; le resta capacidad al suelo de almacenar agua y nutrimentos ya que las piedras son inertes. Es común que en el cálculo de cantidades de nutrimentos y agua en el suelo se tengan resultados erróneos ya que la mayoría de ellos no consideran la pedregosidad en el perfil y sólo multiplican el porcentaje de cierto nutrimento por el peso de una hectárea a una profundidad determinada, asumiendo que todo el espacio de esa hectárea está ocupado por suelo. La pedregosidad en el perfil es un modificador de la textura o incluso un término usado en lugar de textura, si es que la pedregosidad es más importante que el propio suelo mineral.



Figura 6.- Pedregosidad en el perfil del suelo. Jesús Cortés.

Estructura. La estructura afecta la penetración del agua, el drenaje, la aireación y el desarrollo de raíces, afectando así la productividad del suelo y las facilidades de labranza. La estructura, especialmente en el suelo superficial, puede ser alterada por las labores de cultivo mientras que la textura no cambia por las operaciones usuales del laboreo (Ortiz, 2010).

La estructura del suelo es una propiedad que no se puede determinar en laboratorio de manera correcta, y que es preferible describirla en campo, aunque es una propiedad bastante difícil de estimar para personas poco entrenadas en la descripción de perfiles de suelos.

La estructura es una propiedad determinante en distintos procesos de infiltración, porosidad, almacenamiento y distribución del agua dentro del perfil de suelo (Narro, 1994), es importante describirla lo mejor posible y agregar las fotografías y videos necesarios para permitir al evaluador de los proyectos reconocer la estructura presente en el suelo del predio que se pretende restaurar, y conocer por qué se proponen ciertas técnicas de restauración y no otras.

Textura.- Aunque la textura es quizá la propiedad del suelo más conocida o difundida, no es determinada con suficiente precisión por los encargados de elaborar los proyectos de restauración forestal y a menudo se reportan incluso clases texturales que no existen en la clasificación.

La textura del suelo es una de las propiedades que más información nos proporciona para tomar decisiones sobre las actividades pertinentes para lograr el éxito en la restauración. La textura nos permite inferir la densidad aparente, la infiltración básica, la retención de humedad e incluso la cantidad de nutrimentos o fertilidad de un suelo (Porta, 2003).

Es necesario determinar la textura para cada una de las capas distintas que identifiquemos del perfil de suelo, y detallar cuando encontremos un cambio textural abrupto. Por ejemplo, suponiendo que la primera capa (a menudo la única de la que se toman datos) tiene una textura franco arenosa y la segunda capa una textura arcillosa; si no se describen y detectan ambas capas puede ocurrir que se estime una alta infiltración y que incluso se establezcan técnicas de retención de humedad como el uso de acrilatos o poliacrilamidas (Green y Stott, 2001), y que en la realidad, al momento de que el agua se agregue al suelo, la capa de arcilla, que tiene una muy baja infiltración, provoque una saturación del suelo, propiciando la muerte de los árboles plantados debido a un exceso de humedad.

La textura es una de las propiedades que más fácilmente se puede estimar en el campo y con un poco de práctica se logrará identificar la clase textural del suelo y con ello inferir las características que le conferirá al mismo y que se deben tomar en cuenta para los proyectos de restauración.

Una guía para la determinación de la textura es la que se muestra en la Figura 7.

Procedimiento de Textura por Tacto

Haciendo una cinta

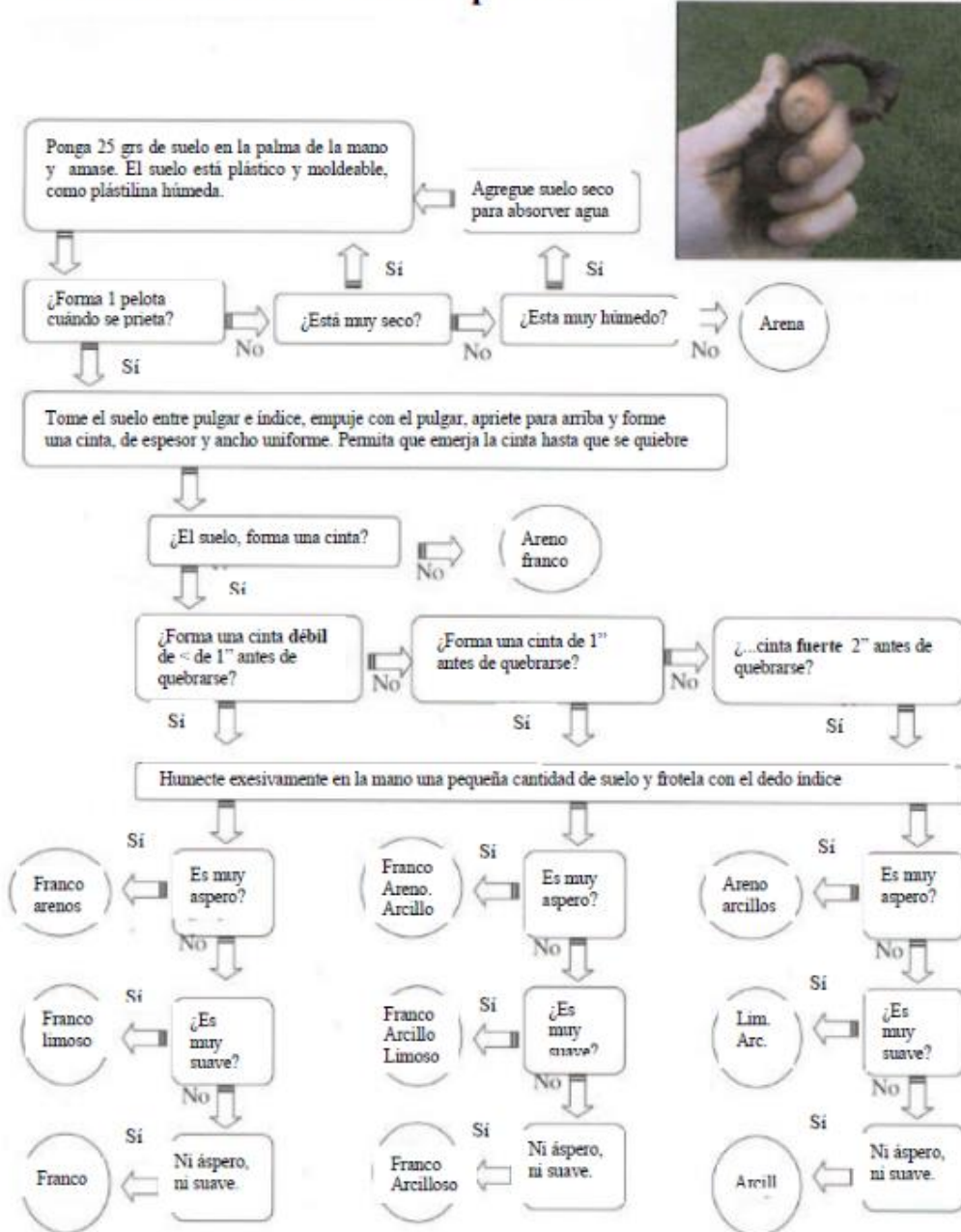


Figura 7.- Procedimiento para la determinación de la textura al tacto. Tomado de "Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo (USDA 1999)

La textura es la principal propiedad para poder usar la herramienta "Soil and Water Characteristics", que se puede consultar en la siguiente dirección electrónica.

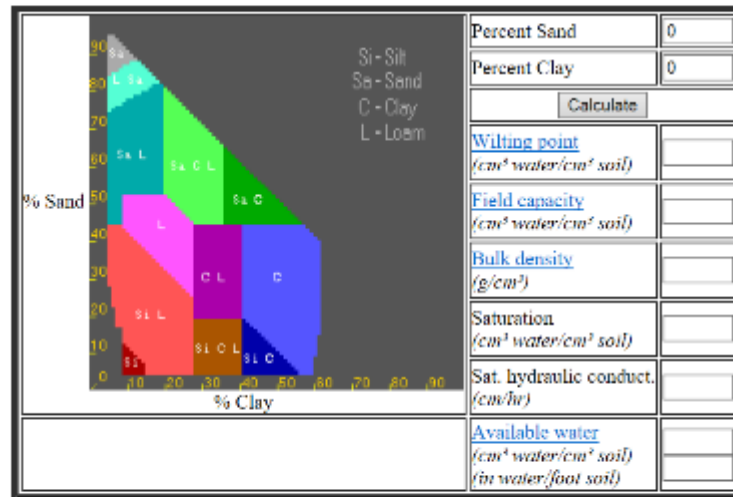
<http://hydrology1.nmsu.edu/teaching/soil456/soilwater.html>

La página mostrará la Figura 8, y al capturar los valores aproximados de porcentaje de arena y arcilla, según la determinación al tacto, la página calculará las propiedades físicas principales

hydrology1.nmsu.edu/teaching/soil456/soilwater.html

Soil texture triangle

hydraulic properties calculator



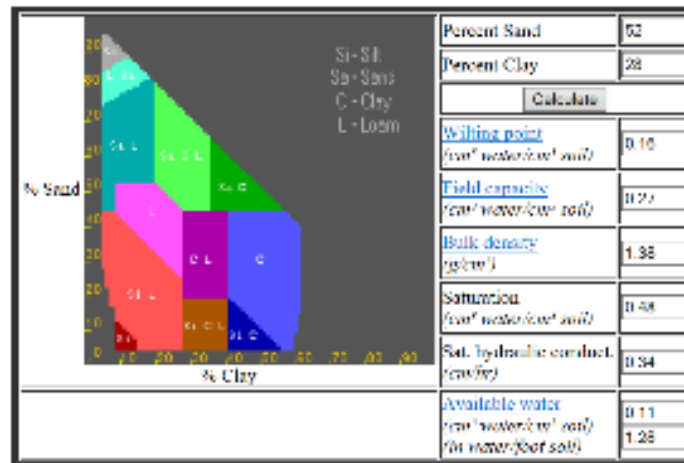
Click on the triangle
or
enter values for percent sand and percent clay and click on [Calculate] to obtain the soil properties.

Figura 8.- Calculador de propiedades hidráulicas del suelo a partir de la textura del mismo, tomado de www.hydrology1.nmsu.edu

Por ejemplo, si la textura del suelo en el terreno que se pretende restaurar es franco arcillo arenosa, tendrá aproximadamente los siguientes valores de las propiedades (Figura 9):

Soil texture triangle

hydraulic properties calculator



Click on the triangle
or

enter values for percent sand and percent clay and click on [Calculate] to obtain the soil properties.

Figura 9.- Ejemplo del calculador de propiedades hidráulicas a partir de datos de % de arena y arcilla, tomado de www.hydrology1.nmsu.edu

Para el ejemplo, se tiene que la arena representa el 52%, la arcilla 28% y el limo 20%, lo que da una textura franco arcillo limosa, que está entre las texturas medias que son las mejores para la fertilidad del suelo. La densidad aparente aproximada es de 1.38 gr/cm³, el valor real de la densidad aparente dependerá del porcentaje de materia orgánica que tenga el suelo, pero es un valor bueno para realizar algunos cálculos. Asumiendo que la densidad real es 2.65 gr/cm³; la porosidad del suelo es de $(1 - (1.38/2.65)) \times 100 = 48\%$, (Narro 1995).

Si se observa, la porosidad que es 48%, es igual a la saturación que es 0.48 cm³ de agua/cm³ de suelo, o sea 48% y esto es porque, a saturación, todo el espacio poroso está ocupado por agua.

La conductividad hidráulica saturada es otro dato interesante ya que nos permite saber la cantidad de agua que el suelo podrá seguir transmitiendo aun cuando esté completamente saturado, lo cual es de gran utilidad para la recarga de capas inferiores y eventualmente, la recarga de acuíferos. El valor de 3.4 mm por hora, también permitirá inferir cuándo se presentarán escurrimientos sobre el terreno,

ya que si la intensidad de la lluvia es mayor que la conductividad hidráulica saturada, se producirán escorrentías.

Los valores más interesantes y que -excepto para zonas de riego- normalmente no se realizan, son las constantes de humedad que son el punto de marchitez permanente y capacidad de campo, valores que para el ejemplo corresponden a 16 y 27% respectivamente, y al restar el valor del punto de marchitez permanente al de capacidad de campo resulta 11%, que corresponde a la humedad aprovechable. El valor de la humedad aprovechable es quizá el más importante o, al menos, el que más debe tomar en cuenta, ya que la cantidad de agua aprovechable será determinante para llevar a cabo los proyectos de restauración, y al combinar los valores con la profundidad del suelo, permitirá conocer la cantidad de agua que se puede tener para el establecimiento de la reforestación; además, como se puede calcular para cada horizonte, nos permitirá conocer el agua disponible en todo el perfil del suelo.

Por ejemplo, supongamos que el suelo tiene 80 cm de profundidad, la textura es la misma en todo el perfil, tiene una pedregosidad en el perfil de 20%; entonces, el espacio disponible para las raíces de las plantas es 64 cm, como la humedad aprovechable es de 11%, ese perfil de suelo podrá retener 7.04 cm de agua, por lo que, sabiendo la cantidad de lluvia en la zona, se podrá hacer el cálculo del agua disponible para la reforestación.

Drenaje Interno.- El Drenaje interno se refiere a la capacidad del suelo de drenar el agua que recibe el perfil del suelo después de llegar a la capacidad de campo, Los tipos de drenaje determinados por el NRCS son los siguientes:

Cuadro 2.- Clases de drenaje del suelo

Tipo de drenaje	Pobremente drenado
	Muy pobremente drenado
	Algo pobremente drenado
	Moderadamente bien drenado
	Bien drenado
	Algo excesivamente drenado
	Excesivamente drenado

El drenaje se puede inferir con base en la textura y estructura del suelo y la presencia de horizontes cementados o de muy baja permeabilidad en el perfil del suelo.

2.7. Descripción del clima donde se localiza el proyecto

El conocimiento general del clima permite saber o inferir, a priori, el tipo de vegetación o las características de la vegetación existente, los posibles problemas de humedad que se tendrán para el proyecto, ya sea por deficiencias o bien por exceso de la misma, e intuir las acciones de restauración de suelos o captación de agua de lluvia que se requerirán para el proyecto.

Sin embargo, el clima es uno de los factores que se describen con menor detalle en los proyectos ejecutivos de restauración, y la mayoría de los proyectistas se limita a copiar lo que señalan las fuentes oficiales para la zona. En México, la descripción del clima de Köppen modificado por Enriqueta García (García, 1981),

proporciona un muy buen acercamiento al clima del lugar; sin embargo, se requiere calcularlo para la estación climática más cercana y aún con ello, la descripción climática no proporciona elementos sobre el balance hídrico, que es indispensable para la restauración del predio.

Un esquema interesante del balance hídrico que se puede usar con buena aproximación a la realidad es el que propone Thornthwaite, ya que permite calcular la evapotranspiración y hacer el balance. Aunque la evapotranspiración es a través de fórmulas y el modelo fue diseñado para zonas costeras y además supone una humedad aprovechable en el suelo de 10 cm (cosa que rara vez sucede en los suelos de México), el método es bueno y puede hacerse el balance hídrico usando el mismo procedimiento, pero sustituyendo los valores por la evapotranspiración medida o con otros métodos de estimación más precisos y el valor de la humedad calculado conforme a las propiedades del suelo, tal como ya se explicó antes.

El procedimiento para el cálculo del balance hídrico mediante el método de Thornthwaite, explicado por Velázquez y Gómez (1997) es el siguiente:

Se requieren los datos de precipitación y temperatura, mismos que se pueden obtener de las normales climatológicas para la estación más cercana al proyecto.

Se tabula la temperatura y la precipitación, transformándola de mm a cm, para que corresponda a la fórmula de Thornthwaite, posteriormente se calcula la evapotranspiración en dos pasos.

Primero, se calcula el índice de calor, de acuerdo a lo siguiente:

Índice de Calor (IC)

Está dado por la siguiente fórmula:

$$ICM = \left(\frac{TE}{5} \right)^{1.514}$$

Donde:

ICM = Índice Calor Mensual

TE = Temperatura media mensual

Los valores de índice de calor se tabulan y se suma para obtener el índice de calor anual (ICA).

Aunque la fórmula del cálculo de la evapotranspiración de Thorntwaite, no separa el cálculo del índice de calor, es necesario hacerlo por separado para poder obtener el índice de calor anual, que se usa para los cálculos posteriores.

Una vez calculado el índice de calor anual, se procede al cálculo de la evapotranspiración a través de la siguiente fórmula:

$$EV = 1.6 * \left(\frac{10 * TN}{ICA} \right)^{(0.000000675 * ICA^3 - 0.0000771 * ICA^2 + 0.01792 * ICA + 0.49239)}$$

Donde:

EV = Evapotranspiración mensual sin corregir en cm

TN = Temperatura media mensual en °C

ICA = Índice de Calor Anual

El cálculo para una estación en particular puede quedar de la manera indicada en el Cuadro 3:

Cuadro 3.- Cálculo del clima de acuerdo a Thornthwaite para la estación de Cárdenas, Tabasco.

Elementos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura	22.9	23.7	25.9	28	29	28.6	28	28	27.5	26.3	24.7	23.4	26.3
Precipitación mm	137.5	90.8	43	51	69.7	217.2	172.3	232.1	339	344.9	212.7	136.1	2046.3
Precipitación cm	13.75	9.08	4.3	5.1	6.97	21.72	17.23	23.21	33.9	34.49	21.27	13.61	204.63
+Índice de Calor (ICA)	10.01	10.55	12.06	13.58	14.32	14.02	13.58	13.58	13.21	12.35	11.23	10.35	148.8
Evapotranspiración potencial mensual sin corregir	7.80	8.85	12.27	16.34	18.59	17.67	16.34	16.34	15.29	12.98	10.31	8.45	161.24
<i>Factor de corrección</i>	<i>0.96</i>	<i>0.90</i>	<i>1.03</i>	<i>1.05</i>	<i>1.12</i>	<i>1.10</i>	<i>1.13</i>	<i>1.10</i>	<i>1.02</i>	<i>1.00</i>	<i>0.94</i>	<i>0.95</i>	
Evapotranspiración potencial mensual corregida	7.49	7.97	12.64	17.16	20.82	19.43	18.47	17.98	15.60	12.98	9.69	8.03	168.25
Humedad almacenada	10.00	10.00	1.66	0.00	0.00	2.29	1.05	6.29	10.00	10.00	10.00	10.00	
Movimiento de humedad	0.00	0.00	-8.34	12.06	13.85	2.29	-1.24	5.23	3.71	0.00	0.00	0.00	

Un ejemplo de la representación gráfica del climograma se muestra en la Figura 10, que muestra que cuando la línea que representa a la precipitación supera a la evapotranspiración potencial, nos indica que la humedad en el suelo es suficiente y se pueden iniciar las labores de siembra o reforestación.

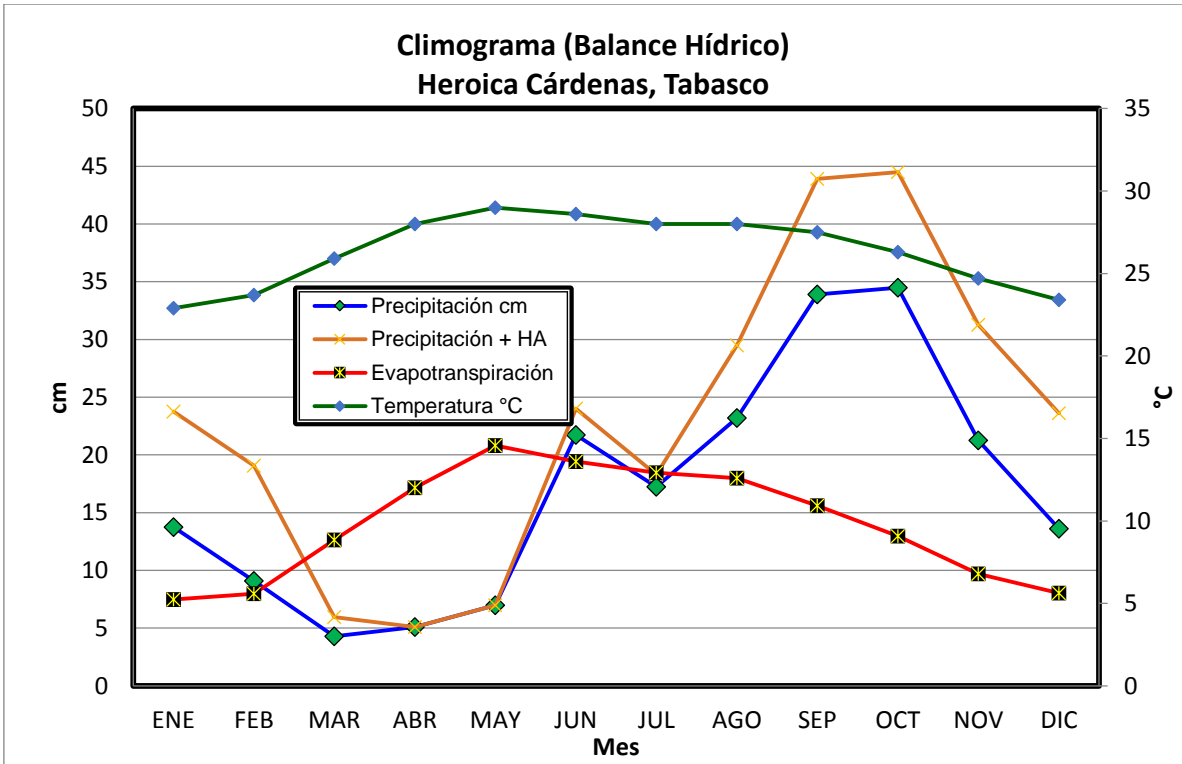


Figura 10.- Representación gráfica del climograma para Cárdenas, Tabasco

En el ejemplo en particular se puede notar claramente la sequía intraestival, conocida localmente como canícula y que de no conocerse puede tener efectos catastróficos en la reforestación. Un caso de una canícula prolongada es la ocurrida en el 2014 en dicha estación, como se muestra en la gráfica de la Figura 11:

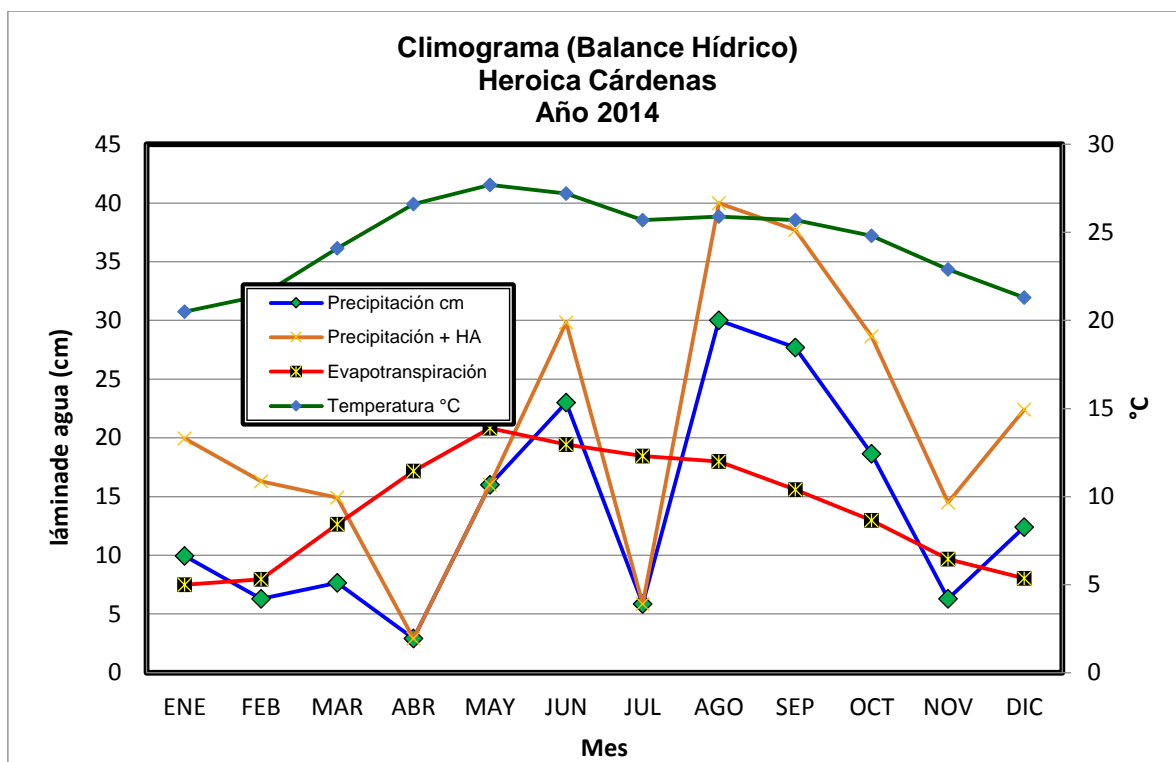


Figura 11.- Representación gráfica del climograma para Cárdenas, Tabasco, donde se nota la presencia de sequía intraestival en 2014.

En la gráfica se observa una sequía muy prolongada desde marzo, y aunque en junio la precipitación supera la evapotranspiración, en julio cae nuevamente, comportándose de manera atípica a la distribución habitual en el periodo histórico.

La descripción del clima de acuerdo a Koeppën, modificado por Enriqueta García, correspondería a la siguiente fórmula:

Am w'' i' g

Cálido húmedo con lluvias en verano, con influencia de monzón, con presencia de sequía intraestival, con poca oscilación térmica de las temperaturas anuales y marcha de la temperatura tipo Ganges.

La descripción climática es bastante detallada, sin embargo, no aporta elementos suficientes para planear la restauración del área.

La ventaja de realizar el balance hídrico de acuerdo a Thorntwaite es que permite inferir de mejor manera el periodo húmedo del suelo, además si se conoce con detalle la evapotranspiración de una especie en particular y los datos de humedad del suelo, como lo vimos anteriormente, se puede realizar un balance hídrico con mucha precisión.

Un factor que se debe considerar también y que el balance hídrico de Thorntwaite permite conocer es la distribución de la lluvia, ya que en la restauración no solo es importante la precipitación, sino también su distribución a lo largo del año. Esto es de particular importancia para la restauración de selvas secas, que tiene muy marcada la época de lluvias y si no se planta en tiempo y con suficientes elementos auxiliares como materia orgánica, retenedores de humedad, entre otros, la probabilidad de éxito de la reforestación es baja. En figura 12 se puede ver la distribución de la lluvia para la estación de Arriaga, Chiapas, donde a pesar de que la cantidad de lluvia es alta (1,510mm), su distribución es solo durante 4 meses, lo que dificulta la restauración de la selva seca. Si a eso se suma que las selvas secas están normalmente asociadas a suelos arenosos y con un alto porcentaje de pedregosidad en el perfil, la cantidad de agua que pueden retener es mínima y la temporada de desarrollo y crecimiento vegetal se da sólo en la temporada de lluvias.

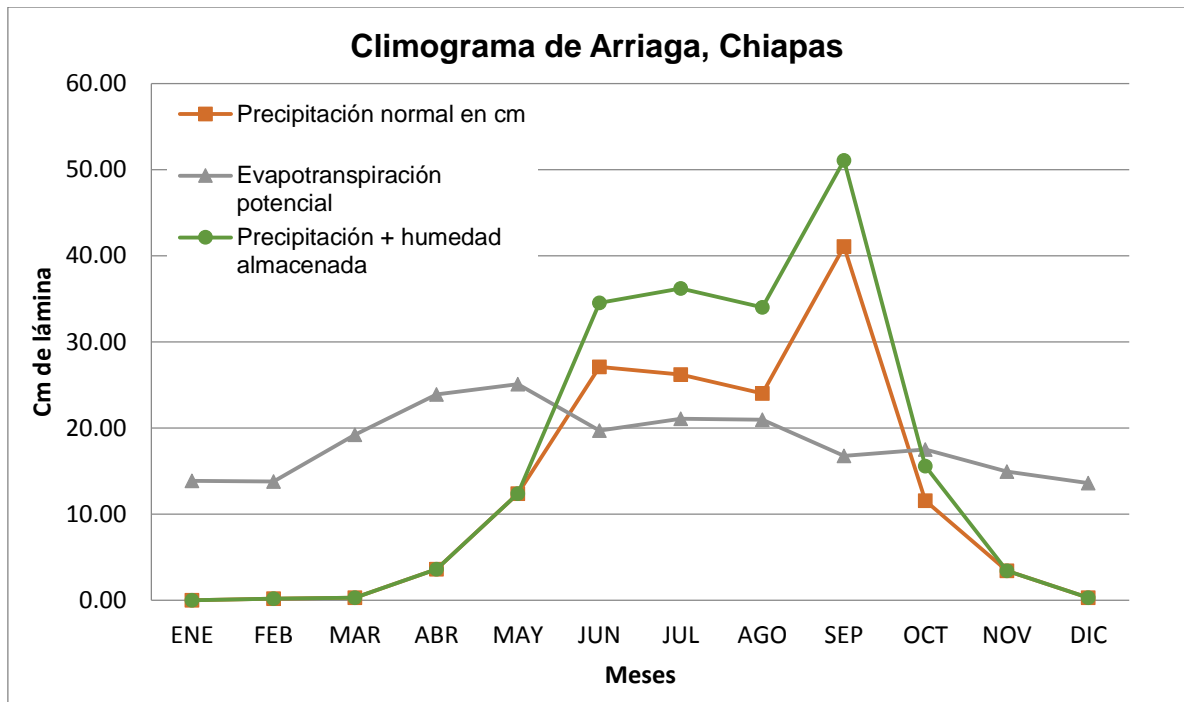


Figura 12.- Representación gráfica del climograma para Arriaga, Chis.

En el climograma se puede observar que el periodo húmedo empieza en mayo y continúa hasta octubre; sin embargo, existe canícula entre julio y agosto, la que de ser pronunciada en algún año puede reducir la humedad bajo los niveles de evapotranspiración y propiciar la muerte de la planta reforestada.

El periodo seco inicia a finales de octubre y es muy acentuado desde diciembre hasta abril, por lo que se deben pensar en un auxiliar de humedad o riegos de auxilio.

2.8. Intensidad de la lluvia

Otro factor de suma importancia que es muy importante es la intensidad de la lluvia, cuyo valor indica la potencialidad de la lluvia para ocasionar procesos erosivos en el suelo (Figueroa *et al.*, 1991). En México, dado que más del 90% de las lluvias son de carácter monzónico, la intensidad de la lluvia es un factor que se debe considerar para los cálculos de erosión del suelo y sobre todo para la estimación de escurrimientos superficiales.

Debido a que no se cuentan con datos de intensidad de la lluvia para la mayoría de las estaciones climatológicas, el valor de lluvia máxima en 24 horas es un muy buen indicador para el cálculo posterior del escurrimiento superficial.

El manual de obras y prácticas “Protección, Conservación y Restauración de Suelos Forestales”, publicado por la CONAFOR, explica a detalle el procedimiento para calcular el periodo de retorno, la probabilidad de lluvia y los escurrimientos superficiales de acuerdo al método de las curvas numéricas. (CONAFOR, 2013).

2.9. Temperatura

Aunque en el balance hídrico la temperatura es un factor que se toma en cuenta para el cálculo de la evapotranspiración, es importante revisar también las temperaturas mínimas y máximas extremas que pueden afectar de manera negativa los proyectos de restauración forestal.

En áreas forestales de clima templado es un error común realizar la reforestación en bajíos naturales de los terrenos, donde las temperaturas suelen ser las más frías y el pH más alto, lo que provoca la muerte de las plantas.

2.10. Descripción de la Vegetación

Conocer la vegetación existente en el área donde se realizará el proyecto de restauración y en la zona aledaña a ella es de primordial importancia ya que nos permite inferir el estado sucesional en que se encuentra el ecosistema.

De acuerdo con Begon *et al.* (2006), una comunidad puede ser definida en una escala dentro de una jerarquía de hábitats. Las comunidades pueden ser reconocidas en una gran variabilidad de niveles, todos igualmente legítimos.

Muchos ecólogos algunas veces consideran todos los organismos que existen juntos en un área; aunque esto es muy difícil de llevar a cabo y se requiere un

grupo de taxónomos; otros se restringen al estudio de un simple grupo taxonómico (insectos, aves, árboles).

Para caracterizar de manera sencilla la vegetación en un proyecto de restauración forestal, basta describir la vegetación al mayor detalle posible, considerando árboles, arbustos y herbáceas. El detalle con el que se describa cada grupo dependerá del ecosistema que se pretende restaurar: en el caso de un bosque la atención se centrará en los árboles, mientras que en un chaparral será en los arbustos y en un pastizal será en las especies herbáceas.

Una forma de caracterizar una comunidad es contar o enlistar las especies que están presentes. A la cantidad de especies presentes se le denomina riqueza y eventualmente se compara con otros sitios de vegetación similar, en donde se levanta el mismo tamaño del área, el mismo tiempo de muestreo, no se deben comparar métodos distintos o levantamientos realizados en épocas distintas del año.

La riqueza y distribución (equidad) combinada, determinan la biodiversidad de una comunidad.

El solo conteo de la cantidad de individuos no siempre es suficiente; para plantas o árboles es suficiente, pero para animales no siempre es representativo. En plantas a veces se usa la biomasa producida (o una variable asociada como área basal) por cada especie para tener un patrón comparable (Begon *et al.*, 2006).

Para la restauración forestal se requiere un sitio que represente el ecosistema de referencia que sirva de guía para inferir la trayectoria que debe seguir nuestra restauración. Clewell y Aronson (2013) mencionan que los proyectos de restauración ecológica empiezan a partir de una representación de la naturaleza. Esta representación es llamada referencia ecológica y revela el estado del ecosistema e indica lo que se conoce de los procesos subyacentes.

Los procesos ecológicos funcionan dentro de un rango normal de variación que es soportado o controlado por una comunidad específica de plantas. Los

procesos primarios importantes son la funcionalidad hidrológica (captura, almacenamiento y redistribución de la precipitación pluvial), la captura y transformación de la energía (conversión de la luz solar en materia vegetal y animal) y el ciclaje de nutrientes a través de los factores bióticos y abióticos (Clewell y Aronson, 2013).

Un índice sencillo para la medición de la biodiversidad, es el índice de diversidad de Simpson. Este es calculado por la determinación, para cada espacio, de la cantidad de individuos o biomasa de cada especie y su contribución al total de la muestra. El índice de Simpson representa la probabilidad de que 2 individuos seleccionados aleatoriamente en una comunidad correspondan a la misma especie.

$$D = \sum_{i=1}^s P_i^2$$

P_i = abundancia proporcional de la especie; representa la probabilidad de que un individuo de la especie i esté presente en la muestra, siendo entonces la sumatoria de P_i igual a 1.

$$P_i = \frac{n_i}{N}$$

N_i = número de ejemplares por especie i

N = número total de individuos para todas las s especies en la comunidad

En los proyectos de restauración forestal para compensación ambiental, es necesario calcular el índice de Simpson para un área relicto o con poca perturbación, este sitio se conoce como ecosistema de referencia, cercana al sitio donde se realizará el proyecto de restauración y calcular también el índice de

Simpson para el área que se pretende restaurar, la forma más adecuada de hacerlo es mediante un sitio circular de 500 m² (radio de 12.62 m). El cálculo nos permitirá conocer la vegetación del sitio original (referencia) y del sitio en restauración, el sitio de referencia nos permitirá conocer cuáles son las especies que deberían existir y por lo tanto las que se proponen reforestar para restaurar el terreno. Es importante tener claro que no siempre es posible plantar todas las especies que existen en el sitio relicto, y esto es porque en el sitio degradado ya no se tienen las condiciones de suelo que harán posible la proliferación de la vegetación en la misma calidad y cantidad que en el sitio relicto, por lo que se debe tener cuidado en el planteamiento de las especies y densidades de plantación.

Por ejemplo, se levantaron dos sitios relicto en el Estado de Durango (cuadros 4 y 5), a los cuales se les calculó el índice de Simpson, encontrándose lo siguiente:

Cuadro 4.- Cálculo del Índice de Simpson para un sitio del Ejido La Luz, Durango, Dgo.

Especie	No. de Individuos	<i>P</i>	<i>P</i> ²
<i>Pinus engelmannii</i> Carr	20	0.45	0.207
<i>Pinus cooperi</i> CE Blanco	15	0.34	0.116
<i>Quercus</i> sp.	6	0.14	0.019
<i>Juniperus</i> sp.	3	0.07	0.005
Total	44	1.00	0.346

Cuadro 5.- Cálculo del Índice de Simpson para un sitio del Ejido Rodríguez Puebla, Durango, Durango.

Especie	No. de Individuos	P	P^2
<i>Pinus engelmannii</i>	20	0.21	0.0453
<i>Pinus cooperi</i>	2	0.02	0.0005
<i>Pinus leiophylla</i> Schl. et Cham	6	0.06	0.0041
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltl	3	0.03	0.0010
<i>Pinus durangensis</i> Ehren	8	0.09	0.0072
<i>Quercus</i> sp.	20	0.21	0.0453
<i>Juniperus</i> sp.	10	0.11	0.0113
<i>Arbutus</i> sp.	13	0.14	0.0191
<i>Arctostaphylos</i> sp.	10	0.11	0.0113
<i>Agave</i> sp.	2	0.02	0.0005
Total	94	1.00	0.1455

Los datos muestran que el sitio 2 (Cuadro 5) es más diverso que el sitio 1 (Cuadro 4), ya que el índice de Simpson es menor (cerca de 0). Dado que el sitio de muestreo es de 500 m², la cantidad de individuos por hectárea sería de 880 y de 1880 para el sitio 1 y 2 respectivamente; sin embargo, al usar esos datos para plantear un esquema de densidad de reforestación se debe de tener cuidado, ya que las condiciones de degradación del sitio a restaurar no serían capaces de

soportar densidades tan elevadas como las de los sitios relicto y algunas plantas como las de los géneros *Arctostaphylos* y *Arbutus*, se comportan como oportunistas y a veces como invasoras, por lo cual no es necesario considerarlas en un proyecto de restauración. No obstante, el índice de Simpson se puede usar como un buen indicador para las proporciones que hay de cada especie a tomar en cuenta para la reforestación, es decir el valor P se puede tomar como el porcentaje a reforestar de cada especie y establecer las densidades adecuadas al terreno degradado.

En los proyectos de restauración forestal, el índice de Simpson permite comparar el sitio al inicio de la restauración y durante el transcurso de la restauración que mínimamente debe durar 5 años, para lograr la que el ecosistema se ubique en la trayectoria de restauración que se planteó al inicio del proyecto. Es importante señalar que para la caracterización adecuada de un sitio relicto se requiere levantar varios sitios de muestreo.

También se requiere reportar el tipo de vegetación de acuerdo con la clasificación del INEGI y además reportar la vegetación que se levantó en el sitio más cercano del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2017), aun cuando se reporten estos tipos de vegetación, es necesario la descripción de la vegetación encontrada en campo y las condiciones de dicha vegetación o la vegetación que, de acuerdo al clima, suelo y nivel de la degradación debería de existir.

El primer paso es estimar el mismo o los mismos indicadores en ambos sitios como se muestra en el cuadro 6.

Cuadro 6.- Comparación entre el sitio de referencia y el sitio a restaurar.

Atributo / indicador	Sitio de referencia	Sitio a restaurar
Cobertura vegetal herbácea	60 %	20%
Suelo desnudo	20 %	50%
Tipo de especie dominante	Navajita y banderita	Gatuño y zacate burro

Causal de degradación o cambio	N/a	Sobrepastoreo
---------------------------------------	-----	---------------

Una vez establecidos estos indicadores se puede inferir acerca de los posibles tratamientos del sitio degradado para acercarlo a la condición del sitio de referencia y establecer un diagrama de flujo con los posibles alcances de la restauración del terreno.

2.11. Descripción de la degradación del terreno existente en el sitio a restaurar

Es necesario describir al mayor detalle posible las condiciones en que se encuentra el terreno en el cual se implementará el proyecto de restauración forestal. Primeramente, se requiere señalar el uso que se le da al terreno; por ejemplo, normalmente muchos terrenos en los que se implementa la restauración forestal han tenido un uso agropecuario y son agostaderos sobrepastoreados o terrenos agrícolas abandonados por su baja productividad.

Es importante describir la vegetación que existe en el predio a restaurar y compararla con la del sitio de referencia, realizando las anotaciones que resulten pertinentes. Puede ser que el sitio a restaurar resulte con índice de Simpson menor (más diverso) que el sitio de referencia, pero es necesario describir las especies presentes, ya que en los sitios degradados es común la presencia de especies oportunistas o invasoras, que, aunque forman parte del proceso de sucesión vegetal, en muchas ocasiones mantienen los ecosistemas en un estado que no permite la transición al siguiente estado. Es el caso, por ejemplo, de la invasión por manzanita o manzanilla (*Arctostaphylos pungens* HBK) en los bosques de la Sierra Madre Occidental de Durango y Chihuahua, ocurrida después de un incendio severo (Figura 13).



Figura 13. Bosque de pino incendiado e invadido por manzanilla (*Arctostaphylos pungens*). Ejido Catedral, Guadalupe y Calvo, Chih., Noel Chávez

La degradación de la vegetación también se puede inferir de acuerdo con las características que presenta respecto al sitio de referencia, comparando el desarrollo en altura, diámetro y morfología, así como la presencia de individuos juveniles y de regeneración natural. En muchos bosques sobrepastoreados no se observa la presencia de regeneración debido a que el ganado no permite el establecimiento de la regeneración por el pisoteo.

2.12. Degradación del suelo

Un aspecto poco descrito pero muy relevante para los proyectos de restauración forestal es el estado de degradación o de conservación del suelo. La formación del suelo y con ello la generación de hábitat, son dos de los principales servicios ecosistémicos de soporte que permiten la generación del resto de los servicios

ecosistémicos, tal como ha sido reconocido por la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Así, el estado de degradación del suelo, de manera indirecta, nos permitirá inferir el nivel o estado de desarrollo de la vegetación que se establezca, que podrá alcanzarse con el proyecto de restauración forestal, sabiendo que un terreno cuyo suelo presenta un grado de degradación no permitirá que la vegetación que reforestemos o sembremos alcance un óptimo desarrollo.

La metodología de la Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre, ASSOD (SEMARNAP, 2002), combinada con los cálculos obtenidos a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Figuroa *et al.*, 1991); constituyen una excelente herramienta para la caracterización de la degradación del terreno, ya que mientras la primera permite conocer el tipo de degradación al indicar si se trata de erosión laminar, canalillos o cárcavas, así como su agente causal y tasa de incremento o disminución, la segunda nos permite conocer la magnitud de la erosión, en toneladas por hectárea por año, con lo que se pueden realizar cálculos para establecer las metas de restauración del ecosistema, e inferir la valoración de los servicios ambientales.

La metodología ASSOD es semicuantitativa por lo que depende en sumo grado de la apreciación de la persona que hace la descripción, la cual debe contar con un sentido común educado y respaldado con conocimientos científicos que le permitan describir de la manera más acertada posible, el tipo y grado de degradación, apoyada en herramientas geográficas y validada con una adecuada correlación de campo, que realmente proporcione información útil para elegir la mejor herramienta de restauración. Por lo tanto, es necesario reflexionar sobre cuál es realmente el tipo de degradación que se está describiendo. Por ejemplo, al describir un terreno ubicado en una ladera de un cerro, con evidencias de sobrepastoreo, la descripción de la degradación podrá variar dependiendo de la persona que realice el levantamiento de los datos. Tal vez un especialista en suelos lo describiría como erosión hídrica con pérdida del suelo superficial, mientras que un biólogo probablemente lo referiría como degradación química por declinación de la fertilidad y otro especialista, probablemente elegiría degradación

física por compactación. Aun cuando la causa de todo es el sobrepastoreo, la manera en que se describa y clasifique será de gran importancia, puesto que de ello derivarán las posibles soluciones y, por ejemplo, al aceptar la erosión hídrica, la solución sería la implementación de obras y prácticas de control de la erosión de suelos; en cambio, si asumimos que es declinación de la fertilidad, se pensaría en aplicación de nutrimentos, fertilizantes y materia orgánica,; mientras que si concluimos que se trata de degradación física, entonces la solución podría ser la descompactación a través de medios mecánicos y la agregación de materia orgánica, y obviamente para todos los casos, el manejo adecuado del ganado. No obstante, la mejor solución sería la combinación de todas las técnicas, pero en el caso de que la persona que describa la degradación no sea la misma que realizará la restauración, entonces la persona que realiza la descripción de la degradación deberá acompañarla con datos de campo que sustenten su dicho, como la presencia de pedestales, porcentaje de suelo desnudo, contenido de carbono o materia orgánica y referencia para un sitio similar pero conservado, disminución de la densidad aparente o resistencia a la penetración, presencia de especies invasoras y demás datos que apoyen a que se implemente la técnica más adecuada de restauración, de ahí la importancia de acompañar la descripción cualitativa con datos cuantitativos. La caracterización de la degradación del suelo mediante la metodología ASSOD se divide como lo señala la figura 14.

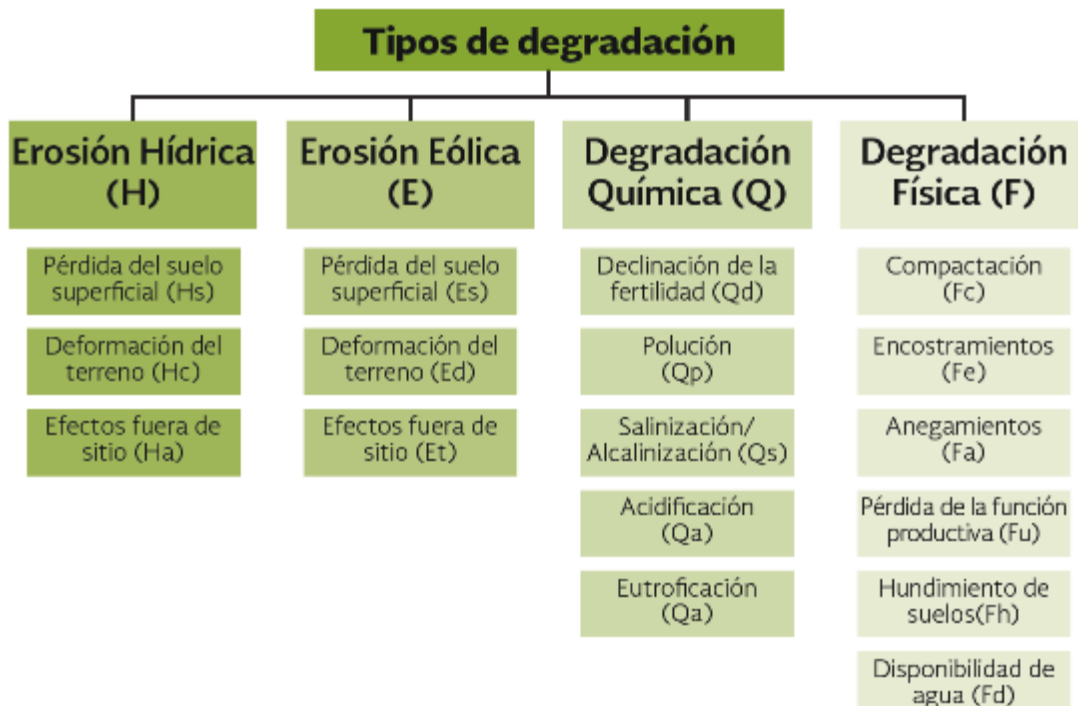


Figura 14.- Clasificación de la degradación por el sistema ASSOD, CONAFOR, 2014.

Se recomienda realizar un levantamiento de la degradación, incluyendo suelo y vegetación, en el área del terreno a restaurar, identificando claramente las zonas con características especiales de vegetación y degradación del suelo que requieran algún tratamiento especial, por medio del levantamiento de unidades de degradación del suelo (delimitadas con coordenadas), realizando la descripción de un perfil de suelo para cada una de esas unidades o al menos la caracterización en profundidad, pedregosidad en el perfil y textura, así como describir lo más extensamente posible las condiciones de degradación del suelo y asociar las unidades descritas a la caracterización inicial del terreno en cuanto a pendiente y geomorfología.

Entre otras cosas se deberá determinar lo siguiente:

- Tipo de degradación
- Grado o intensidad de la degradación.
- Suelo desnudo (%).

- Factor causal.
- Otros signos de erosión (canalillos, cárcavas, dunas, etc.)

Para los signos de erosión, en el caso de cárcavas se deberán contemplar al menos los datos mostrados en el Cuadro 7:

Cuadro 7.- Formato simple para levantamiento de datos de cárcavas

Cárcava	Coordenada		Ancho (m)	Prof. (m)	Largo (m)
	X	Y			
1					
2					
...					
n					

Cuando las cárcavas midan más de 20 m, deberá incluir la información de segmentos intermedios, los necesarios para determinar los volúmenes de obra.

2.13. Levantamiento de la cobertura de dosel y cobertura del suelo

Una de las características para la conservación es la cobertura del suelo o del piso del terreno. La cobertura del suelo es más importante que la cobertura de dosel para prevenir procesos erosivos. Se ha visto que las plantaciones forestales que no mantienen una adecuada cobertura del piso, presentan evidencias de erosión a pesar de tener una buena cobertura de dosel, Morgan (1997) señala que la precipitación directa y el drenaje foliar son responsables de la erosión por salpicadura, tal como se observa en la figura 15.



Figura 15.- Erosión en plantaciones de teca. La cobertura del suelo es muy importante para mantener la funcionalidad hídrica de un sitio, Moisés Matías.

La medición de la cobertura de copa es algo que ya se realiza de manera cotidiana en muchos estudios forestales, por medio de la proyección de copa que se observa al estar debajo de un árbol, midiendo al menos la rama más larga en cada uno de los puntos cardinales del árbol. Otra forma de estimar la cobertura de copa es a través del densiómetro, el cual estima el porcentaje de la superficie que es cubierto por el dosel (FAO, 2015).

La FAO (2015) en coordinación con la CONAFOR probó varios métodos para la medición de dosel y la cobertura del suelo forestal, determinándose dos técnicas como las más precisas. La primera a través de la medición con el densitómetro (figura 16), que es un aparato óptimo que permite tomar una lectura al dosel del bosque y posteriormente al girarlo 90 grados permite tomar la lectura (en la misma dirección que en el dosel) en el suelo, este aparato simula la trayectoria de una gota de lluvia o de un rayo de sol, e indica si la gota primero tocará una parte del dosel del bosque o seguirá su trayectoria hacia el suelo y una vez que toque el suelo, indicará si tocará suelo desnudo o algún otro material que esté cubriendo al suelo de la fuerza erosiva de la lluvia como mantillo, vegetación

rocas o ramas. La cuantificación de suelo cubierto por alguno de estos materiales es similar a la metodología de la línea Canfield o línea de intercepción de puntos.

La segunda técnica consiste en la colocación de un marco de un metro cuadrado en el suelo y tomar una fotografía perpendicular al terreno. Dicha fotografía se analiza mediante un software, el cual proporciona la cobertura del piso. La cobertura del dosel se estima por medio de una imagen de satélite de alta resolución o bien con una fotografía aérea de alta resolución como las obtenidas por medio de un dron.



Figura 16.- Uso del densitómetro para medición de cobertura del piso y de dosel, Samuel García.

2.14. Ruta de restauración del predio

Stringham *et al.* (2003), recopilaron información y sintetizaron modelos de estados y transiciones con los umbrales para inferir las diferentes fases por las que pasa un ecosistema de acuerdo a los disturbios o el manejo que se le dé a los mismos. Basado en los modelos de estados y transiciones el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, desarrolló la Descripción de Sitios Ecológicos (NRCS, 2017).

De acuerdo a cada ecosistema se definen los estados en los cuales el ecosistema es estable, teniendo dos o más fases dentro del mismo estado, pero que coexisten de acuerdo a la resistencia y resiliencia del ecosistema (Figuras 17 y 18), cuando ocurre algún disturbio cuya intensidad supera la resistencia y resiliencia del ecosistema, se traspasa un umbral que lleva al ecosistema a un nuevo estado donde nuevamente se establecen otras fases de equilibrio, si nuevamente ocurre un disturbio que supere la resistencia y resiliencia del ecosistema en este estado, se traspasará un umbral que colocará al ecosistema en un estado distinto, Whisenant (1999) menciona que esto ocurre cuando los disturbios afectan de manera importante los factores abióticos del ecosistema. Esto último ocurre con la erosión acelerada del suelo y modificación del balance hídrico entre otros.

Los modelos de estado y transición permiten inferir la ruta de restauración del predio y las posibles estrategias y acciones para lograr la restauración del predio.

Una vez que se cuenta con todos los elementos físico-biológicos del área que se pretende restaurar y de las zonas aledañas, es necesario que el proyectista infiera la ruta o las posibles rutas de restauración que seguirá, lo cual le permitirá decidir una ruta alterna en caso de que se presente alguna variación por algún factor en la restauración.

El proyectista debe inferir los posibles estados y transiciones que presentará el ecosistema que está restaurando y, de acuerdo al ecosistema de referencia, determinar el estado en que se encuentra actualmente y sus posibles estados y transiciones, asimismo ser completamente honesto al plantear a cuál estado se llegarán en la restauración y las posibles transiciones que tendrá y sus posibles avances o retrocesos y que factores los pueden causar (Caudle *et al.*, 2013).

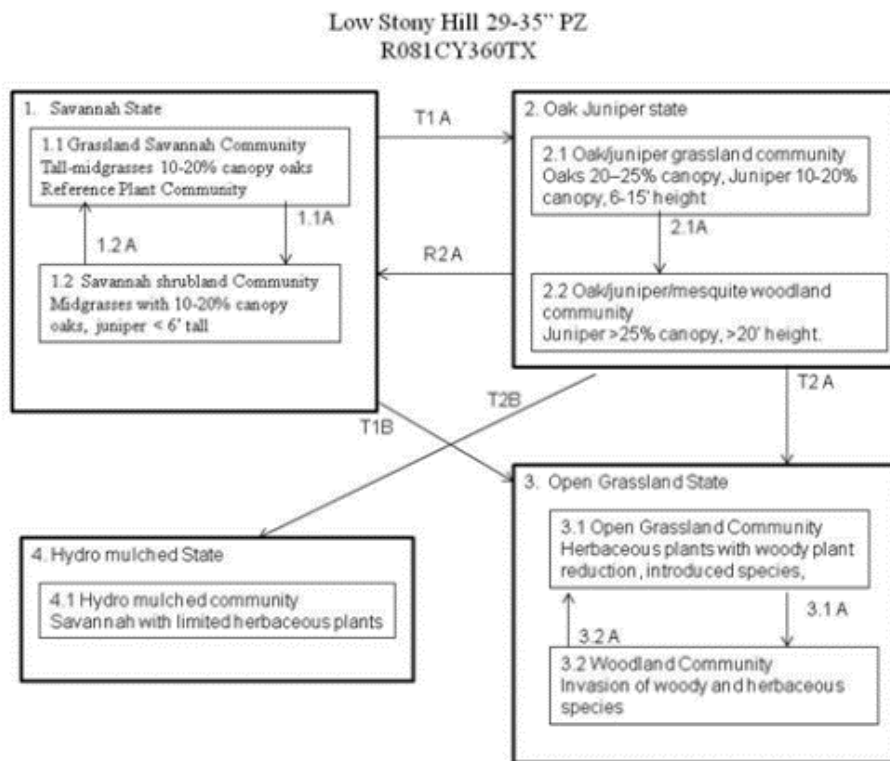


Figura 17.- Ejemplo de rutas de estados y transiciones para un sitio de Texas, USA. Fuente: Web Soil Survey.

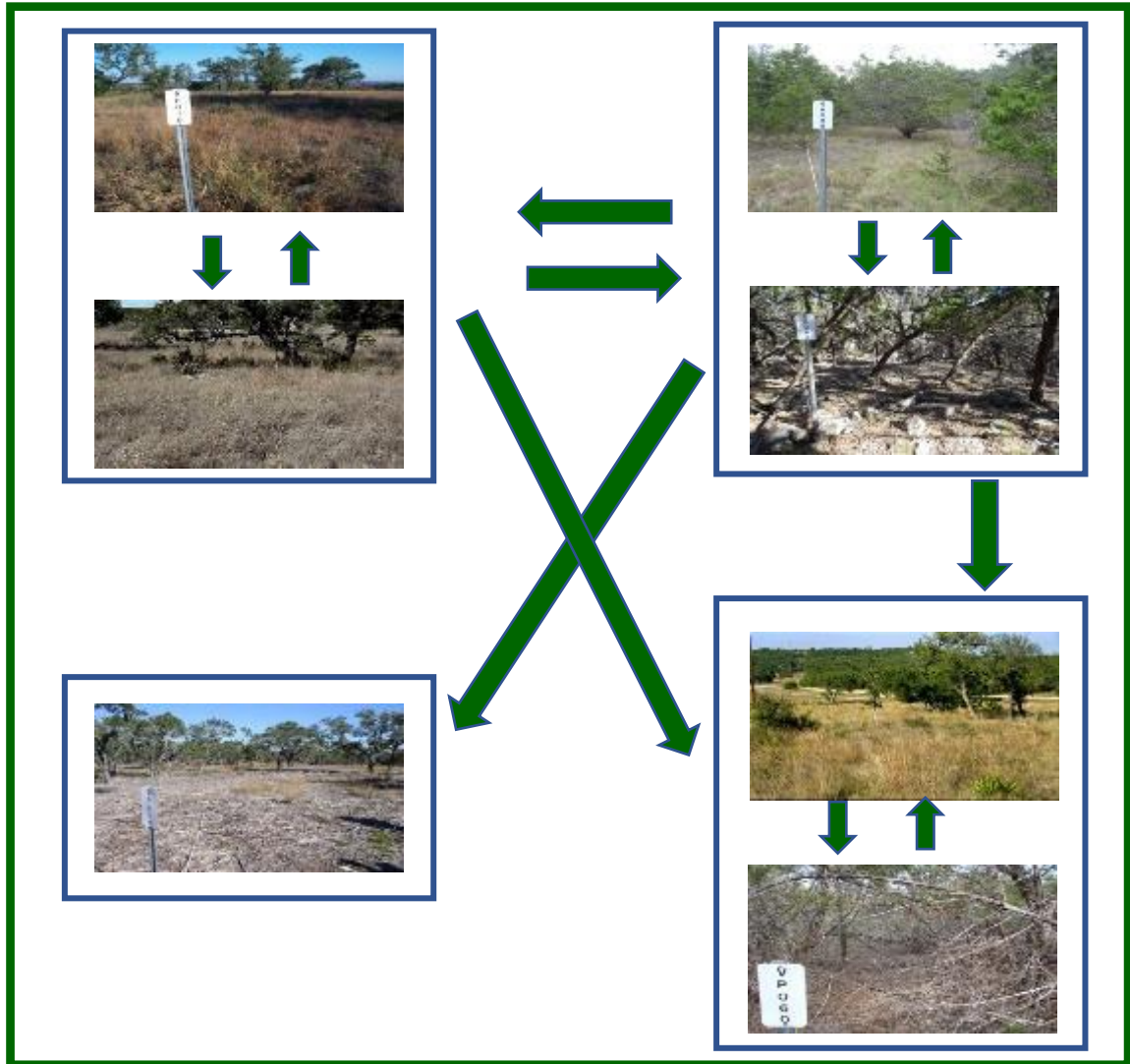


Figura 18.- Ejemplo de rutas de estados y transiciones para un sitio de Texas, USA, con fotografías de la vegetación, Fuente: Web Soil Survey.

3. Propuesta de Restauración Forestal

La propuesta debe ser acorde a las condiciones del terreno, es decir, tener relación con los datos de la degradación, forma del terreno y el clima, por lo que los apartados anteriores deberán ser considerados forzosamente antes de iniciar la propuesta técnica.

En el caso de los proyectos que apoya la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR,2014), el esquema de restauración consiste en realizar la restauración por etapas, en una primera etapa se realizan las acciones de protección del predio que se va a restaurar, estas acciones están diseñadas para el evitar el factor de disturbio, que comúnmente es el sobrepastoreo del ganado o los incendios; una segunda etapa consiste en la ejecución de acciones de control de la erosión del suelo o de captación de agua de lluvia para la reforestación; la tercera etapa consiste en la reforestación o revegetación y todos los trabajos adicionales para ello como apertura de cepas, aplicación de abonos, fertilizantes, mejoradores o enmiendas; la cuarta etapa que consiste en el mantenimiento en la cual se realizan diversas acciones como replantación, deshierbes o control de plagas. Finalmente, se deben señalar las acciones de monitoreo, las acciones y costos que se deben realizar como para de la asesoría técnica y por último definir los costos de la implementación de la restauración forestal.

Para la elaboración de la propuesta técnica una guía adecuada es la división establecida con base en la degradación (sub-áreas, unidades fisiográficas, rodales, zonas de cobertura, zonas de degradación).

A continuación de desglosan a mayor detalle las etapas.

3.1. Protección del área que se va a restaurar

Después de haber levantado el polígono del terreno a restaurar, estableciendo los límites claros, podrá definir la superficie total y perímetro del área. Las características del terreno nos permitirán definir que partes del mismo requieren

de un cercado de protección y cual es ya cuentan con él o bien no lo requieren por tener obstáculos naturales que impiden el ingreso del ganado al predio en restauración, asimismo, nos permitirá saber la extensión de las brechas cortafuego y la ubicación de las mismas.

La protección tiene como objeto controlar o limitar los factores que están provocando los disturbios y con ello la degradación del sitio, así como proteger el terreno en proceso de restauración de acciones antropogénicas que entorpezcan o afecten los trabajos de conservación y restauración, como pastoreo, fuegos provocados, vandalismo, entre otros.

La protección refuerza las acciones de conservación y restauración, permitiendo la recuperación del ecosistema (p.ej. vegetación, suelo, procesos ecológicos) y favorece una significativa disminución del tiempo en la recuperación de los terrenos deteriorados.

El asesor técnico, a partir del perímetro calculado, deberá restar del perímetro del polígono, las partes que no requieran protección, para poder calcular la necesidad real de cercado o brecha.

Es necesario indicar en un mapa la superficie del terreno con el perímetro resaltado, o la línea de protección que será requerida dentro del proyecto, así como diferenciar las brechas cortafuego del cercado, y determinar si se requieren brechas cortafuego interiores y en qué cantidad.

Con base en lo anterior, para el caso del cercado, las características recomendables son:

- 4 hilos de alambre. En caso de ganado caprino se puede sustituir el alambre de púas por malla borreguera o malla triple nudo.
- Postes al menos cada 4 metros (madera o metal), o distancias menores, sólo tener en cuenta los costos y el trabajo de colocar los postes a menor distancia.
- Separadores de los alambres de púas, para mantener los alambres a la distancia y disminuir el número de postes (figura 20).



Figura 19.- Cercado con alambre de púas y separadores, Nayeli Hernández
Todas las características específicas deben quedar plasmadas en el proyecto.

En el caso de brechas cortafuego:

- Excavación de la brecha cortafuego hasta el suelo mineral.
- Realización de obras de encauzamiento de escurrimientos y control de la erosión del suelo.
- Ancho de 4 metros. Dependiendo de las condiciones del terreno, se sugiere 3 m de ancho de brecha para zonas áridas y semiáridas.

Si las condiciones del terreno requieren otras características de protección, se deberán justificar adecuadamente en el proyecto.

3.2. Obras para el control de la erosión, captación de agua de lluvia o mejoramiento de las condiciones del suelo

En este apartado se incluyen todas aquellas obras o prácticas encaminadas a mejorar las condiciones del suelo del sitio seleccionado y que propicien el beneficio de otros elementos del ecosistema como la vegetación y la

funcionalidad hídrica del terreno (escurrimiento superficial, infiltración, almacenamiento y disponibilidad de agua), así como aquellas que detengan o reviertan procesos erosivos, entre otros.

Una gran gama de obras y prácticas están descritas en el manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales (CONAFOR, 2013). Sin embargo, no deben excluirse ningún otro tipo de prácticas que sean adecuadas para la restauración del terreno y que estén técnicamente sustentadas.

No en todos los casos se requiere la realización de obras de conservación de suelos, o al menos no en todos los casos se requieren obras de gran calado como terrazas y zanjas; en algunas ocasiones basta solo la apertura de cepas o terrazas individuales para la reforestación. Tomando en cuenta el terreno a restaurar, debemos hacer la siguiente pregunta: ¿Es necesario realizar obras de suelos? Para responder esta pregunta es necesario responder a los siguientes cuestionamientos.

- ¿Presentan los suelos un grado de degradación evidente?
- ¿Hay evidencia de pérdida de suelo?
- ¿Los procesos biogeoquímicos e hídricos se encuentran en desequilibrio debido a la degradación del suelo?
- ¿Hay evidencia de erosión laminar, canalillos y/ o cárcavas?
- ¿Las obras son la mejor alternativa para controlar la degradación evidente?

Si la respuesta es positiva a una o varias de las cuestiones anteriores, serán necesarias acciones de rehabilitación, restauración o mejoramiento de suelos.

Una vez que ya se tienen las áreas definidas por tipo de degradación (Figura 21), se procede a revisar las características de las mismas, para seleccionar la obra o actividad que contraresta la degradación que se determinó.

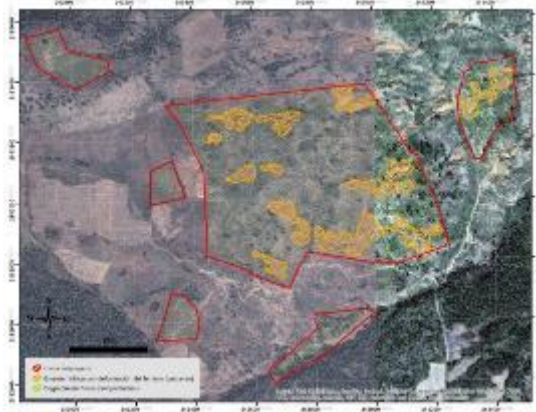


Figura 20. Representación de los tipos de degradación del suelo que requieren distintos tratamientos.

En cada unidad de intervención (como la que se diferenció por tipo de degradación), se deben observar las características más relevantes para la elección de las obras, entre ellas: pendiente, textura, profundidad del terreno y grado de erosión del suelo. Definiendo con precisión las condiciones de cada una de las áreas del terreno que se va a restaurar, es posible proponer la medida de restauración más acertada. Es necesario tomar en cuenta que las características del terreno definirán las características de la obra, pues, invariablemente la obra es la que debe adaptarse al terreno y no al revés. Muchos de los errores en los proyectos se dan por definir la obra que se realizará antes de conocer a detalle el terreno.

El proyectista debe definir con suficientes elementos lo siguiente:

- Problema principal (erosión del suelo, escasez de humedad, profundidad del suelo, degradación de la vegetación, uso y manejo que se da al terreno, entre otros)
- Nivel de degradación del ecosistema (¿se requieren acciones de ingeniería o sólo basta con suprimir el factor de disturbio?)
- Interés del dueño en la restauración (para qué quiere el terreno restaurado, qué uso posterior le dará al terreno, qué nivel de compromiso tiene para realizar las acciones tal como se le indiquen).
- Alternativas de financiamiento para la restauración (independientemente de contar con una fuente de financiamiento, el

dueño del terreno debe aportar recursos, en efectivo o en especie, para lograr la restauración).

- Manejo del terreno después de concluidas las acciones de restauración (compromiso para manejar adecuadamente el terreno restaurado).

Acciones específicas para la restauración del predio

Las acciones específicas serán la respuesta a todas las interrogantes planteadas anteriormente, y el proyectista debe diseñar las obras basadas en resolver el problema principal que haya detectado, por lo que podrá tomar decisiones como las siguientes:

Erosión y degradación del suelo: Estimar la erosión del suelo a través de la ecuación universal de pérdida del suelo y, con base en la pendiente y fórmula de cálculo de espaciamiento entre terrazas, definir la cantidad de obras necesarias para la restauración.

Modificación del balance hídrico en el predio (incremento de los escurrimientos y disminución del almacenamiento de agua en el suelo y de la infiltración): Calcular el escurrimiento superficial para una lluvia máxima en 24 horas, con un periodo de retorno de al menos 5 años y definir la cantidad de escurrimiento que requiere captarse, con esos datos y las características del tipo de obra que se va a realizar (zanjas bordo, zanjales, sistema negarim, entre otros), definir el espaciamiento y la cantidad de obras necesarias.

Erosión del suelo en zonas donde no hay deficiencia de agua: Diseñar las obras con base en la erosión y pendiente del terreno y plantear acciones de manejo de la vegetación como terrazas de muro vivo, barreras vivas, cultivo en franjas, cultivos de cobertura, entre otros.

En cualquiera de los casos siempre será preferible realizar acciones sobre el suelo (acordamiento de material vegetal muerto, barreras y terrazas de muro vivo, barreras de piedra) u obras que propicien la infiltración y almacenamiento del agua en el suelo sin invertirlo (subsoleo, roturación, arado con cinceles, arado topo, entre otros), antes que las obras que exponen los horizontes subsuperficiales (todos los tipos de zanjales). No obstante lo anterior, se deberán

hacer las obras de ingeniería necesarias aun cuando inicialmente tengan un impacto aparentemente negativo en el terreno.

Una guía adecuada para definir el tipo de obra adecuada la presenta el manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales (CONAFOR, 2013).

Habiendo estimado el tipo de obra para cada unidad de degradación (figura 22) y la cantidad de obras necesarias para la restauración del área de acuerdo al objetivo que se requiera, es necesario desglosar sus características generales (específicas para el proyecto, tales como sus dimensiones y datos precisos de cálculo),. las actividades necesarias para llevarla a cabo, los rendimientos de cada actividad, los materiales necesarios y los costos que implica la realización de las mismas.

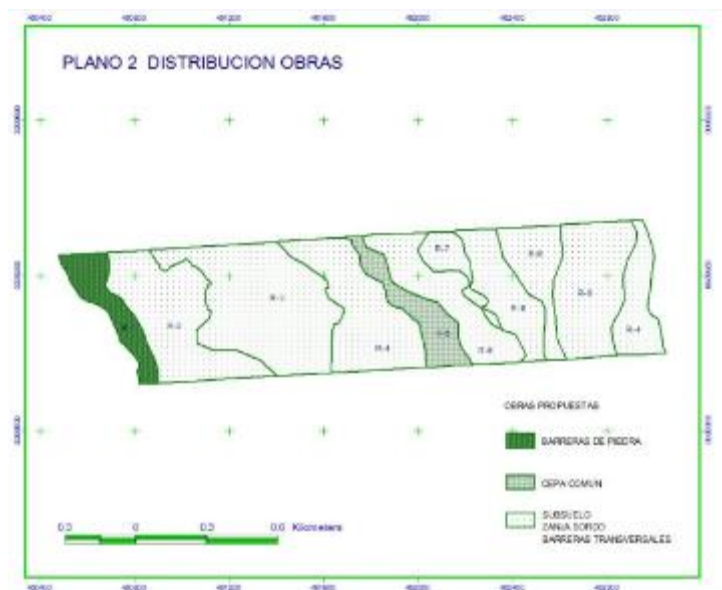


Figura 21.- Propuesta de obras de restauración de acuerdo a la degradación del terreno.

Para determinar los costos se debe conocer, además, la siguiente información:

- Costo del jornal.
- Horarios de trabajo.
- Rendimientos del jornal para cada actividad, ejemplo, excavación, recolección (según el tipo de material), marcaje de curvas, etc.
- Costos de materiales como, cemento, cal, azadón, pala, guantes, etc.
- Costos de horas máquina, transporte, etc.
- Costos de topógrafo u otro equipo especializado necesario.

A excepción de la mano de obra, se requiere revisar si los conceptos requieren de un ajuste por depreciación y determinar los rendimientos por unidad de medida para facilitar los cálculos adecuadamente. Para ello se puede consultar el documento Manual de Costos de Obras de Restauración de Suelos y Reforestación (García *et al.*, 2014). Aun cuando se tenga el manual de costos, éstos deben revisarse con sumo cuidado y ajustarlos a las condiciones reales para que sean suficientes y evitar fracasos durante la ejecución de los proyectos.

3.3. Reforestación

En los proyectos de restauración forestal se puede decir que la reforestación es prácticamente indispensable, ya que justamente se trata de restaurar el ecosistema en el menor tiempo posible, por lo cual el establecimiento de árboles en sitios degradados, es sin duda más rápido que esperar a que ocurra la sucesión vegetal natural.

En este apartado se debe contemplar todo lo relacionado con el mejoramiento, manejo o restauración de la vegetación en el terreno seleccionado. Entre las acciones relacionadas a este tema, se encuentran:

- Reforestación
- Revegetación
- Producción de planta
- Transporte de planta
- Auxiliares para el establecimiento de la reforestación

Puesto que ya se definieron las unidades físicas para la aplicación de los diferentes tratamientos de restauración, clasificados con base en los niveles de degradación del suelo y pendiente del terreno, se deberá analizar para cada unidad si es necesario el mejoramiento, manejo o restauración de la vegetación. A partir de la información obtenida de las características de la vegetación y el ecosistema de referencia definir:

- Especies necesarias
- Densidades de plantación
- Arreglo de la reforestación

Teniendo en cuenta el diseño de la plantación, es más fácil calcular la densidad, siempre y cuando tome en cuenta la cantidad de vegetación existente y la cantidad de agua disponible para la planta, ya sea por lluvia, captación en obras o riegos de auxilio posibles, que ayuden a la planta a sobrevivir en las condiciones del sitio.

El tipo de especies puede elegirse de la información proporcionada por el sitio de referencia. Las proporciones de plantas de cada especie deben considerarse preferentemente de los resultados del índice de Simpson estimados en el sitio de referencia, de acuerdo al porcentaje de existencia de dicha especie en el sitio de referencia, aunque con densidades menores, ya que el área a restaurarse carece de las condiciones necesarias en cuanto a suelo para soportar las densidades del sitio de referencia.

La distribución espacial de las especies que se reforestarán también debe obedecer a la distribución de las especies en el ecosistema de referencia.

La especie debe cumplir dos o más de las siguientes condiciones:

- Ser nativa del sitio o al menos de la región.
- Soportar las condiciones actuales del lugar (precipitación, temperatura, incidencia de los rayos del sol, pendiente del terreno, profundidad del suelo, cantidad de nutrimentos en el suelo, entre otras).
- Ser de fácil reproducción (semilla o estaca), o encontrarse disponible para compra o trasplante.
- Que su propagación no inhiba a otras especies nativas, a menos que las especies que existan en el sitio sean o se comporten como invasoras.
- Ser especie clave, paraguas y/o bandera (que propicien la sucesión vegetal).

Evitar:

- Elegir una especie que no sea propia del sitio, aunque las condiciones del lugar sean idóneas para esa especie. La introducción de otras especies puede generar un desequilibrio en el sistema, a menos de que no haya otra alternativa por las condiciones muy avanzadas de degradación del sitio.
- Comprar planta en malas condiciones o en malas condiciones de producción.

Se puede elegir una sola especie cuando la vegetación en el sitio de referencia así lo señale y se cuente con los suficientes elementos para suponer que las otras especies se establecerán como parte del proceso de sucesión vegetal. Se pueden incluir especies arbóreas, herbáceas y arbustivas, y si es necesario gramíneas. Al igual que en el apartado de obras, se deben incluir los cálculos de rendimiento de cada actividad necesaria por obra, los insumos, rendimientos y costos para llevar a cabo la reforestación, e indicar, en un mapa, el diseño de la plantación, las especies y sus densidades para cada área de intervención.

3.4. Mantenimiento

Dependiendo de la elección de obras de suelos y reforestación, se requiere considerar actividades de mantenimiento para que las obras persistan en sus características, capacidad y condiciones los primeros años del proyecto. De esta manera se lograrán las metas de porcentajes de sobrevivencia y funcionalidad de las obras.

Las actividades de mantenimiento más comunes son:

- Replantación.
- Recomposición de obras u obras nuevas (ejem. ripeo entre bordos).
- Fertilización.
- Riegos de auxilio.

Todas las acciones de mantenimiento deberán especificar sus rendimientos y las actividades necesarias para llevarlas a cabo, así como ser cuantificables y establecer metas específicas.

3.5. Monitoreo de la restauración

El monitoreo consiste en realizar una evaluación periódica de los recursos del sitio y su evolución, así como de la funcionalidad de las acciones de restauración. Por lo tanto, el proyectista deberá al menos elegir un sitio por cada unidad fisiográfica o zona que haya determinado con un tipo de degradación distinta o tratamiento de restauración distinto, dentro del proyecto que permita evaluar factores como:

- Incremento de la cubierta del suelo.
- Capacidad de almacenamiento de las obras.
- Retención de sedimentos.
- Incremento en la aparición y persistencia de especies indicadoras.
- Retorno de fauna.

- Incremento de carbono en el suelo.
- Incremento de la velocidad de infiltración del agua en el suelo.
- Incremento en la cantidad de especies herbáceas y arbustivas que aparecen una vez que se suprime el factor de disturbio.

En el levantamiento de datos pueden observarse los diferentes tratamientos para el proyecto, por cada unidad de degradación, por lo cual si se establece una unidad de monitoreo para cada tratamiento de restauración se tendrán mejores estimaciones de la restauración y permitirá realizar los ajustes necesarios para el mejor funcionamiento de las técnicas de restauración, en caso de que por los costos del monitoreo resulten muy altos y no sea posible establecer un sitio por cada unidad, se puede definir un sitio que sea representativo para realizar la evaluación periódicamente.

El levantamiento de datos del sitio de referencia (preferentemente relicto) será el patrón de comparación y se tomarán datos del sitio a restaurar que permitan evaluar si hay un progreso importante de sucesión o mejoramiento.

Dentro de las metodologías más comunes que pueden utilizarse se encuentra el Método de la Línea Canfield, que consiste en lo siguiente:

1. Establecer una baliza o mojonera indicando el punto en el que se tomará la ubicación en coordenadas geográficas y se tomarán cuatro fotos, una en cada dirección de los puntos cardinales.
2. Levantamiento de datos de vegetación. A través de la línea Canfield, deberá registrar la cobertura del suelo a cada metro en 100 m (o 100 pasos) anotando el rumbo, indicando la especie encontrada, suelo desnudo, ramas, hierba o rocas.
3. Se pueden establecer varillas para monitorear la erosión del suelo midiendo con un vernier la altura de las varillas cada 6 meses. También se pueden establecer lotes de escorrentía y erosión.

Estos puntos son los mínimos necesarios para realizar el monitoreo; además, podrá agregar todos los que sean necesarios para conocer la evolución del sitio de manera integral.

Se sugiere seguir las mismas metodologías empleadas en el levantamiento de datos del sitio de referencia. Además, se pueden colocar cámaras trampa para monitorear el retorno de la fauna al área de restauración.

3.6. Asesoría técnica

El éxito de los proyectos depende en gran medida del seguimiento que se le dé a los mismos, por lo cual la asesoría técnica especializada es de gran importancia para lograrlo, además de que los asesores técnicos son los encargados de sugerir modificaciones o mejoras a los mismos en cuanto se adviertan posibles problemas.

La asesoría técnica consiste en el conjunto de actividades que son necesarias para desarrollar con éxito los proyectos, tales como: capacitación, asesoría, gestión, evaluación, monitoreo, entre otras.

En este apartado se deberán desglosar todas las actividades que un técnico deberá realizar para que se lleven a cabo las obras, desde la elaboración del proyecto, el seguimiento y arranque de las obras, la producción de planta, el establecimiento de la reforestación, seguimiento al mantenimiento, supervisión de producción de planta y el monitoreo.

Es necesario conocer los kilómetros de recorrido para llegar al predio, el rendimiento del vehículo utilizado, los costos de gasolina, el costo horario de un vehículo, los honorarios profesionales y los gastos de hospedaje y alimentación cuando se requiera. Se ha observado que lo más conveniente es que al menos dos personas proporcionen la asesoría técnica y realicen las mediciones y estimaciones necesarias.

El asesor técnico debe definir las visitas necesarias al predio y las visitas para gestiones con el dueño, así como las gestiones en dependencias, permisos y reuniones necesarias para implementar el proyecto.

El asesor debe ser honesto en las acciones de asesoría técnica que debe realizar y cumplir a cabalidad con lo que proponga realizar.

3.7. Calendario de ejecución de actividades

Finalmente, se deberán calendarizar todas las actividades propuestas dentro de los apartados de obras, reforestación, mantenimiento, monitoreo y asesoría. El cronograma deberá estar planificado con una periodicidad que sea por lo menos mensual y debe estar acorde con el tipo de actividades a realizar; por ejemplo, es necesario revisar el climograma de la caracterización del sitio para verificar que la reforestación se realice en la mejor temporada, así como las obras de suelos y el mantenimiento.

3.8. Presupuesto

En el apartado de presupuesto, se deberán desglosar los costos de las obras en el orden de aparición del apartado anterior, además de incluir todas las demás acciones, equipos, o consideraciones necesarias para englobar adecuadamente el presupuesto. En el cuadro de presupuesto se deberá incluir, para cada categoría, el grupo de actividades y su costo unitario, unidad de medida, la cantidad necesaria por unidad de medida y el costo total.

El Cuadro 8 muestra un resumen apropiado de lo anterior.

Cuadro 8.- Formato de presupuesto para un proyecto de restauración forestal.

Actividad	Costo unitario	Unidad de medida	Cantidad requerida	Costo total.
Grupo de obras de conservación y restauración de suelos.				
Presas de piedra acomodada	\$	m ³		\$
Acordonamiento de material muerto	\$	M		\$
Bordos en curvas a nivel	\$	ha		\$
Producción o compra de planta				
Producción o compra de planta para reforestación	\$	Planta		\$
Grupo de obras para la reforestación				
Transporte de planta	\$	Ha		\$
Terrazas individuales	\$	Pieza		\$
Plantación	\$	Ha		\$
Fertilización	\$	Dosis por planta		\$
Grupo de obras de mantenimiento				
Plantación	\$	Ha		\$
Transporte de planta	\$	Ha		\$

Grupo de acciones de monitoreo				
Levantamiento de datos por punto de muestreo	\$	Muestreo		\$
Preparación de datos	\$	Muestreo		\$
Asesoría				
Elaboración del proyecto	\$	Visita		\$
Reportes semestrales		Documento		
Capacitación para elaboración de obras	\$	Visita		\$
Visita de seguimiento	\$	Visita		\$
Elaboración de informes	\$	Visita		\$
Total				

II. Restableciendo el Pino Piñonero en la Antigua Región Minera de Zacatecas: Proyecto de Compensación Ambiental por Cambio de Uso del Suelo en Terrenos Forestales (Ejemplo práctico)

A continuación, se muestra la aplicación de la metodología para un proyecto en particular. En este caso se seleccionó el Ejido Pánuco, Municipio de Pánuco, Zacatecas (Guizar y Velázquez, 2017).

1. Datos Generales del Proyecto

1.1. Nombre del Proyecto

Restableciendo el Pino Piñonero en la Antigua Región Minera de Zacatecas: Proyecto de Compensación Ambiental por Cambio de Uso del Suelo en Terrenos Forestales, Ejido Pánuco, Pánuco, Zacatecas.

Representantes del Comisariado Ejidal

Presidente Jesús Salvador de la Rosa Saldívar

Secretario Francisco Javier Guajardo López

Tesorero Martina Aguilar Olivares

1.2. Responsable Técnico del Proyecto

Jacinto Samuel García Carreón

Modificado de Guizar y Velázquez, 2017.

jacinto.garcia.carreon@gmail.com

Teléfono: 33 3777 7000

Ingeniero agrónomo especialista en suelos, cuenta con experiencia en la elaboración de proyectos de conservación y restauración de suelos y de compensación ambiental. Ha dirigido diversos trabajos en campo como trazo de curvas de nivel, zanjas de captación de agua de lluvia, técnicas de control de erosión de suelos y diseño y construcción de presas de control de azolves.

1.3. Alcance de la restauración

Área a restaurarse:

187 hectáreas.

Inversión:

5,991,875.00 pesos, desglosado conforme al cuadro 9.

Cuadro 9.- Resumen de costos del proyecto de restauración forestal para el Ejido Pánuco.

Categoría	Monto (\$)
Asesoría técnica	310,800.00
Mantenimiento	183,727.00
Obras	3,665,097.00
Producción de planta	407,819.00
Producción de planta para reposición	163,551.00
Protección	332,580.00
Reforestación	928,301.00
Total	5,991,875.00

1.4. Resumen del proyecto

El proyecto pretende restaurar una zona de lomeríos del paraje denominado “Casa de Cerros”, a través de zanjas bordo a nivel para captación de escurrimientos superficiales, roturación, reforestación con *Pinus cembroides* Zucc para emular una sabana con pinos y *Dalea frutescens* A. Gray, para que sea usado como banco de proteína para complementar la dieta del ganado ya que el pasto del género *Bouteloa* no contiene la suficiente cantidad de proteína, toda vez que se pretende establecer un ecosistema de sabana con árboles dispersos que pueda ser pastoreada por el ganado.

El proyecto pretende además convertirse en una opción económica a mediano plazo con la venta de árboles de navidad o bien a largo plazo con la producción de piñones.

1.5. Objetivo general

Restablecer el pino piñonero en su hábitat natural, erradicado de éste para su uso como combustible en minería, recuperando la sabana natural que existía antes de la explotación minera y la degradación por sobrepastoreo del área.

1.6. Metas

Control de la degradación del suelo en 187 hectáreas mediante distintas técnicas de control de erosión y captación de agua de lluvia *in situ*.

Reforestación de 187 hectáreas en el predio con pino piñonero a una baja densidad, transformando el sitio de un agostadero a una sabana con pino.

Propiciar la regeneración natural de las especies herbáceas existentes en el área incrementando la biodiversidad de la zona.

1.7. Antecedentes de proyectos anteriores

El área es una zona que ha tenido aprovechamiento minero casi inmediatamente después de la colonia, la vegetación dominante es de pastizal predominante con el género *Bouteloa*, no existe evidencia de árboles o arbustos, los pobladores de la zona señalan que en el lugar prácticamente no había árboles y que la leña para los hornos de fundición de las minas era traída en carretones desde el estado de Durango. Sin embargo, en la zona minera del estado de San Luis Potosí, sí fueron eliminados los bosques de encino y de pino encino para alimentar los hornos de fundición de mineral, por lo cual es probable que en la zona de Zacatecas existiera un bosque similar, tal vez de *Pinus cembroides* o de *Juniperus spp*, tal como existe en la sierra limítrofe de Zacatecas con Aguascalientes; sin embargo, dado que la zona ha sido muy impactada por el pastoreo no hay evidencias firmes de existencia de vegetación forestal.

En el ejido Pánuco, se inició un proyecto de compensación ambiental por cambio de uso de terrenos forestales en 2013, consistente en el sistema zanja bordo para captación de escorrentías de agua de lluvia y reforestación con *Pinus cembroides*, nopal y maguey. El proyecto resultó sumamente exitoso ya que el pino se ha desarrollado de manera satisfactoria.

Es muy importante resaltar que el ejido tiene un alto nivel de organización y han establecido acuerdos para manejar el agostadero, respetando no ingresar ganado al predio en restauración hasta que los árboles alcancen una talla considerable y ya no sean dañados por el pisoteo.

2. Caracterización físico-biológica del sitio

2.1. Localización

El predio se ubica al este del municipio de Pánuco, en las coordenadas 22°52'25.25" N y 102°30'11.22" W, a una altitud de 2,082 msnm, a 20 km de distancia de la Ciudad de Zacatecas rumbo a la cabecera municipal de Villanueva. Para llegar al mismo, se toma la desviación hacia Vetagrande y pasando el poblado de Pánuco y a aproximadamente 5 km rumbo a Casa de Cerros se continúa hasta llegar a la localidad El Álamo y un km adelante se toma una terracería que llega hasta el área del proyecto (Figura 23).

Croquis de localización

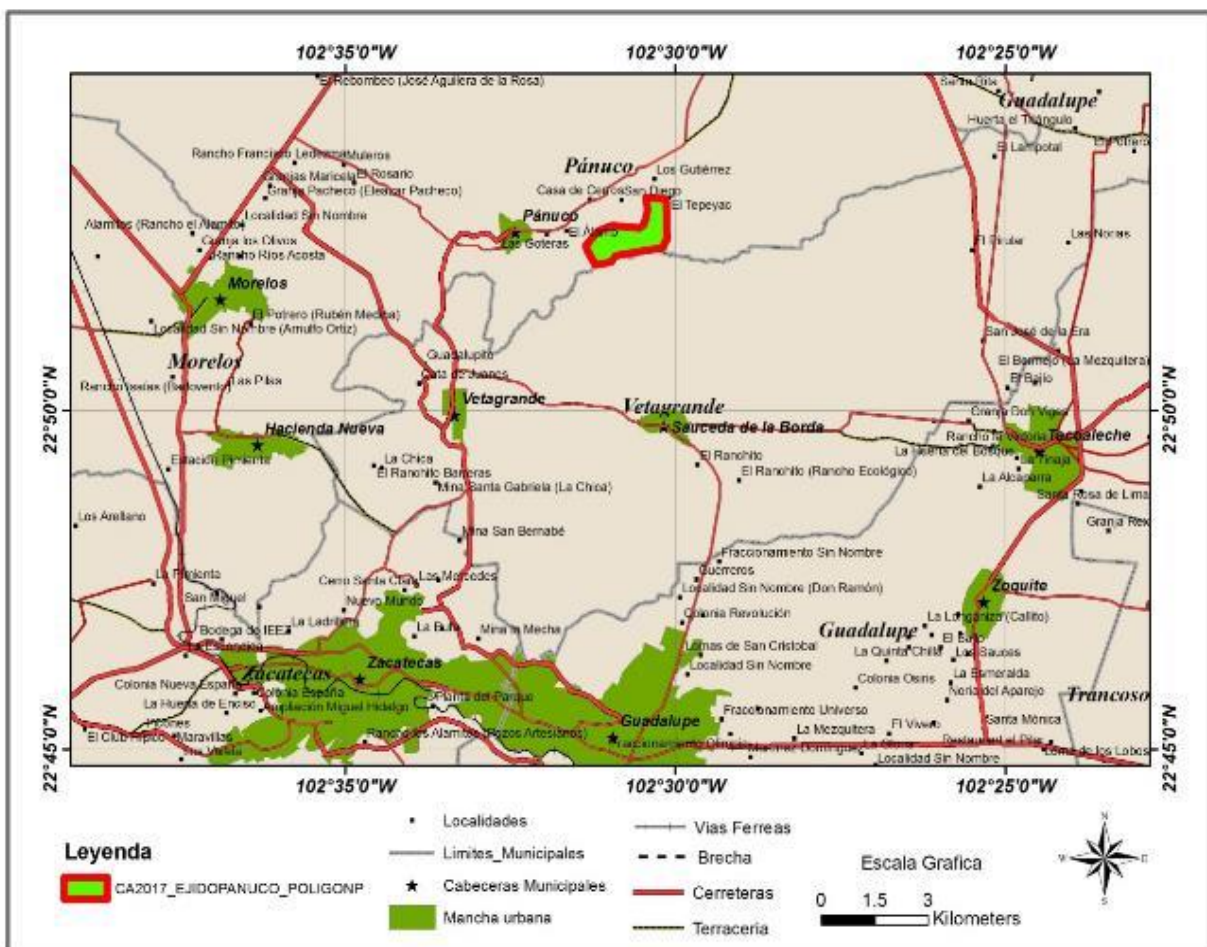


Figura 22.- Croquis de localización del proyecto de restauración forestal del Ejido Pánuco.

2.2. Plano del área que se pretende restaurar

El proyecto se implementará sobre un parteaguas que en dirección noreste disminuye la pendiente hasta quedar semiplano (Figura 24).

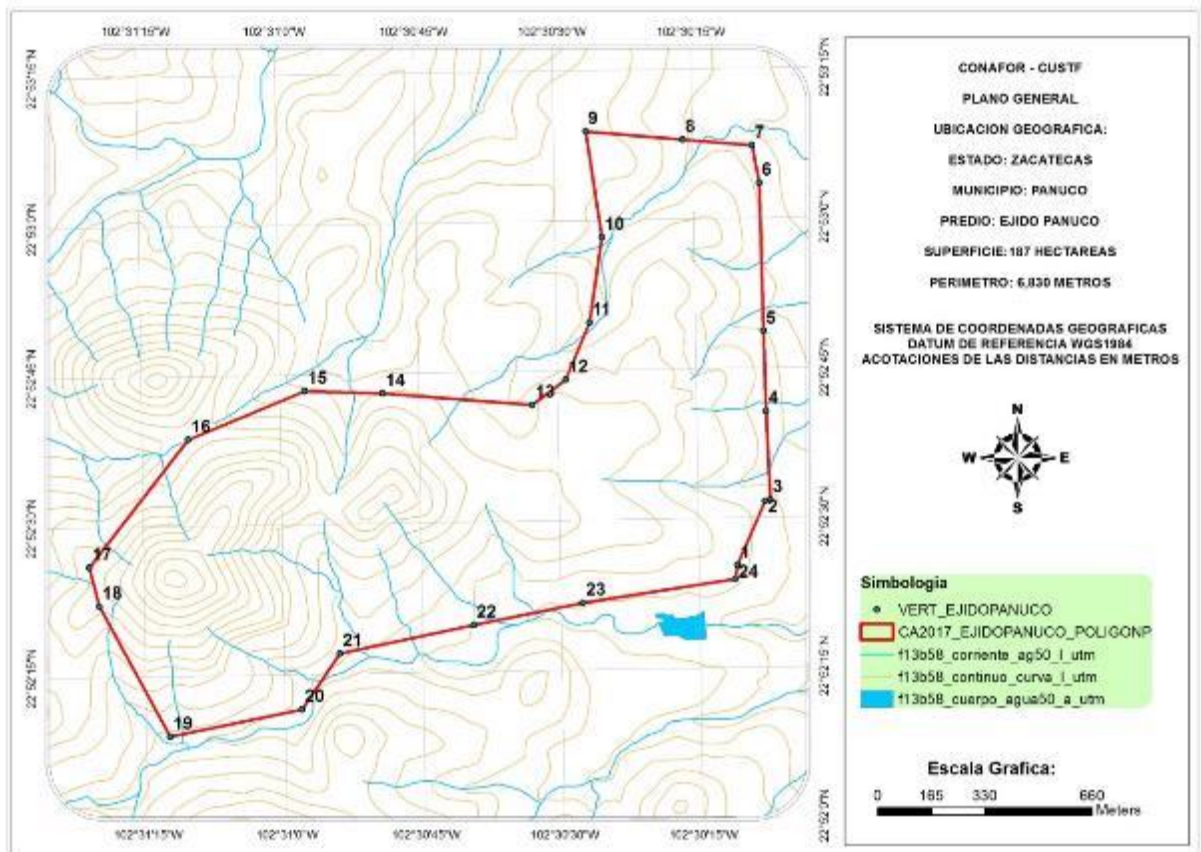


Figura 23.- Plano del polígono del Ejido Pánuco, con relieve en curvas de nivel.

2.3. Fisiografía

Pertenece a la Región Fisiográfica denominada Mesa del Centro y a la provincia de Sierras y Llanuras Potosino-Zacatecanas, que se caracteriza por ser una meseta con elevada altitud, con lomeríos y sierras de pendientes suaves y con presencia de vientos fríos que limitan el desarrollo vegetal.

El predio se ubica dentro de la Región Hidrológica El Salado, Cuenca Fresnillo – Yesca, Subcuenca Chupadero y Microcuenca Pánuco. (Provincias Fisiográficas de México y Regiones Fisiográficas de México)

2.4. Paisaje

La fisiografía del predio es ondulada y plana, las pendientes van del 10 a 15% (inclinadas) y de 15 a 30% (inclinadas pronunciadas), el relieve es de lomerío y tiene un drenaje superficial moderado y la exposición de la ladera es al noreste.

2.5. Forma del terreno

Lomeríos suaves con algunos flancos pronunciados, con pendientes máximas de 30% donde se puede caminar sin dificultad y realizar trabajos de restauración de suelos sin mayor complejidad.

2.6. Micro rasgos

Presenta algunas zonas con presencia de tepetate y arroyos con afloramiento de tepetate.

2.7. Uso del Suelo

El suelo se ha usado para pastoreo de ganado, sobre todo de caprinos y equinos y tiene un uso para pastoreo de al menos 200 años. El pastoreo se ha realizado sin manejo lo cual ha propiciado la degradación del terreno.

Altitud: 2082 MSNM

Aspecto de la pendiente: 45°

Inclinación de la pendiente: 18%

Forma de la pendiente: Cóncava – Cóncava.

Drenaje superficial del terreno: Rápido (poca permeabilidad del suelo y pendiente moderada).

2.8. Suelo

De acuerdo a los datos del INEGI, el suelo corresponde a la fórmula $Rc+Xk+Kl/2/Pc$; Regosol calcárico + Xerosol cálcico + Castañozem lúvico, de textura media, fase química petrocálcica. No obstante, ninguno de los suelos definidos por el INEGI corresponde al suelo real, que presenta un alto contenido de arcilla desde el horizonte superficial y color rojo en toda la matriz del suelo, además de un porcentaje de pedregosidad en el perfil de al menos 40%. La clasificación genética del suelo podría corresponder a un luvisol, con textura extremadamente gravosa.

2.9. Profundidad del suelo

Se detectó una profundidad promedio de 40 cm, limitada por piedras pequeñas de entre 5 y 10 cm de diámetro.

2.10. Pedregosidad en el perfil

Se estimó que el perfil presenta al menos el 40% de pedregosidad, lo que limita su capacidad para almacenar agua y nutrimentos, aunque propicia una mejor infiltración del agua reduciendo así el escurrimiento superficial.

2.11. Estructura

La estructura es de bloques subangulares en el horizonte A1 y de bloques angulares en el horizonte A2; inmediatamente después del horizonte A2, se presenta un horizonte R con presencia de piedras medianas y grandes y con muy poco material de suelo.

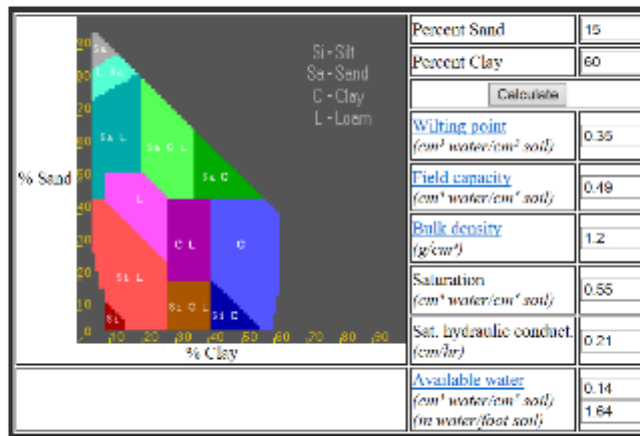
2.12. Textura

La textura en todo el perfil del suelo es arcillo-arenoso. Dada la gran cantidad de gravas en el perfil, la textura correcta debería ser arcillo-arenoso extremadamente gravoso.

Si anotamos los datos de textura en el calculador de propiedades hidráulicas, tendríamos los datos que se señalan en la figura 25:

Soil texture triangle

hydraulic properties calculator



Click on the triangle
or
enter values for percent sand and percent clay and click on [Calculate] to obtain the soil properties.

Figura 24.- Parámetros hidrológicos de acuerdo a la textura al tacto determinada en el predio del Ejido Pánuco.

Con lo cual tendríamos lo siguiente:

Densidad aparente: 1.2

Punto de marchitez permanente: 35%

Capacidad de campo: 49%

Agua aprovechable: 14%

Porcentaje de saturación o % de porosidad total: 55%

Conductividad hidráulica saturada: 21 mm.hr⁻¹

2.13. Drenaje interno

Debido a la textura del suelo sería pobremente drenado, sin embargo, puesto que existe una importante pedregosidad en el perfil el drenaje interno es en realidad moderadamente bien drenado.

2.14. Clima del área del proyecto

Con base en la información del Servicio Meteorológico Nacional para la Estación Meteorológica 00032047 San Antonio del Ciprés, que es la más cercana al proyecto, con ubicación en Latitud: 22°56'27" N y Longitud: 102°29'15" W, Altitud 2,173.0 msnm, los datos mensuales en el promedio de 1969 a 2014, con ausencia de datos para los años 1985 y 1986, los promedios mensuales de temperatura y precipitación son los siguientes:

Cuadro 10.- Valores de temperatura y precipitación para la estación meteorológica de San Antonio del Ciprés.

Elementos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura	12.2	13.8	16.6	18.8	20.5	20.3	19.2	18.6	18.1	16.9	14.2	12.7	16.8
Precipitación mm	13.2	7	3.5	5.1	21.6	66.5	84.7	85.9	79.8	28.4	11.9	10.6	418.2

El clima de acuerdo a la clasificación de Köppen, modificado por E. García, es Bskw, descrito como "Seco estepario, temperatura media anual inferior a 18 °C, régimen de lluvias de verano".

En tanto el balance hídrico de acuerdo a Thorntwaite (Velázquez y Gómez, 1997), es el señalado en el cuadro 11 y en la figura 26.

Cuadro 11.- Balance hídrico de acuerdo a Thorntwaite para la estación meteorológica de San Antonio del Ciprés.

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura	12.2	13.8	16.6	18.8	20.5	20.3	19.2	18.6	18.1	16.9	14.2	12.7	16.8
Precipitación (mm)	13.2	7	3.5	5.1	21.6	66.5	84.7	85.9	79.8	28.4	11.9	10.6	418.2
Precipitación (cm)	1.32	0.7	0.35	0.51	2.16	6.65	8.47	8.59	7.98	2.84	1.19	1.06	41.82
Índice de Calor (ICA)	3.86	4.65	6.15	7.43	8.47	8.34	7.67	7.31	7.01	6.32	4.86	4.10	76.2
Evapotranspiración potencial mensual sin corregir (cm)	3.58	4.42	6.05	7.49	8.68	8.54	7.76	7.35	7.02	6.24	4.64	3.83	75.61
<i>Factor de corrección</i>	<i>0.94</i>	<i>0.89</i>	<i>1.03</i>	<i>1.06</i>	<i>1.14</i>	<i>1.12</i>	<i>1.15</i>	<i>1.11</i>	<i>1.02</i>	<i>0.99</i>	<i>0.92</i>	<i>0.93</i>	
Evapotranspiración potencial mensual corregida (cm)	3.36	3.93	6.24	7.94	9.90	9.56	8.93	8.16	7.16	6.18	4.27	3.56	79.19
Humedad almacenada (cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	1.25	0.00	0.00	0.00	
Movimiento de humedad (cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.82	-1.25	0.00	0.00	

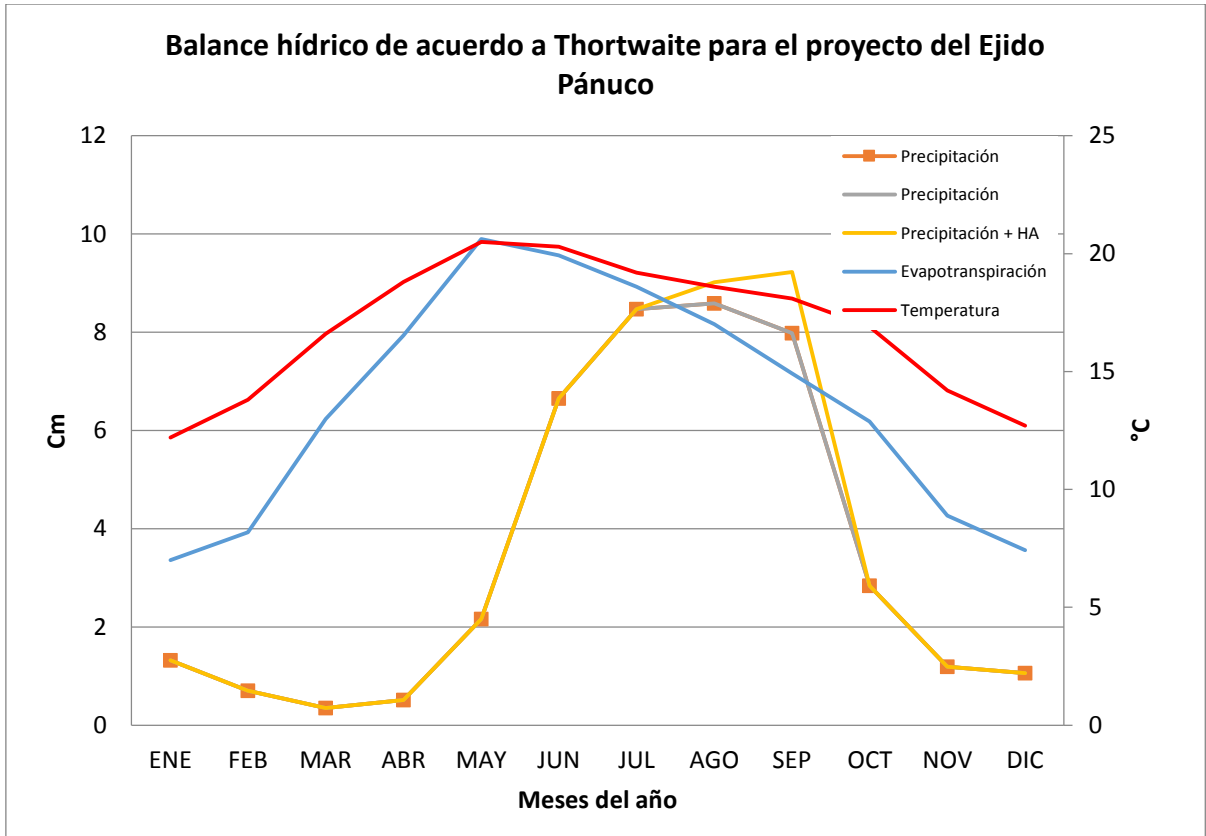


Figura 25.- Balance hídrico de acuerdo al método de Thortnwaite, para la estación de San Antonio del Ciprés.

De acuerdo a la gráfica el área del proyecto presenta una estación húmeda a partir del mes de julio y hasta el mes de septiembre y no se observa presencia de sequía intraestival, sin embargo, al graficar los datos de los años más recientes, se observa sequía intraestival o canícula como lo indica la figura 27.

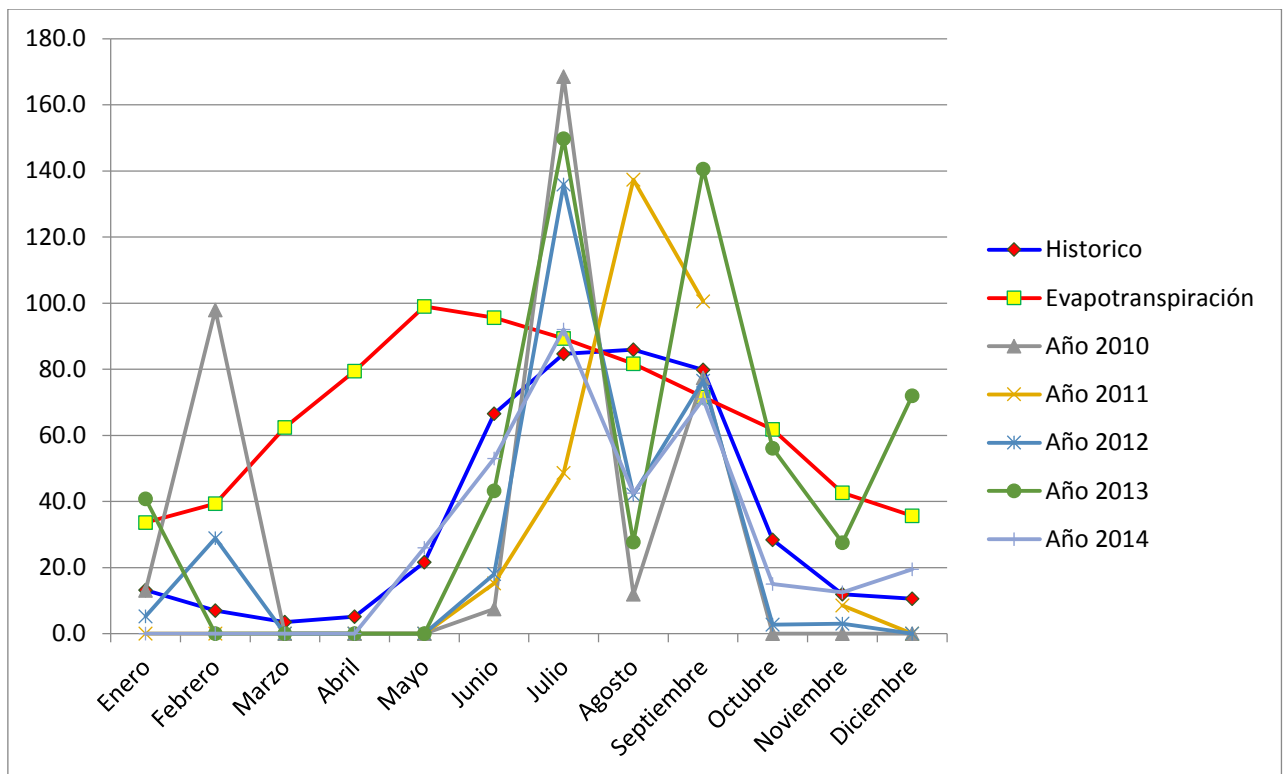


Figura 26.- Balance hídrico de acuerdo al método de Thornthwaite, para la estación de San Antonio del Ciprés, para los años 2010-2014.

La presencia de la canícula se debe tener presente, ya que, en esa corta temporada seca dentro del periodo de lluvias, se puede morir la planta reforestada.

2.15. Intensidad de la lluvia

La intensidad de la lluvia se requiere saber para poder calcular la escorrentía superficial, con los datos de lluvia máxima en 24 horas, usando la metodología descrita en manual de protección, conservación y restauración de suelos forestales, (CONAFOR, 2013), se calculó la probabilidad de lluvia y el periodo de retorno que se señala en el cuadro 12.

Cuadro 12.- Probabilidad de lluvia y periodo de retorno para la estación de San Antonio del Ciprés.

Año	Lluvia	Año	Lluvia ordenada	No. de Orden	Probabilidad	Periodo de retorno
1969	9	1997	95	1	2.2	46.0
1970	27	2007	82.3	2	4.3	23.0
1971	60	1991	73	3	6.5	15.3
1972	31	2011	65	4	8.7	11.5
1973	62	2006	63	5	10.9	9.2
1974	40	1973	62	6	13.0	7.7
1975	45.5	1971	60	7	15.2	6.6
1976	60	1976	60	8	17.4	5.8
1977	32	1990	59	9	19.6	5.1
1978	54	2002	55.4	10	21.7	4.6
1979	16	1978	54	11	23.9	4.2
1980	30	2010	54	12	26.1	3.8
1981	40	2009	52	13	28.3	3.5
1982	40	2013	51.5	14	30.4	3.3
1983	42	2012	48.7	15	32.6	3.1
1984	41	1994	48	16	34.8	2.9
1987	6.7	2008	46.2	17	37.0	2.7

1988	45	1975	45.5	18	39.1	2.6
1989	19	1988	45	19	41.3	2.4
1990	59	1983	42	20	43.5	2.3
1991	73	1984	41	21	45.7	2.2
1992	34	1974	40	22	47.8	2.1
1993	39	1981	40	23	50.0	2.0
1994	48	1982	40	24	52.2	1.9
1995	25	2003	39.8	25	54.3	1.8
1996	26	1993	39	26	56.5	1.8
1997	95	2014	37	27	58.7	1.7
1998	31	2001	36.4	28	60.9	1.6
1999	33.4	2004	34.3	29	63.0	1.6
2000	22.2	1992	34	30	65.2	1.5
2001	36.4	1999	33.4	31	67.4	1.5
2002	55.4	1977	32	32	69.6	1.4
2003	39.8	1972	31	33	71.7	1.4
2004	34.3	1998	31	34	73.9	1.4
2005	27.9	1980	30	35	76.1	1.3
2006	63	2005	27.9	36	78.3	1.3
2007	82.3	1970	27	37	80.4	1.2

2008	46.2	1996	26	38	82.6	1.2
2009	52	1995	25	39	84.8	1.2
2010	54	2000	22.2	40	87.0	1.2
2011	65	1989	19	41	89.1	1.1
2012	48.7	1979	16	42	91.3	1.1
2013	51.5	1969	9	43	93.5	1.1
2014	37	1987	6.7	44	95.7	1.0

De los datos del cuadro 12 la lluvia para un periodo de retorno correspondiente a 5 años es de 59 mm en 24 horas y la lluvia para una probabilidad del 50% es de 40 mm en 24 horas. El valor de 59 mm de lluvia máxima en 24 horas se usará para el cálculo para el cálculo de los escurrimientos.

2.16. Vegetación en el sitio

De acuerdo al conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación del estado de Zacatecas (escala 1:50,000) del INEGI y la información de campo obtenida del Inventario Estatal Forestal y de Suelos, el tipo de vegetación presente en el predio es pastizal natural como se indica en la figura 28.

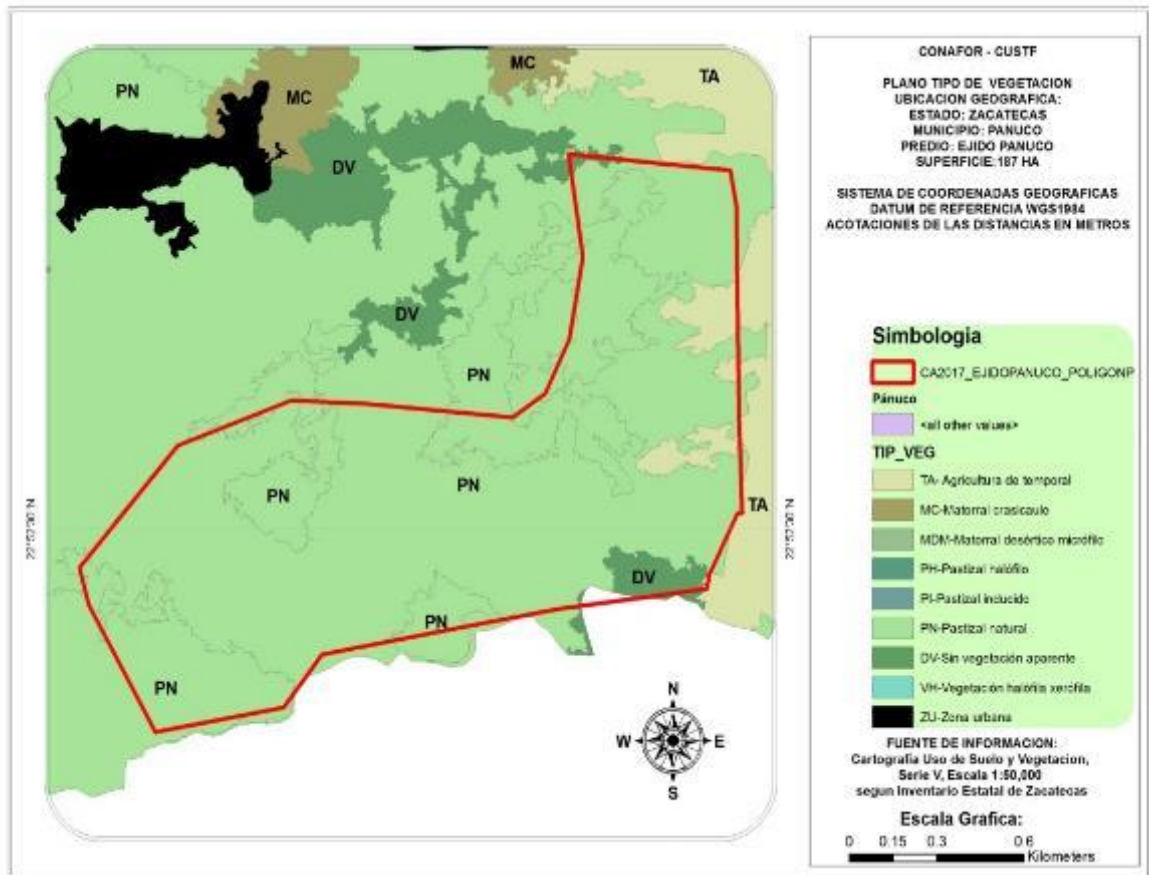


Figura 27.- Vegetación del predio a restaurarse de acuerdo al INEGI.

La vegetación predominante es “pastizal natural -matorral espinoso-nopalera”, con predominio en algunas áreas por pastizal y nopalera, representado principalmente por diversas variedades de nopal silvestre (*Opuntia leucotricha* D.C., *Opuntia streptocantha* Lem, *Opuntia rastrera* Weber, *Opuntia megacantha* Salm-Dick, y *Opuntia pachona* Griffiths). En el pastizal predominan las gramíneas (*Bouteloua curtipendula tenuis* Gould et, *Bouteloua gracilis* (HBK) Lag, *Aristida* spp, *Lycurus phleoides* HBK). El matorral espinoso está compuesto por algunas arbustivas y plantas anuales (*Mimosa aculeaticarpa* var. *biuncifera*, *Acacia farnesiana* (L) Willd, *Prosopis laevigata* (Willd)). Sin embargo, predomina el gatuño (*Mimosa aculeaticarpa* var. *biuncifera*) en todo el predio que es un indicador de degradación del ecosistema por el sobrepastoreo (Figura 29) (Guizar y Velázquez, 2017).



Figura 28.- Vegetación real existente en el predio.

Dado que la zona corresponde a lomeríos de elevada altitud, se presume que probablemente hace unos 400 años debió existir un bosque de pino encino, que probablemente se taló para alimentar los hornos de fundición de las minas cercanas, por tal motivo se propone la reforestación con *Pinus cembroides*, nopal y maguey.

2.17. Degradación del suelo

En el predio del “Ejido Pánuco” se presentan áreas de suelo totalmente desprovistas de vegetación con erosión laminar y en canalillos, así como una sobrepoblación de especies invasoras o pioneras como el gatuño, nopal y distintas especies de la familia de las compuestas. El deterioro de las condiciones y características del suelo ha sido ocasionado por el sobrepastoreo.

De acuerdo con la metodología ASSOD (1997) en el área del proyecto del Ejido Pánuco, Pánuco, Zac., se encontró lo siguiente:

Erosión hídrica de forma superficial, grado moderado, con una extensión relativa del 95%. El agente causal de la degradación es el sobrepastoreo.

Símbolo cartográfico de la degradación Hs 2.95(+).g.

Hs: Erosión hídrica, por deformación del terreno (forma superficial).

2: Nivel de Afectación moderado.

95: Extensión afectada por el proceso degradación.

(+): la tasa de la degradación en aumento.

g: Factor causativo de la degradación (sobrepastoreo).

En otras áreas se encontró la siguiente degradación:

Símbolo cartográfico de la degradación Hc 2.05(+).g

• Hc: Erosión hídrica, por deformación del terreno (forma en cárcavas) cuadro 13.

• 2: Nivel de Afectación moderado

• 5: Extensión afectada por el proceso degradación

• (+): la tasa de la degradación en aumento.

• g: Factor causativo de la degradación (sobrepastoreo).

Ubicación de las cárcavas

Cuadro 13- Ubicación y dimensiones de las cárcavas presentes en el predio.

Cárcava 1										
Coordenada inicial	Longitud Oeste			Latitud Norte			Ancho (m)	Profundidad (m)	Largo (m)	Pendiente (%)
	°	'	"	°	'	"				
Inicial	102	30	17.23	22	52	33.5	3	1	479	6
Final	102	30	7.9	22	52	34.19				
Cárcava 2										
Coordenada inicial	Longitud Oeste			Latitud Norte			Ancho (m)	Profundidad (m)	Largo (m)	Pendiente (%)
	°	'	"	°	'	"				
Inicial	102	30	36.04	22	52	34.6	3.5	1.2	125	5
Final	102	30	36.09	22	52	41.7				
Cárcava 3										
Coordenada inicial	Longitud Oeste			Latitud Norte			Ancho (m)	Profundidad (m)	Largo (m)	Pendiente (%)
	°	'	"	°	'	"				
							3	1.1	518	6

Inicial	102	31	7.3	22	52	27.3				
Final	103	30	51.97	22	52	18.7				
Cárcava 4										
Coordenada inicial	Longitud Oeste			Latitud Norte			Ancho (m)	Profundidad (m)	Largo (m)	Pendiente (%)
	°	'	"	°	'	"	5	1.3	313	4
Inicial	102	30	54.98	22	52	32.41				
Final	102	30	52.73	22	52	42.62				
Cárcava 5										
Coordenada inicial	Longitud Oeste			Latitud Norte			Ancho (m)	Profundidad (m)	Largo (m)	Pendiente (%)
	°	'	"	°	'	"	7	1.2	401	5
Inicial	102	30	20.80	22	52	42.35				
Final	102	30	9.28	22	52	49.93				

3. Propuesta de restauración

La propuesta de restauración se realiza considerando las actividades y costos de restauración forestal definidos por la CONAFOR, (CONAFOR, 2014).

3.1. Protección del área de restauración

Dado que el principal factor de disturbio es el sobrepastoreo por ganado caprino y bovino, se requiere excluir el pastoreo mediante un cercado con alambre de púas. Asimismo a lo largo del cercado se realizará una brecha cortafuego para proteger el área de un probable incendio.

El cercado y la brecha cortafuego se realizarán en todo el perímetro del cercado, quedando las metas y costos de la siguiente manera:

Cuadro 14.- Metas y costos de las actividades de protección del área

Categoría	Obra	Unidad de medida	Costo Unitario	Área que se trabajará (ha)	Meta	Costo total
Protección	Cercado con poste de fierro	km	42,000.00	187.00	6.83	286,860.00
Protección	Brecha cortafuego	km	6,694.00	187.00	6.83	45,720.00

3.2. Obras de conservación y restauración de suelos

Se realizarán zanjas bordo a nivel para captar los escurrimientos superficiales y proporcionar mayor humedad a los árboles que se plantarán. De acuerdo a lo obtenido en el climograma, el periodo húmedo es muy corto y se requieren acciones que prolonguen dicho periodo, por lo cual las zanjas de captación de escurrimientos permitirán almacenar la escorrentía superficial e incrementar la

cantidad de agua infiltrada, así como también la cantidad de agua en la matriz del suelo que estará disponible para la planta.

De acuerdo a los datos de lluvia máxima en 24 horas, se encontró que para un periodo de retorno de 5 años, la lluvia máxima corresponde a 59 mm.

Usando la metodología de las curvas numéricas (CONAFOR, 2015), se determinó el escurrimiento siguiente:

Suelo: Se clasificó como un suelo tipo C, con alto potencial de escurrimiento ya que es un suelo con un alto contenido de arcilla y poca profundidad.

Vegetación y condición hidrológica de la cuenca.- Se determinó como una cuenca en condiciones malas, ya que está fuertemente pastoreada y con muy pocos árboles.

Uso del suelo.- El uso del suelo es de pastoreo y no existe ningún manejo asociado a él.

De acuerdo con esas características y usando el cuadro 15, se determinó que la curva numérica tiene un valor de 86.

Cuadro 15.- Curvas numéricas para el cálculo de escurrimientos, tomado de CONAFOR, 2013.

Uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Curvas numéricas			
			A	B	C	D
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivos de escarda	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curva a nivel	Buena	95	75	82	86
	Terraza y curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curvas a nivel	Mala	63	74	82	85
	Curvas a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curva a nivel	Mala	64	75	83	85
	Curvas a nivel	Buena	55	60	78	83
	Terraza y curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Terraza y curva a nivel	Buena	51	67	76	80
Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	99
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas a nivel	Buena	20	35	70	79
Pasto de corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Camino de tierra		Buena	72	82	87	89
Camino pavimentados		Buena	90	90	90	90

Con el valor de la curva numérica se procedió a calcular el escurrimiento de acuerdo a la metodología de las curvas numéricas señalada en el manual de protección, conservación y restauración de suelos forestales, CONAFOR, 2013.

El potencial máximo de retención de humedad es de:

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254$$

$$S = \frac{25,400}{86} - 254$$

$$S = 41.35$$

El escurrimiento es de:

$$Q = \frac{(59 - 0.2 (41.35))^2}{59 + 0.8 (41.35)}$$

$$Q = 27.94 \text{ mm}$$

El criterio de captación de agua de lluvia definido por CONAFOR (2013), es del 50%, por lo cual el escurrimiento de diseño es de 14 mm.

Como se estableció que en la zona la precipitación es escasa y la degradación del suelo propicia el escurrimiento superficial, se propuso la construcción de un sistema de zanja bordo y puesto que el diseño de una zanja bordo es de 0.4 m de ancho por 0.4 de profundo, el volumen de almacenamiento por m de zanja construida es de 0.160 m³, entonces de acuerdo al escurrimiento superficial a captar que es de 14mm, correspondiente a 0.014 metros, para poder homogeneizar las unidades, para el área para captar el volumen de la zanja es necesaria un área de 11.42 m², pero como para el diseño de la zanja es de un metro, entonces la distancia entre zanjas es de 11.42 m, por lo que es conveniente redondearlo a 12 m entre zanjas.

Puesto que la separación entre zanjas es de 12 metros, se requieren 834 metros de zanja por hectárea.

Dado que la zona ha sido muy impactada por el sobrepastoreo se realizarán dos líneas de roturación con ripper entre zanjas, separadas cada 4 metros, por lo cual se roturarán 1,668 m por hectárea.

Control de cárcavas

En total se tienen 1,836 m de longitud de las principales cárcavas, con una profundidad promedio de 1.2 m y pendiente promedio de 5%, por lo cual se realizarán presas de piedra acomodada espaciadas con el criterio pie – cabeza.

$$E = \frac{H}{Pc} \times 100$$

$$E = \frac{1.2}{5} \times 100 = 24 m$$

Puesto que la longitud total son 1,836 m, se requieren 77 presas y puesto que el ancho promedio de la cárcava es de 4 m, y la altura de 1.2m y el ancho promedio de la presa es de 1 m, se estimó que cada presa tendrá un volumen de 6.24 m³, entonces el volumen requerido para las 77 presas es de 480 m³.

Los costos de las obras de captación de escorrentías y control de erosión son los indicados en el cuadro 16:

Cuadro 16.- Metas y costos de las actividades de control de la erosión del suelo y captación de agua de lluvia.

Categoría	Obra	Unidad de medida	Costo Unitario	Área que se trabajará (ha)	Meta por ha	Costo total (\$)
Obras	Zanja bordo manual	m	17.90	187.00	834	2,791,648.00
Obras	Roturación con bulldozer	m	1.80	187.00	1,668	561,449.00
Obras	Presas de piedra acomodada	m ³	650.00	n/a	480	312,000.00

3.3. Reforestación

Se reforestará con *Pinus cembroides*, que ha probado tener una buena adaptación en el sitio. La reforestación de pino se realizará aguas debajo de la zanja bordo, y se complementará con engordacabras (*Dalea frutescens*) en la línea de ripeo, por lo cual se tendrán en total 209 plantas de *Pinus cembroides* y 417 plantas de *Dalea frutescens*, haciendo una densidad total de 626 plantas por hectárea. El espaciamiento entre plantas será de 4 metros.

El diseño de la reforestación permitirá crear una sabana, por ello sólo se pretende reforestar 209 árboles por hectárea de *Pinus cembroides*, mientras que la *Dalea* servirá como forraje para complementar la producción de pasto nativo, que servirán como dieta para el ganado, lo anterior para no limitar la actividad productiva de los dueños de la tierra que consiste en la ganadería.

Debido a la baja disponibilidad de humedad que existe como consecuencia de la poca precipitación, escasa profundidad del suelo y la gran cantidad de fragmentos rocosos presentes en el perfil del suelo, que permiten captar únicamente 0.14 cm de agua por cada cm de profundidad del suelo, sin considerar el volumen de los fragmentos rocosos que alcanzan hasta el 40% de la matriz del suelo, es necesario agregar, como auxiliar de la reforestación, un polímero retenedor de humedad a base de acrilato de potasio con capacidad para hidratarse hasta 200 veces su peso con agua destilada. La dosis determinada para cada árbol es de 20 g de retenedor de humedad, de tal manera que en condiciones ideales de hidratación almacene 4 litros de agua.

La forma de preparación es que en la cepa, que es de forma circular y tiene 20 cm de diámetro y 30 cm de profundidad, con lo cual se tiene un volumen de 9.425 litros, se mezcla el retenedor de humedad en seco con la matriz de suelo, para que el polímero se hidrate dentro de la cepa e integrado a la matriz del suelo, esta técnica de incorporación ha resultado la mejor ya que aplicarla de manera hidratada resulta poco práctico, puesto que la gran superficie del predio, las

pendientes y la ausencia de caminos transitables para vehículos dificultan la aplicación, otra situación es que algunos han aplicado el retenedor como si fuera fertilizante al fondo de la cepa, pero al hidratarse expulsa a la planta de la cepa, sobre todo cuando la plantación se realiza con cepa muy pequeña como la de pico de pala.

Los costos para la reforestación son los que se muestran en el cuadro 17.

Cuadro 17.- Metas y costos de las actividades de reforestación.

Categoría	Obra	Unidad de medida	Costo Unitario (\$)	Área que se trabajará (ha)	Meta por ha	Costo total (\$)
Reforestación	Reforestación en cepa común	Pieza	3.5	187	626	409,717.00
Reforestación	Retenedor de humedad a base de acrilato de potasio	Dosis	4	187	626	468,248.00
Reforestación	Transporte de planta	Planta	0.43	187	626	50,336.00

3.4. Producción de planta para reforestación

La producción de planta es fundamental para la restauración forestal, puesto que ésta se está realizando en un terreno degradado y por lo tanto ya no existe germoplasma forestal para la regeneración natural. La producción de planta se realiza desde el inicio del proyecto para estar en posibilidades de reforestar al segundo año de implementación del proyecto.

Los costos se especifican en el cuadro 18.

Cuadro 18.- Metas y costos de las actividades de producción de planta para reforestación inicial.

Categoría	Obra	Unidad de medida	Costo Unitario	Área que se trabajará (ha)	Meta por ha	Costo total
Producción de planta	Planta de <i>Pinus cembroides</i>	Planta	4.05	187	209	158,286.00
Producción de planta	Planta de <i>Dalea frutescens</i>	Planta	3.20	187	417	249,533.00

3.5. Mantenimiento

Las experiencias de reforestación de proyectos anteriores realizados por la CONAFOR han mostrado que la supervivencia promedio de la reforestación es del 60%, por lo cual se realizará la reposición de un 40% de planta que se prevé que no sobreviva a la plantación inicial. Lo anterior significa que se requiere un total de 84 plantas adicionales por ha de *Pinus cembroides* y 168 plantas por ha de *Dalea frutescens*. Igualmente, se debe considerar la aplicación de poliacrilamida como retenedor de humedad para mejorar el porcentaje de supervivencia.

Las actividades y sus respectivos costos se indican en el cuadro 19.

Cuadro 19.- Metas y costos de las actividades mantenimiento.

Categoría	Obra	Unidad de medida	Costo Unitario	Área que se trabajará (ha)	Meta por ha	Costo total
Mantenimiento	Reforestación en cepa común	Pieza	3.5	187	250	163,625.00
Mantenimiento	Transporte de planta	Planta	0.43	187	250	20,102.00

3.6. Producción de planta para reposición

Se producirá planta para reponer la que no sobreviva a la reforestación inicial, con la finalidad de mantener un porcentaje de supervivencia mayor al 80%.

Los costos se establecen en el cuadro 20.

Cuadro 20.- Metas y costos de las actividades de producción de planta para reposición de planta muerta.

Categoría	Obra	Unidad de medida	Costo Unitario	Área que se trabajará (ha)	Meta por ha	Costo total
Producción de planta para reposición	Planta de <i>Pinus cembroides</i>	Planta	4.05	187	84	63,618.00
Producción de planta para reposición	Planta de <i>Dalea frutescens</i>	Planta	3.20	187	167	99,933.00

3.7. Monitoreo de la restauración

Para asegurar el éxito de la restauración, se realizará un monitoreo constante midiendo los indicadores que permitan concluir que la restauración está en la trayectoria adecuada.

La línea base se realizará midiendo la cobertura del suelo inicial del suelo y remidiendo cada 6 meses, antes y después de la temporada de lluvias, para ver la evolución de las acciones de restauración. Asimismo se evaluarán otros indicadores como los siguientes:

- Porcentaje de supervivencia de la reforestación, general y por especie
- Porcentaje de cobertura del suelo, con remediciones cada 6 meses, antes y después de la temporada de lluvias
- Desarrollo de la reforestación para cada especie, en cuanto a altura y grosor del tallo, mediciones mediante sitios de 100 metros de longitud
- Evaluación del agua interceptada por las zanjas bordo para cada uno de los tres años de vida del proyecto. Se realizará mediante una estimación teórica usando los datos de la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional que presente datos para cada año
- Contenido de carbono orgánico en el suelo en inicio del proyecto y al finalizar el proyecto (3 años después).

Se definió además el siguiente sitio de monitoreo para realizar comparaciones en el cambio del paisaje a lo largo del tiempo de ejecución del proyecto, en este sitio se tomarán fotografías cada 6 meses para contar con una comparación de la condición de antes y después.

Sitio de referencia:

Coordenada de Ubicación:

Latitud = N22°52'29.29"

Longitud = W102°30'30.86"



Figura 29.- Vistas del sitio de control del monitoreo.

3.8. Asesoría técnica

El éxito de un proyecto de restauración forestal está centrado en el seguimiento técnico que se le brinde al proyecto y la capacidad de solucionar las situaciones imprevistas que se presenten en la implementación del proyecto, por ello la asesoría técnica es fundamental para asegurar la calidad de las actividades y con ello disminuir las probabilidades de fracaso de la restauración.

El valor de la asistencia técnica se ha calculado de distintas maneras; sin embargo, se considera que el método más preciso es el que indica los costos de cada actividad que se realizará y que dichos costos son objetivos de acuerdo a la actividad y el nivel de conocimientos que se requiere para llevarlos a cabo.

Para el asesoramiento de las distintas actividades es necesaria la participación de un ingeniero proyectista que dirija el proyecto y un ingeniero de apoyo, por lo cual se tendrá un costo por la brigada de asesoría, además de los costos de hospedaje, alimentación y traslado, y los costos de oficina para las diferentes actividades requeridas en el proyecto.

Para el cálculo de los costos de asesoría se consideran las siguientes actividades señaladas en el cuadro 21 y los costos en el cuadro 22.

Cuadro 21. Tipos y número de visitas requeridas para la asesoría técnica.

Objeto de la visita	Número de visitas requeridas
Asambleas	4
Elaboración del proyecto	4
Protección	4
Obras	20
Reforestación	15

Mantenimiento	15
Monitoreo	8
Extraordinarias	4
Total	74

Cuadro 22.- Metas y costos de las actividades de asesoría

Categoría	Obra	Unidad de medida	Costo Unitario	Área que se trabajará (ha)	Meta por ha	Costo total
Asesoría técnica	Asesoría	Visita	4,200	187	74	310,800.00

El costo de cada visita es de \$ 4,200, por lo cual el costo total de la asesoría es de \$ 310,800.00 y de acuerdo a la extensión del proyecto, el costo por hectárea es de \$ 1,662.00.

3.9. Calendario de actividades

El calendario tiene como objeto llevar un control de las actividades que se deben realizar y el periodo óptimo para realizarlas. El hecho de calendarizar permite adecuar el proyecto de acuerdo a las circunstancias que se presenten o bien tomar decisiones para cumplir con las actividades en el plazo requerido; por ejemplo, en caso de que la temporada de lluvias se retrase, se decidirá incrementar la cantidad de personas que realizarán la reforestación para que pueda concluir satisfactoriamente la actividad de reforestación en el periodo óptimo para ello, las actividades y plazos son las que establecen en el cuadro 23.

Cuadro 23.- Calendario de ejecución del proyecto.

Calendario de Realización del Proyecto.																																					
Actividad	Año 1										Año 2										Año 3																
	mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5	mes 6	mes 7	mes 8	mes 9	mes 10	mes 11	mes 12	mes 13	mes 14	mes 15	mes 16	mes 17	mes 18	mes 19	mes 20	mes 21	mes 22	mes 23	mes 24	mes 25	mes 26	mes 27	mes 28	mes 29	mes 30	mes 31	mes 32	mes 33	mes 34	mes 35	mes 36	
Brechas corta fuego			X	X																																	
Cercado con postes de fierro			X	X																																	
Zanjas bordo en curvas a nivel			X	X	X	X																															
Subsoleo con bulldozer			X	X	X	X																															
Producción de planta de planta	X	X	X	X	X	X																															
Reforestación							X	X	X	X																											
Transporte de planta					X	X	X																														
Producción de planta ciclo largo para reposición planta muerta										X	X	X	X	X	X	X	X																				
Transporte de planta para reposición																		X	X	X	X																
Reposición de planta muerta																		X	X	X	X																
Asesoría Técnica	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Monitoreo de la restauración																																					

3.10. Presupuesto

El presupuesto para la ejecución del proyecto es el indicado en el cuadro 24:

Cuadro 24.- Presupuesto requerido para la ejecución del proyecto de restauración forestal.

Categoría	Obra	Unidad de medida	Costo Unitario	Área que se trabajará (ha)	Meta	Costo total
Protección	Cercado con poste de fierro	km	42,000.00	187	6.83	286,860.00
Protección	Brecha cortafuego	km	6,694.00	187	6.83	45,720.00
Obras	Zanja bordo manual	m	17.9	187	834	2,791,648.00
Obras	Roturación con bulldozer	m	1.8	187	1,668	561,449.00
Obras	Presas de piedra acomodada	m ³	650	n/a	480	312,000.00
Reforestación	Reforestación en cepa común	Pieza	3.5	187	626	409,717.00
Reforestación	Retenedor de humedad a base de acrilato de potasio	Dosis	4	187	626	468,248.00

Reforestación	Transporte de planta	Planta	0.43	187	626	50,336.00
Producción de planta	Planta de <i>Pinus cembroides</i>	Planta	4.05	187	209	158,286.00
Producción de planta	Planta de <i>Dalea frutescens</i>	Planta	3.2	187	417	249,533.00
Mantenimiento	Reforestación en cepa común	Pieza	3.5	187	250	163,625.00
Mantenimiento	Transporte de planta	Planta	0.43	187	250	20,102.00
Producción de planta para reposición	Planta de <i>Pinus cembroides</i>	Planta	4.05	187	84	63,618.00
Producción de planta para reposición	Planta de <i>Dalea frutescens</i>	Planta	3.2	187	167	99,933.00
Asesoría técnica	Asesoría	Visita	4,200	187	74	310,800.00
Total				187		5,991,875.00

3.11. Impacto del proyecto

Además de la restauración del predio, puesto que prácticamente todas las actividades se realizarán de forma manual, con excepción del costo de los materiales para el cercado, presas, retenedor de humedad y producción de planta; el recurso invertido se traducirá en empleos generados para los pobladores del ejido que participen en la realización de los trabajos. Además, se disminuirá el coeficiente de agostadero al recuperar la cobertura vegetal del

predio, en Sonora, según apreciaciones de algunos ganaderos que han implementado proyectos de compensación ambiental, ha disminuido el coeficiente de agostadero de 30 a 10 hectáreas por unidad animal. Por otra parte, el pino se puede comercializar como árbol de navidad en un periodo de aproximadamente 8 años y puesto que en Zacatecas no existe oferta de este tipo, se estima que cada árbol se puede comercializar en al menos 400 pesos actuales, por lo cual por hectárea se tendría un ingreso 83,600 pesos, lo que hace que el proyecto sea redituable, ecológica y económicamente.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La aplicación de la guía se ajusta adecuadamente para el planteamiento de un proyecto de restauración forestal. Una cualidad importante de la guía es que las herramientas como el climograma y el cálculo de las propiedades hidráulicas del suelo a través de la textura, permiten tomar decisiones prácticas para ajustar el proyecto a las condiciones reales del terreno y plantear obras y técnicas de restauración forestal que se adapten a las condiciones específicas del predio.

El proceso ordenado de la descripción de las condiciones del predio, las condiciones de degradación del suelo y la vegetación, permiten también plantear de manera acertada las obras y prácticas de restauración, pero además el esquema ordenado de actividades y costos de cada una de ellas, facilita al proyectista el cálculo de metas y costos y facilita al revisor del proyecto el entendimiento de las técnicas de restauración y a la vez simplifica la modificación de cualquier actividad y costo, así como su posible discusión con el proyectista para tomar un acuerdo que beneficie a ambas partes. Por otra parte, en caso de que no se cuente con recursos suficientes para el financiamiento de la restauración, usando la guía se podría definir un nivel de restauración menor al requerido, pero suficiente para detener los procesos e incrementar la resistencia y resiliencia del ecosistema para iniciar una sucesión ecológica en una dirección más productiva que las condiciones prevalecientes en el predio.

Asimismo, el planteamiento ordenado de los proyectos de restauración forestal para compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales permitirá al personal de la CONAFOR mantener un estándar mínimo de calidad en los proyectos y facilitar la revisión de los proyectos ejecutivos.

Al describirse a mayor detalle todos los elementos del ecosistema y justificar los cálculos de las acciones de restauración mediante datos medidos o estimados en el terreno que se va a restaurar, se tendrán mayores probabilidades de éxito que al combinarse con una adecuada asesoría técnica y una supervisión adecuada, resultarán sin duda en proyectos exitosos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar la guía para la elaboración de proyectos de restauración de diferentes ecosistemas para detectar las situaciones en las que las recomendaciones de la guía no son aplicables y mejorar los aspectos a considerar en un proyecto de restauración forestal.

Se recomienda además sustentar las decisiones sobre las técnicas de restauración con la mayor cantidad de datos que sea posible obtener, tanto de campo como de laboratorio, lo que permitirá tener menos errores en la aplicación de los esquemas de restauración forestal.

Otra recomendación adecuada es montar pequeños experimentos variando diversos factores que se consideren importantes para la restauración, ya que no se dispone de suficientes datos en cuanto a proyectos de restauración forestal.

LITERATURA CITADA

- Begon M., Harper J.L., y Townsend C.R. 2006. Ecology from Individuals to Ecosystems, 4th Ed., Blackwell Publishing, USA. 469-473.
- Caudle D., DiBenedetto J, Karl M, Sanchez H, Talbot C. 2013. Interagency Ecological Site, Handbook for Rangelands, Bureau of Land Management, Forest Service, National Resources Conservating Service, USA. 12-19.
- CONAFOR, 2013. Protección, Conservación y Restauración de Suelos Forestales, Manual de obras y prácticas, 5ta edición, Guadalajara, Jalisco. 55-65.
- CONAFOR, 2014. Criterios de Operación del Programa de Compensación Ambiental por Cambio de Uso del Suelo en Terrenos Forestales, en: http://www.conafor.gob.mx/apoyos/index.php/inicio/app_apoyos#/detalle/2017/67
- CONAFOR, 2017. Inventario Nacional Forestal y de Suelos, Informe de Resultados 2009-2014, Guadalajara, Jalisco. 42-150.
- Clewell A.F., Aronson J. 2013. Ecological Restoration, Principles, Values and Structure of an Emerging Profession, Second Edition, Washington, D.C. USA. 137-143.
- DOF, 2005. Acuerdo por el que se establecen los niveles de equivalencia para la compensación ambiental por el cambio de uso de suelo en terrenos forestales, los criterios técnicos y el método que deberán observarse para su determinación., 28 de Septiembre de 2005.

DOF, 2006 Acuerdo mediante el cual se expiden los costos de referencia para reforestación o restauración y su mantenimiento para compensación ambiental por cambio de uso de suelo en terrenos forestales y la metodología para su estimación, 12 de abril de 2006.

DOF, 2014. Acuerdo mediante el cual se expiden los costos de referencia para reforestación o restauración y su mantenimiento para compensación ambiental por cambio de uso de suelo en terrenos forestales y la metodología para su estimación, 31 de Julio de 2014.

FAO. 2015. Testing field methods for assessing the forest protective function for soil and water, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 6-15.

Figueroa, S. B., Amante O. A., Cortés T. H.G., Pimentel L. J., Osuna C. E.S., Rodríguez O. J. M., Morales F. F.J. 1991. Manual de Predicción de Pérdida de Suelo por Erosión, Colegio de Postgraduados. México. 72-109.

García C. J. S., Rodríguez E. F.A., López R.G.I. 2014. Manual de costos de obras de suelos y reforestación, Comisión Nacional Forestal, México. 9-30.

García E.1981. Modificaciones a la clasificación de climática de Köppen; para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, México.46-60.

Green S.V., Stott D.E., Polyacrilamide: A review of the Use, Effectiveness and Cost of a Soil Erosion Control Amendment. 2001, In D.E. Stott, R.H. Mohtar and G.C. Steinhardt (Eds). 2001, Sustaining the Global Farm, Selected Papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting

held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory. 384-389.

Guizar P. J.T., Velázquez B. J.C. 2017. Proyecto de Compensación ambiental por Cambio de Uso de Suelo en Terrenos Forestales en el Predio “Ejido Panuco” Municipio de Panuco, Zacatecas, Comisión Nacional Forestal. 3-24

LGDFS. 2003. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, consultada en http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/lgdfs_2003.htm

LGDFS. 2018. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, consultada en <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index.htm>.

Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y Conservación del Suelo, Segunda Edición, Mundiprensa, Madrid, España. 39-42.

Miura S., Amacher M., Hofer T., San-Miguel-Ayanz J., Ernowati, Thackway R., 2015, Protective functions and ecosystem services of global forest in the past quarter-century, Forest Ecology and Management 352 (2015) 35-46.

Narro F. E. 1994. Física de Suelos, Ed. Trillas, México, D.F. 50-58.

NRCS 2017, Ecological Site Description en:

<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/technical/ecosciences/desc/>

Ortiz S. C. 2010. Edafología, 8va. Edición, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, 22-24 y 60-66.

Porta C. J., López-Acevedo R. M., Roquero D.L. C., 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente, Ed. Mundi Prensa, Madrid, España, 80-88.

Provincias fisiográficas de México en:

<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/rfisio4mgw.png>

Regiones fisiográficas de México en:

http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2_008.pdf

Rivera, R.G. 1999. Consideraciones sobre el cambio de uso del suelo en terrenos forestales, actual Directora de Suelos de la Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos, desde 1996 (comunicación personal).

RLGDFS, 2005, Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, consultada en:
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley.htm>.

SEMARNAP. 2002. Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre en la República Mexicana. 8-16. Memoria Nacional, SEMARNAP.

Rodríguez E.F.A., García C.J.S. 2015. Guía de Elaboración de Proyectos de Compensación Ambiental, Comisión Nacional Forestal. 2-24.

Roundcrantz K, Skärbäck E., 2003, Environmental compensation in planning; a review of five different countries with major emphasis in german system, 204-226, European Environment, John Wiley and Sons.

Shoeneberguer P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., and Broderson, W.D. (Editors). 2002. Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 2.0, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska, USA. 1-5 – 1-14.

Society for Ecological Restoration International (SER). 2004. Grupo de trabajo sobre ciencias y políticas, 2004. Ponencia Introductoria de SER International sobre la restauración ecológica, www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.

Stringham T.K., Krueguer W.C., Shaver P. L., 2003, State and transition model: An ecological process approach, in Journal Range Manegement, 56(2), March, 2003. 106-113.

USDA. 1999. Guía para la Evaluación de la Salud y Calidad del Suelo, Washington, D.C., USA. 26-27.

Velázquez R. L., Gómez D. J. D., 1997, Cálculo del clima de acuerdo al segundo sistema de Thornthwaite, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 3-10

Web Soil Survey, consultado en:

<https://websoilsurvey.sc.egov.usda.gov/App/HomePage.htm>

Whisenant, S.G.1999. Repairing damaged wildlands: A process-oriented, landscape-scale approach, Cambridge Univ. Press. 100-124